



**ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ
СОФИЯ**

МАШИННО – ТЕХНОЛОГИЧЕН ФАКУЛТЕТ



**Кат. “Технология на машиностроенето и
металорежещи машини”**

ВИРТУАЛНО И ФИЗИЧЕСКО ПРОТОТИПИРАНЕ

проф. д-р инж. Георги Тодоров

АВТОРЕФЕРАТ НА ДИСЕРТАЦИЯ

**за получаване на научната степен
“ДОКТОР НА НАУКИТЕ”**

Професионално направление:

5.1 “Машинно инженерство”

Научна специалност:

**«Автоматизация на инженерния труд и системи за
автоматизирано проектиране»**

**София
2019**

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от катедра “Технология на машиностроенето и металоурежещи машини”, МТФ при ТУ–София, на заседание на катедрен съвет, състоял се на 18.03.2019 г.

Кандидатът е професор в МТФ, ТУ -София, създател и ръководител е на лаборатория „CAD/CAM/CAE в Индустрията” при МТФ, ТУ-София повече от 25 г., от 2009 г. е ръководител на „център за виртуално инженерство – проф. д-р Ил. Бояджиев“, от 2010 г. е декан на МТФ.

Изследванията по дисертационния труд са извършени в лаборатория „CAD/CAM/CAE в Индустрията” и по проекти с редица индустриални партньори.

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

Дисертационният труд е в общ обем от **423** страници, съдържа **359** фигури, **44** таблици и списък на използваните **186** литературни източници.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 11.07.2019 г. от 15 ч. в заседателна зала на БИЦ на ТУ-София на заседание на научно жури в състав:

Проф. д-р инж. Любомир Димитров	Председател
Проф. д-р инж. Иво Малаков,	Научен секретар
Чл. Кор. проф. д-р инж. Венелин Живков	Член
Проф. д-р инж. Николай Минчев, ДХК	Член
Проф. д-р инж. Димитър Дичев	Член
Проф. д-р инж. Ангел Диков	Член
Проф. д-р инж. Лъчезар Стоев	Член

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Машинно-технологичния факултет на ТУ-София, кабинет 3230.

Автор: Георги Димитров Тодоров

Заглавие: **ВИРТУАЛНО И ФИЗИЧЕСКО ПРОТОТИПИРАНЕ**

Тираж: 30 бр.

Печатна база на ТУ-София

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторът изказва специални благодарности на:

Екипа на лаборатория „CAD/CAM/CAE в индустрията“, МТФ, ТУ -София, който допринесе изключително много за мотивирането, концепирането, създаването и оформянето на този труд. На всички докторанти и дипломанти, които са работили по теми в свързани области и са допринесли за оформянето на графични и други материали;

На индустриалните ни партньори:

CMS Srl, Italy; Deltica, USA; Genmark Automation, USA; Mantovanibenne Srl, Italy; Nexen Lift Trucks Ltd., UK; VISTEON (JCI), Bulgaria, France; SIGUREN Ingénierie, France; Sensata Technologies/Sensor-Nite Industrial, Bulgaria, Holland; Texas Institute of Science, USA; Vi TECHNOLOGY, France; Бъдещност АД; СПАРКИ ЕЛТОС АД и много други, проектите с които ми дадоха опита и увереността в приложимостта на виртуалните технологии;

На всички колеги от МТФ, ТУ- София и професионалната общност,

И особено на моите близки и приятели, които ме инспирираха, подкрепяха и окуражаваха да подготвя този научен труд.

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА РАБОТАТА

АКТУАЛНОСТ НА ПРОБЛЕМА

Цялостното нарастване на комплексността на продуктите в мехатронен, технологичен и информационен аспект, както и вариантноста на продуктите, създаването им по заявка на клиента и всичко това на фона на непрекъснатия пазарен натиск за съкращаването на времето на развитие и достигане до пазара и още по-голям натиск за редуциране на себестойността, изискват нови технологии за концепиране, проектиране, детайлно конструиране и особено за валидиране на създаваните иновации и технологии. В резултат на това организацията и методологията на проектирането е изключително актуален проблем, особено като мощно средство за ускоряване на процеса на развитие и особено като инструмент за изследване чрез методите на виртуалното и физическото прототипиране за подобряване на качеството и намаляване на разходите. Съчетаването на виртуалните технологии с методите на адитивните технологии (RP) се очертава като обещаващ инструментариум за създаване и изграждане на медицински импланти, включително с персонализация.

НАУЧНА НОВИСТ

Днешните индустриални и инженерни процеси се определят от цялостната дигитална трансформация. Този нов свят на свързаност и дигитализация изисква и нови инженерни и технологични решения за новата реалност на дигиталната икономика, иновациите, дигиталните пазари и промените в бизнес моделите. Това включва създаване стратегия за дигитална трансформация, нови умения и експертизата на хората, занимаващи се в тази област. Все по-активно се използват технологични решения за обмен на данни, на знания, на анализ на големи обеми данни, на роботизация, на 3D виртуално изграждане и адитивни методи за производство, на персонализация на продуктите, на виртуални симулации на процеси, продукти и системи, на дигитални близнаци и кибер-физични системи и особено на системи с елементи на изкуствен интелект. Всички тези нови технологии изискват нови знания за процесите на дефиниране, развитие, валидация, индустриализация, производство, поддръжка и рециклиране на продуктите в техния жизнен цикъл.

ПРАКТИЧЕСКА ПРИЛОЖИМОСТ

Най-ефективният подход за намаляване на инвестиционните и пазарните рискове на създаваните иновации е процесът на изграждане на прототипи на най-ранните възможни етапи с използване на методите и средствата на виртуалното инженерство. В работата е разработена методологична последователност при концепиране и проектиране на сложни системи, включително за създаване на импланти. Предложен е нов фрактален метод, както и иновативен „LL“ метод за виртуално и физическо прототипиране. Предложен е нов метод „Бяла/Черна“ кутия за валидиране на виртуалните прототипи. Чрез примери от индустрията е доказано, че симулациите дават много точни оценки при оптимизацията на дизайна в съчетание с физически тестове и обратна връзка с виртуалния прототип, еволюиращ в дигитален близнак. Предложените методи и подходи са с пряка практическа приложимост, апробирана в редица индустриални и изследователски проекти, някои от които са представени в работата.

РЕАЛИЗИРАНЕ НА РАБОТАТА

Изследванията по дисертацията са извършени в лаборатория „CAD/CAM/CAE в индустрията“ към МТФ на ТУ-София, част от изследванията са осъществени в СПАРКИ ЕЛТОС АД, Либхер хаусгерете България, TermaTech, Франция, NEXEN Forklift, UK, и много други. Резултатите от изследванията са внедрени и се ползват при развитието на нови продукти в голям брой компании в България, Франция, Италия, Германия, Великобритания и др.

ОДОБРЯВАНЕ НА РАБОТАТА

Дисертационната работа е докладвана пред катедра „Технология на машиностроенето и металоорежещите машини“, МТФ, ТУ -София и пред ФС на МТФ.

ПУБЛИКУВАНЕ НА РЕЗУЛТАТИТЕ

Съществените резултати на дисертацията са публикувани в 8 работи, реферирани в SCOPUS и Web of Science, в 22 работи, публикувани в конференции и списания, в над 10 международни патента и редица международни проекти под ръководството на автора.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИЯТА

1. ВЪВЕДЕНИЕ В ИЗСЛЕДВАНАТА ОБЛАСТ

1.1. ОБЕКТ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

Обект на изследването са средствата, методите и подходите на виртуалното и физическото прототипиране при развитието на нови продукти, позволяващи ранно тестване на концептуални решения, идентификация на функционалността, откриване на потенциалните инженерни проблеми, както и бързо и адекватно персонализиране на решенията, при което се намалява съществено броят на конструктивните изменения и броят на изработваните прототипи и свързаните с това нови стратегии.

1.2. ОБХВАТ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО И ФОКУС

Изследването обхваща процесите на развитие, идентификация и валидация при създаването на иновативни продукти и решения, както и процесите, позволяващи висока степен на персонализация при следване на необходимостта от възможно най-голямо съкращаване на процеса от идеята до продукта и при постигане на максимална икономическа ефективност.

Фокусът на изследването е върху развитие на стратегиите, методите и подходите за прилагане на CAD/CAM/CAE технологиите и по-специално в развитието и апробацията на ефективно прилагане на виртуалните и физически прототипи за скъсяване на времето, подобряване на качествените и екологичните показатели при развитие на продуктите, вариантното проектиране и персонализация, а също и за устойчивост на организационните и процесни методи и средства за минимизиране на риска и подобряване на качеството и ефективността на иновациите.

1.3. НИВО НА ТЕХНОЛОГИИТЕ И РЕШЕНИЯТА

Индустриалният свят постепенно се отдалечава от времето на големите поръчки и на серийните производства, а тясната специализация се измества от нови иновативни методи и процеси, осъществявани на нова генерация гъвкаво оборудване, включително и 3D принтиране. Проектантският инструментариум се развива много динамично и се насочва все повече към „виртуално прототипиране“. „Дигиталната свързаност и структура“ на виртуалните технологии е най-високото ниво на абстракция с много предимства по отношение на обхватност и гъвкавост и бележи технологични върхове в тази сфера.

1.4. ИЗСЛЕДОВАТЕЛСКИ ПРЕДИЗВИКАТЕЛСТВА И ЦЕЛИ

Независимо от бурното развитие на технологиите се забелязва съществено изоставане на стратегиите, методите, и подходите за ефективното им приложение.

Инженерната практика в този смисъл поставя следните научни цели:

1. Развитие на стратегии и методи за пресъздаване на поведението в работни условия на разработвания обект на възможно най-ранен етап, както и за развитието на нови, подобрени варианти въз основа на изходната конструкция (оптимизация) чрез виртуално прототипиране.
2. Развитие на методи и подходи с цел намаляване на времето за развитие и валидиране на изделията, като се намира най-ефективният баланс с изготвянето на физически прототипи.
3. Създаване на методи и подходи за идентификация и оценяване на конкретни физични величини и/или процесни параметри (често пъти тези величини трудно могат да бъдат пряко определени, въз основа на физическо моделиране).
4. Създаване на методи и подходи за фина настройка на виртуалните прототипи чрез физическо прототипиране на специфични аспекти на поведението чрез идентификация на конкретни физични свойства или величини (тези величини трудно могат да бъдат пряко определени чрез виртуално моделиране).
5. Развитие на методи за прилагане на технологиите на виртуалното прототипиране и бързото физическо прототипиране за персонализация на изделията, включително в сферата на здравеопазването и имплантологията.

1.5. ИЗСЛЕДОВАТЕЛСКА МЕТОДОЛОГИЯ

Това изследване се базира на натрупването на емпирични знания за основни методи и принципи за използване на прототипирането при изследване на проектираните обекти и техните елементи до функционални връзки между тези елементи и до поведението на обектите при тяхното виртуално моделиране, симулиране и оптимизация.

Научното изследване тук разкрива основните страни на научната теория за обясняване на същността на явленията чрез еднозначен език на описанието им чрез комплексни и свързани модели, позволяващи да прогнозира поведението на обектите чрез изследване на виртуални обекти на създаваните продукти, за дефиниране на границите на приложимост в практиката и възможности за по-нататъшното им развитие.

Работата е развита в десет глави. Глава 1 представя изследователската среда и методологията, заедно с описание на научните цели, обекта, фокуса и методологията на изследването.

Глава 2 съдържа преглед на литературата и теоретична основа на изследването, която включва прегледи от виртуалното инженерство, развитието на продукт, виртуална среда и виртуални прототипи, физически прототипи и взаимодействие, и изисквания за виртуални/физически прототипи.

Въз основа на литературния анализ на състоянието на изследваната област и осъществения анализ, в края на глава 2 са формирани основни изводи, определящи посоката и обхвата на изследването. В края на главата е дефинирана общата и специфичните цели (задачи), поставени в работата.

Глава 3 е посветена на развитие на иновативни проектни методи и подходи при виртуализация на процеса на създаване на нови продукти. Разгледани са иновативен подход за концептиране, архитектурно изграждане и развитие на комплексни продукти в разпределена виртуална среда, подход за КЛЪСТЕРИРАНЕ (изграждане на модули) и са дефинирани концептуална архитектура и разпределение на функции м/у механични системни решения, електронно сензорни специализирани решения и решения чрез софтуерни приложения.

В глава 4 се анализира приложимостта на симулационните модели и анализите като основен елемент на виртуално прототипиране. Разгледани са специфични особености при дефиниране на инженерен анализ, приложимост при специфични структурни анализи, мултифизичните анализи, както и на обратното интегриране на оптимизирани чрез виртуален прототип геометрични модели в процеса на развитие на продукта и прилагането на виртуалното прототипиране за технологично ориентирано проектиране и конструиране.

В глава 5 се анализират адитивните технологии и на високоскоростното механично обработване за бързо изготвяне на прототипи (Rapid Prototyping). Направен е анализ на приложимостта, предимствата и недостатъците на основните за практиката технологии за бързо изработване на физически прототипи.

В глава 6 е развита стратегия за прилагане на виртуалното и физическото прототипиране за ефективно развитие на сложни системи и е разгледано мястото на виртуалните и физическите прототипи в жизнения цикъл на продукта и е предложен нов фрактален подход за проектиране.

Развитие на хибриден метод за предварителна оценка на нивото на доверие в резултатите от виртуално прототипиране (ВП) на мултифизични процеси чрез физическо тестване – „черна кутия/бяла кутия“ е развита в глава 7 и са предложени три подхода за реализацията му.

В глава 8 е изследван виртуалният прототип като основа за дигитален близък. Анализирана е концепцията за дигитален близък и предложен нов метод за интегрирано виртуално проектиране на сложни изделия чрез нов „LL“ метод и в среда на платформата „Индустрия 4.0“.

Глава 9 представлява апробация на приложимостта на виртуалното и физическото прототипиране в практиката на проектиране.

Десета глава представлява анализ на приложимостта на виртуалните технологии и физическото материализиране за импланти в медицината. Анализирани са технологичните методи за производство на импланти. Изследвани са методи за 3D реконструкция и моделиране на базата на томографски данни при създаване на персонализирани импланти и са разработени няколко методики за изработка на персонализирани импланти.

2. СЪСТОЯНИЕ НА ИЗСЛЕДВАНАТА ОБЛАСТ

Виртуалният (дигиталният) продуктов модел е съвкупност от примерни модели, които представляват напълно точен образ на разработвания обект, т.е. неговата форма, геометрия, кинематика, повърхности, материални характеристики на елементите и много други свойства и параметри на продукта. Тези примерни компютърни модели се наричат виртуален модел на физическия продукт и се съхраняват в графична база данни композитно или структурирано, като част от проектната, организационната или производствената структура. Изследването на поведението с тези модели се дефинира като прототипиране.

2.1.1. Виртуално прототипиране

Тук се представя терминологията, която се използва в изследванията на виртуални среди и виртуални прототипи и за процесната рамка на прототипирането.

Дефиницията, използвана в тази работа е най-близко до дефиницията на (Wang, 2002): „Виртуален прототип е компютърна симулация на физически продукт, който може да бъде представен, анализиран и тестван за различни аспекти на жизнения цикъл като проектиране / инженеринг, производство, сервиз и рециклиране максимално близо до истински физически обект. Ако конвенционалната симулация се използва, за да се анализира конкретен аспект на продукта (Thompson, 2000), то ВП имат по-голям обхват, тъй

като се разглеждат различни свързани аспекти на поведението продукта, за да замени физическите прототипи. Следователно виртуалното прототипиране е технически нова област на свързани задачи, отколкото индивидуална симулация. За валидиране на ВП се използват различни подходи, като най-често се прилагат тестване с физически прототипи.

2.1.2. Физическо прототипиране

Физическият прототип е обект от физическия (реалния) свят (Ulrich & Eppinger, 2005) и може да бъде създаден от същите или различни материали, като функционално в определена степен има геометрията, свойствата и поведението на бъдещия реален обект (продукт). Физическите прототипи (PP) се използват за различни цели – както за валидиране на ВП, така и за по близки до финалния си вид продуктови тестове или сертификации. Класификациите на физическите прототипи могат да бъдат в няколко направления:

- изграждане на физическия прототип по напълно различна технология, най-често адитивна (3D принтинг) и от различен материал поради различната технология;
- изграждане на физическия прототип по различна технология, най-често адитивна, но от идентични материали – използва се при компоненти, изискващи формообразуващи инструменти и позволява функционални тестове и анализ на поведението;
- изграждане на физическия прототип по подобна на финалната технология и от идентичен материал, но с универсални методи и без специализирана екипировка.

2.1.3. РАЗВИТИЕ НА НОВИ ПРОДУКТИ С МЕТОДИТЕ НА ВИРТУАЛНОТО ИНЖЕНЕРСТВО

Тъй като процесите на виртуално изграждане и валидиране могат да се извършват паралелно, броят на итерациите за подобряване на параметрите е по-голям, но времето за осъществяване на една итерация е значително по-кратко. В резултат на това пътят за разработване на продукта е редуциран, времето за отстраняване на проблеми се намалява и има потенциал да се спести съществено от обема на разходите за разработка и разходи от крайния резултат (Фигура 2-32).

Въпреки че има видима тенденция към широко навлизане на методите на виртуалното инженерство и в частност на виртуалното прототипиране, в индустрията се наблюдава известен консерватизъм, породен от липсата на наложени стратегии, методи и подходи по отношение на изграждане на технически концепции, структуриране на продуктите и следващите от това интерфейсни дефиниции как да се избере технологично решение за конкретен набор от задачи за виртуалното и физическото прототипиране в даден продуктов и технологичен контекст.



Фигура 2-32: “Дизайн–тест” с използване на виртуалното инженерство (according to automotive engineering), (Ovtcharova, 2010)

2.16. ОБЩИ ИЗВОДИ ОТ ГЛАВА 2

- От разгледаните стратегии и методи на проектиране ясно личи последователно-итеративният итеративен характер на процеса.
- Един от най-отговорните етапи в процеса на проектиране е създаването на структурата на продукта, а коригирането в по-късен етап е свързано със значителни разходи.
- В съвременния динамичен пазар се предлагат комплексни продукти, които трябва да отчитат непрекъснато нарастващите потребителски изисквания. Тук липсва системна методологична база за ефективно оценяване.
- Логическата структура на методологията за разработване на продукти и съществуващите проектантски методи са предимно с последователна структура и са все по-малко ефективни;
- Посочени са предимствата и недостатъците на виртуалните и физическите прототипи и необходимостта от по-подробен анализ на технологичните им възможности, както и потребността от създаването на методи и подходи за ефективното им приложение.

Един от основните инструментариуми при развитие на нови продукти е прилагането на виртуалното прототипиране, но от направения анализ може да се заключи, че липсват адекватни методи и подходи за използването му при решаването на важни за ефективно и ефикасно проектиране на задачи, свързани с изследване, валидиране и оптимизация на:

- На обекти със сложна структура и комплексна компоновка, непозволяващи ефективно физическо прототипиране.
- На обекти с мултифизични ефекти, които силно затрудняват моделирането и изследването.
- На обекти, натоварвани при специфични условия на динамика, като тестове при удар, при изпускане и др. непозволяващи реални тестове, дори и при наличие на физически прототипи.
- Адаптация на дизайна на проектирания продукт максимално добре към производствените процеси чрез симулация, за постигане на технологична конструкция.

Прилагането на физически прототип (ФП) е основен инструмент за тестване и валидиране на технически и функционални решения при развитие на нови продукти:

- Най-често се използват технологиите на адитивното производство, известни като методи за бързо производство (Rapid Prototyping – RP), като приложимостта на различните технологии не е достатъчно изследвана в литературата.
- Липсват ефективни подходи за оценяване на мястото и степента на прилагане на RP в целия цикъл на развитие.
- Необходимо е да се развият методи и подходи за обратно интегриране на оптимизираната геометрия в резултат от симулациите обратно в CAD средата.
- Съчетаването на виртуалните технологии с методите на адитивните технологии (RP) се очертава като обещаващ инструментариум за създаване и изграждане на медицински импланти, включително с персонализация.
- В литературата и в практиката липсват добре настроени и валидирани методи за цялостно изграждане на импланти във виртуална среда с бърза материализация.

Проектантските инструменти се развиват по-бързо от методите, организационните стратегии и инженерната експертиза. Наблюдават се следните особености на средата и условията на развитие на нови продукти:

- Все по-важно за компаниите става притежанието на права върху продукта, отколкото вътрешните възможности за производство на компонентно ниво.
- Проектантите на продукти се трансформират в системни интегратори, а поддоставчиците се специализират на технологично и процесно ниво и се отдалечават от крайния продукт.
- Последица от това развитие е необходимостта от разработването, валидирането и имплементирането на нови, иновативни, ефективни и ефикасни методи за проектиране на нови продукти.

Новите реалности в свързания свят дефинират нова парадигма на проектантския процес и поставят принципно нови предизвикателства за намиране на ефективни начини (методи), средства (подходи) за ефективен баланс между изискванията на пазарите и технологичното развитие и изоставащите методи и средства за управление на иновационните процеси, спрямо ресурсите които се мобилизират в този процес.

ЦЕЛ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

Целта на дисертационния труд е създаване, изследване и апробиране на нови стратегии, методи и подходи за виртуално и физическо прототипиране при концепиране, вариантно и персонализирано проектиране и конструиране на иновативни продукти за намаляване на техническите, технологичните и инвестиционните рискове, разходите и времето за индустриализация.

ЗАДАЧИ:

За изпълнение на поставените в дисертационния труд цел са дефинирани следните основни задачи:

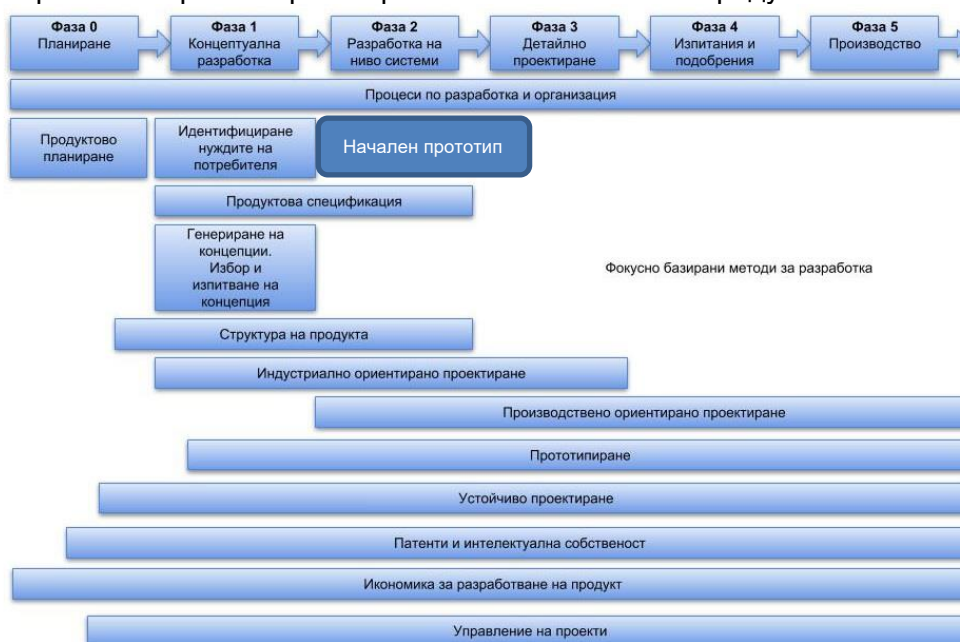
1. Да се развият иновативни стратегии, методи и подходи за бързо специфициране и концепиране на комплексни архитектури на иновативни продукти с намалена итеративност, включително на модулен принцип, при балансиране на изискванията на клиентите спрямо функционалност и вариантност.
2. Създаване на подход за ефективно разпределение на функции между механични, електронни, сензорни и софтуерни системи за постигане на оптимална надеждност и най-вече ниска себестойност при композиционно използване на налични комерсиални компоненти.
3. Да се развият иновативни стратегии, методи и подходи за виртуално прототипиране, позволяващи най-точно и адекватно моделиране, симулиране и изследване на поведението на разработвания обект на възможно най-ранен етап на сложни вариантни и модулни структури, както и за развитието на подобрени варианти (оптимизация).
4. Да се разработят, валидират и апробират методи и подходи за намаляване на времето за развитие и тестване в процеса, като се намира най-ефективният баланс с изготвянето на виртуални и физически прототипи, отчитайки комплексността и различното ниво на технологична готовност на отделните системи и елементи от общата архитектура.
5. Да се изследват възможностите за еволюция на виртуалния прототип към дигитален близък, позволяваща най-точно и адекватно моделиране, симулиране и изследване на поведението в работни условия на разработвания продукт и в следствие в експлоатационния му период, за изграждане на кибер-физични система за целия жизнен цикъл.
6. Да се предложат и тестват нови методи и подходи за адаптация и фина настройка на виртуалните прототипи чрез физическо прототипиране и тестване на специфични аспекти на поведението, чрез идентификация и адаптация на конкретни физични свойства или величини, за повишаване на точността и ефективността им.
7. Да се апробират и тестват разработените методи и подходи в индустриални проекти за приложимост на създадените теоретична и методологична бази и оценяване на ефективността и ефикасността им в променената парадигма на проектантския процес.
8. Да се предложат и реализират иновативни методи за прилагане на виртуалните технологии и бързото физическо прототипиране при персонализация в сферата на здравеопазването и имплантологията.

3. РАЗВИТИЕ НА ИНОВАТИВНИ ПРОЕКТНИ МЕТОДИ И ПОДХОДИ ПРИ ВИРТУАЛИЗАЦИЯ НА ПРОЦЕСА НА СЪЗДАВАНЕ НА НОВИ ПРОДУКТИ

Инженерното, технологичното и организационното предизвикателства (компетентностни), за да се организира планирането, изпълнението и контрола на комплексни проекти за развитие на нови продукти, трябва дефинитивно да бъдат включени и инструментите за интегрирано развитие на продуктите, за управление на проекти, за управление на разходите и необходимата организационна стратегия. Само по този начин е възможно да се реализира добре синхронизирана, ефективна и едновременно работа на отделните екипи в цялостния процес на разработването на продукта.

3.1. ВЪЗМОЖНОСТИ ЗА ПРИЛАГАНЕ НА НОВИ ВИРТУАЛНИ ИНСТРУМЕНТИ В ПРОЦЕСИТЕ ЗА РАЗРАБОТВАНЕ НА ИНОВАТИВНИ ПРОДУКТИ

Много от продуктите и машините, които са налични днес, не са съществували до скоро, така че предишен опит на проектантите при тези задачи може да бъде прилаган в ограничен обем. Затова са необходими нови, по-систематично ориентирани подходи, за да се осигури бързо и без грешки проектиране на все по-сложни продукти.



Фигура 3-4: Основни дейности при разработване на продукт и възможни методи за разработка

Един от най-важните аспекти за подобряване процеса на проектиране е разработването на нови методи за дизайн, които да отговарят на новите изисквания и новите технологии и възможности за използването им.

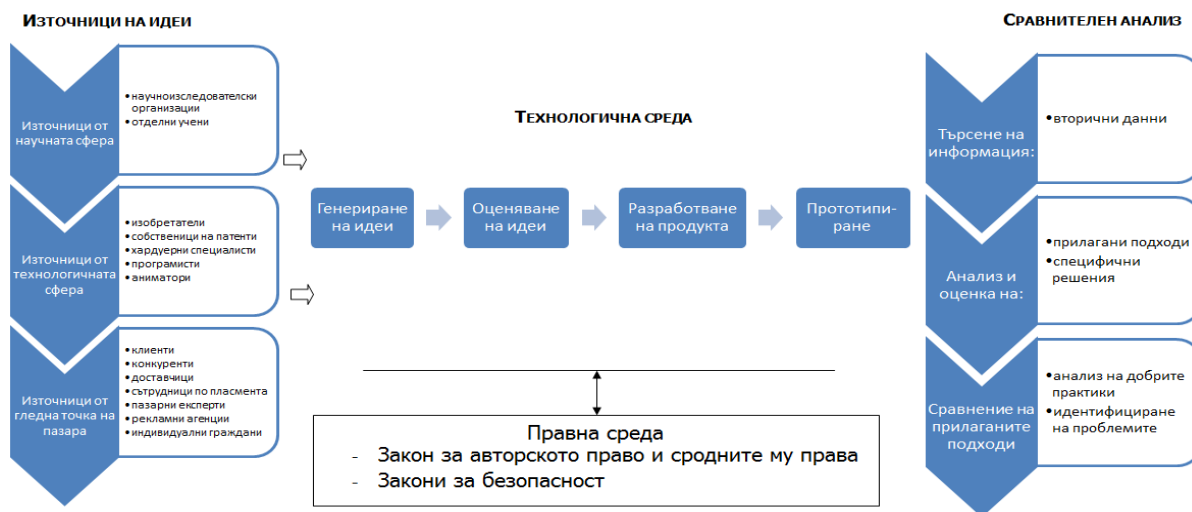
Технологиите, методите и подходите при развитие на иновации в повечето отрасли претърпяват изменения. Итеративните многостъпкови подходи са с ясно изразени последователни стъпки, които са характерни за днешните методи за проектиране (вкл. Стандарти от нивото и мащаба на VDI). Все повече се работи по това, голяма част от процесите да се развиват паралелно. Фигура 3-4 изобразява основните дейности на процеса на разработване на продукта. (Ulrich & Eppinger, 2008)

Прототипите се използват за подпомагане на комуникацията и интеграцията на проектантите и на заинтересованите страни, включително при специфицирането на продуктите като връзка с клиентите (Фигура 3-4). Те се използват и като инструменти за обучение по време на процеса на разработване на продукта. От гледна точка на интеграцията, прототипите дават възможност на различните членове на проектантския екип да се координират помежду си и да се интегрират приетите решения до всички, за да се работи в синхрон и с актуални нива на готовност.

3.2. КОНЦЕПТУАЛНО ИЗГРАЖДАНЕ. ТЕХНИЧЕСКИ СПЕЦИФИКАЦИИ

Моделът на процеса на концепиране (виж Фигура 3-5) представлява обобщен подход за описване на процеса при изграждане на концепция, като се описва и отчита целия процес по разработване, производство и разпространение на нов продукт. Целта е да се направи системен анализ на база на взаимовръзките и взаимоотношенията между отделните елементи, изграждащи модела на продукта и средата за неговото развитие. Генерирането на идеи е ключов компонент в концептуалния модел. Като цяло концептуалният модел изгражда една рамка, фокусирана към различните важни аспекти на отделните елементи на продукта.

Един опит за търсене на кохезия между изискванията на съвременните потребители и динамичното развитие на технологичната среда при развитие на нови продукти чрез средствата на виртуалното инженерство и прототипиране може да се представи като матрична структура по отношение на степента на адекватност и приложимост, като едно доразвитие на интерактивната матрица за развитие на нови продукти (Фигура 3-6).



Фигура 3-5: Модел на процеса на концепиране

Изисквания на потребителите	Висока надеждност	Вариантност	Ниска цена/Ниска цена на притежание	Иновативност/функционалност	Безопасност/Сигурност	Малки серии	Персонализация	Бързо внедряване/Кратък живот
Технологични средства за развитие								
1. Виртуално прототипиране на продукта	VV	VVV	VVV	VV	V	VV	VVV	VVV
2. Виртуална и разширена реалност		VV		VV			VV	
3. Облачни технологии			V					V
4. Мултифизични симулации с МКЕ	VV		VVV	V	VV		VV	VV
5. Адитивни технологии (3D принт) и Бързо физическо прототипиране		V		VV		VVV	VVV	VV
6. Големи обеми данни и анализ		VV	VV	V	V		VVV	V
7. Дигитални близнаци и кибер физични системи	VV	VV	VV	V	VV		V	
8. Експертни системи и изк. интелект	VV		VV	VV	VV		VV	VV

Фигура 3-6: Матрица за адекватност на технологичната среда и нейните инструменти спрямо изискванията на пазара при развитие на нови продукти

Анализът на технологичната среда при развитие на нови продукти чрез средствата на виртуалното инженерство и прототипиране еднозначно показва, че прототипирането става решаващ фактор за успеха на един проект. Особено важно тук е виртуалното прототипиране като инструмент за колкото е възможно по-ранно валидиране на концептуалните, архитектурните, функционалните и техническите решения, виж Фигура 3-7. За разлика от други автори (Wang, 2002), визиращи три или много елементна структура на ВП, тук се внася допълнителен елемент на обособяване на функционалното изследване с ВП (изискващо твърдателни модели) от поведенческото симулиране (например външни товари, температури и др.), изискващи моделиране чрез податливи модели и МКЕ симулации. Съгласно това виждане на автора, ВП притежава свързаност на отделните си елементи с възможност и за елементно оценяване.

ВП играят изключително важна роля и при изследване на взаимовръзката „човек-продукт“. Всеки аспект на участието на човека при експлоатацията и/или поддръжката на едно изделие може да бъде „проверен“ чрез специализирани ВП технологии. Много често се случва именно тези анализи да доведат до възникване на нови изисквания към дизайна, ергономичността и функционалността на продукта: получава се своеобразна обратна връзка – от потребителя към продукта.

ИЗВОДИ

- На базата на анализ на технологичната среда при развитие на нови продукти еднозначно е обосновано, че прототипирането е решаващ фактор за успеха на един проект.
- Особено важно е прилагането на ВП колкото е възможно по-рано в процеса за валидиране на концептуалните, архитектурните, функционалните и техническите решения.
- За разлика от конвенционалната структура на ВП, тук авторът внася допълнителен елемент на обособяване на функционалното изследване с ВП (изискващо твърдотелни модели) от поведенческото симулиране (например външни товари, температури и др.), изискващи моделиране чрез комплексни (мултифизични) модели за симулации с МКЕ, което дефинира ВП като притежаващ допълнително ниво на свързаност на отделните си елементи при запазване на възможността и за елементно оценяване.



Фигура 3-7: Виртуалното прототипиране при развитие на нови продукти

3.3. Иновативни методи и подходи за развитие на продукти. Проектни етапи

В последните години се забелязва, че нарастващото многообразие на продуктите и намаляване на произвежданите обеми от всеки конкретен модел водят до появата на модулни платформи и вариантни системи, различни клиентски конфигурации, специфични изпълнения за различни пазари и много други, което прави продуктите многовариантни и с разклонени структури. От друга страна, животът на продуктите във времето става все по-къс и това налага те да бъдат обновявани поне частично след кратък период, поради изискванията на пазара или нормативно-законови причини. В този аспект разглежданите в глава 2 последователно-итеративни методи и подходи за развитие са адекватни за силно интегрираните и ускорени процеси на развитие, особено при създаване на иновативни продукти.

3.3.1. ПРИМЕР: Дефиниране на фамилия ударно-пробивни ръчни електро инструменти

Проектът цели създаването на иновативна фамилия високопроизводителни ударно-пробивни ръчни електро инструменти (УПРЕИ), с иновативна ударна система, базирана на принципа на контролиран резонанс. Фамилията УПРЕИ, наричани още перфоратори, е предназначена за пробиване, къртене и раздробяване на бетонни, тухлени, каменни и др. стени, плочи, колонии и т.н. посредством свредла, боркорони, шила, длета и пр. инструменти.

Фамилията отчита в максимална степен спецификата на отделните видове процеси (къртене, пробиване, разбиване, разкриване...) и профила на нуждите на клиентите за различни климатични и географски райони, както и по отношение на областта на приложение, производителност, ергономичност, законови регионални изисквания и др. .

ДЕФИНИЦИЯ НА ПРОДУКТА: Ударно-пробивни ръчни електро инструменти (ПЕРФОРАТОРИ)

Описание на продукта: Ръчни устройства за пробиване с удар и за къртене (само удар). Ударните (къртачи) и ударно-пробивните (перфоратори) електроинструменти са широко разпространени в строителството и при ремонтни дейности.

Важно е процесът да се фокусира върху нуждите и изискванията на клиентите още от самото начало на проекта за развитие.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ И СИСТЕМАТИЗАЦИЯ НА НУЖДИТЕ НА КЛИЕНТИТЕ

За да се направи проучване на клиентските нагласи и оценки, е необходимо да се създаде систематизация на целите и задачите пред продукта за стратегията му на развитие. Предложени са следните стъпки за идентификация на нуждите на клиентите:

- Определяне на функционалния обхват на продукта.
- Събиране на сурови данни от различни заинтересовани групи. Интерпретиране..
- Организиране и структуриране на нуждите на клиентите от заинтересованите групи.
- Оценяване на значението на всяка потребност.
- Отразяване на получените знания в процеса на развитие на продукта.
- Непрекъснато усъвършенстване на спецификацията на продукта.

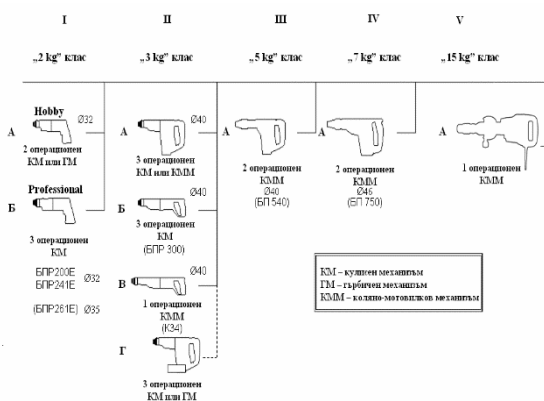
[illegible]

No	Система	Наименование на потребността	Значи- мост
1.	УПРЕИ	Осигурява добра енергия за ударно действие при пробиване и къртене.	1
2.	УПРЕИ	Има ниски вибрации и не уморява след многочасова работа.	1
3.	УПРЕИ	Издържа няколко часа тежка употреба.	2
4.	УПРЕИ	Може да пробива отвори в твърди материали.	2
47	УПРЕИ	Остава удобен когато дълго време е на слънце.	2
48	УПРЕИ	Лесен е за управление при пробиване с удар.	1
49	УПРЕИ	Лесен е за управление при къртене.	1
50	УПРЕИ	С приятен звук е когато се използва.	2

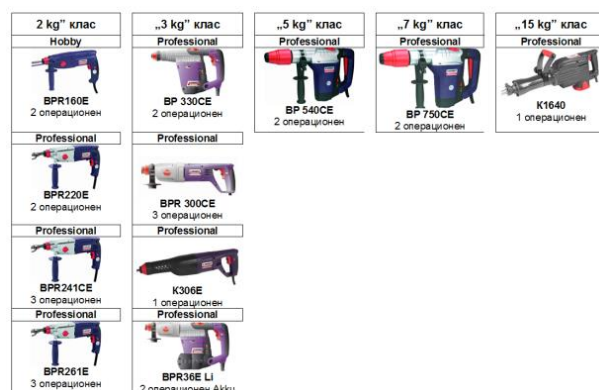
Фамилната архитектура е разработена с отчитане на максимално покриване на

Наименование на		Дименсия		Параметър/функция	
		[kg]		Тегло	
		[W]		Номинална	мощност
		[W]		Изходяща	
		[min ⁻¹]		На празен ход	Обороти на вретено
		[min ⁻¹]		Ном. мощност	
		R или L/R		Ревърс	
		[min ⁻¹]		На празен ход	Брой удари
		[min ⁻¹]		Ном. мощност	
		[N.m]			Въртящ момент
		[J]		Нормална	Енергия на удара
		-		Sds plus/sds max	Тръскащ на свредлото
		[mm]		Стомана Ø	Пробиване
		[mm]		Дърво Ø	
		[mm]		Спирални средна	Пробиване в бетон.
		[mm]		Боркорони Ø	Диапазон
		[mm]		Преходни средна	Диапазон
		[mm/min]		Средно Ø	Бетон.
		[cm ³ /min]		Средна	Производствен
		[kg/h]		Производителност	Къртене
				Константна	
				Регулируема	
				Плавен пуск	Електроника
				Индикация на	
				Защита от	
				Прегреване	
				Изключвател	Четки
				Индикатор за смяна	
				Моноблок напълно	
				Моноблок частично	Конструкция
				Моноблок с чепилка	
				Моноблок еласт.	
				Окачен за черупките	Виброзащита
				Виброгасяща ръкохватка	
				Пробиване	
				Ударно пробиване	Функции
				Къртене	
					Приоритет

ДЕФИНИРАНЕ НА ФАМИЛНА АРХИТЕКТУРА И ОСНОВНИ ТЕХНИЧЕСКИ СПЕЦИФИКАЦИИ



Фигура 3-10: Разработена гама ударни и ударно-пробивни машини с пневматично-вакуумни ударни механизми



Фигура 3-11: Фамилия ударни и ударно-пробивни машини с пневматично-вакуумни ударни механизми – финална структура и архитектура

Структурата е матрична и по хоризонтала се развива по теглови класове 2, 3, 5, 7 и 15 килограма. Това структуриране е определено от пазарните традиции за обособяване на УПРЕИ. По вертикална ос е развито структуриране по функционалност, концептуални особености (разполагане на задвижването) и по източник на задвижването – кабелен или акумулаторен.

Основни предимства на така разработената фамилия са:

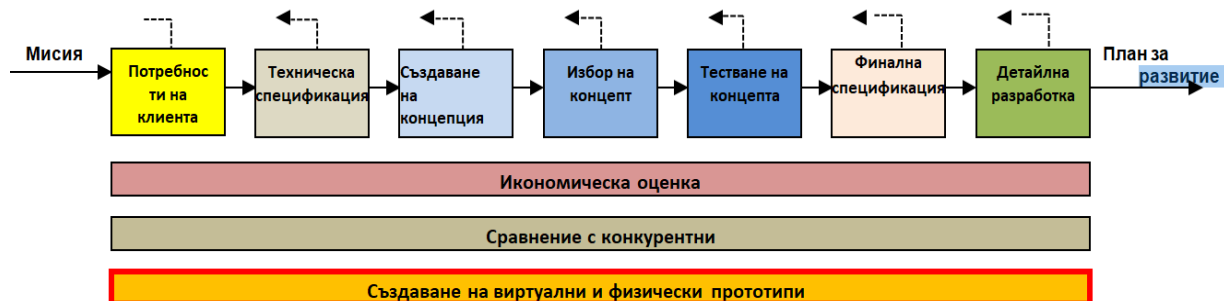
- Иновативна резонансна ударна механична/пневматично вакуумна система – новост на световния пазар.
- Оптимален обхват на фамилията като област и типоразмерен ред, позволяваща гъвкавост, максимално удовлетворяване на потребителските нужди и ефективно производство.
- Тук основните различия се състоят в използването в максимално ранен етап на виртуални прототипи. Това важи в много висока степен за развитието на иновативна резонансна ударна система. Това е нова концепция, базирана на добре познат физически ефект, който обаче обикновено в техниката се счита за вреден, а тук се предлага резонансът да бъде използван за повишаване на ефективността на ударната система. Липсата на достатъчно информация и експериментални изследвания налага използването на ВП като основен инструмент за изследване и концептуално развитие на резонансна ударна система, както и за създаване на архитектурата на фамилията като функция именно на тази система и свързаната с нея електронна система за управление на задвижването за поддържане на резонансен режим. Тези етапи ще бъдат разгледани детайлно като апробация на подхода с максимално ранно и мащабно прилагане на ВП в глава 9.

ИЗВОДИ

- Поради необходимостта от висока степен на интеграция и тясно взаимодействие между елементите на отделните системи при специфицирането и концепирането на мехатронни продукти, е доказана необходимостта от прилагане на методите на виртуалното инженерство от най-ранен етап на развитието.
- На основата на функциите за качество (QFD) е предложен подход за идентификация на потребностите на потребителите (с използване на прототипи) и трансформиране на клиентските изисквания в технически спецификации.
- На примера на развита концепция на фамилия ударно-пробивни машини е доказана ефективността на горния подход, чрез постигане на добро фамилно структуриране, като членове се дефинират по такъв начин, че функционално-стойностното препокриване между членовете да са минимални, като нивото на унификация на всички членове да бъде максимално високо.
- Предложен е оригинален принцип на специфичен квазирезонансен режим на работа на пневматично-вакуумен механизъм с повишена ефективност по отношение на енергия на удара и конструктивно решение, защитено със световен патент.

3.4. ИНОВАТИВЕН ПОДХОД ЗА КОНЦЕПИРАНЕ, АРХИТЕКТУРНО ИЗГРАЖДАНЕ И РАЗВИТИЕ НА КОМПЛЕКСНИ ПРОДУКТИ В РАЗПРЕДЕЛЕНА ВИРТУАЛНА СРЕДА

Основна тенденция за развитие на комплексни продукти е преходът от системно проектиране на функционално и предметно ниво към модулно изграждане на сложни системи с минимални инвестиции в нови елементи. Същевременно с навлизане на електронно сензорни системи в тези продукти се налага включването в процеса на развитие и на нови участници – специалисти по електроника и софтуер.



Фигура 3-14: Концептуално развитие. Последователно-итеративен метод за разработка на изделие

Тези предизвикателства изискват нова методология и подходи при концепиране, архитектурно изграждане и особено при валидиране на комплексни продукти в новата информационна, технологична, организационна и разпределена работна среда.

В този аспект разгледаните по-горе последователно-итеративни методи и подходи за развитие не са напълно адекватни на силно структурираните и ускорени процеси на развитие, особено при създаване на по-комплексни продукти. (Фигура 3-14)

Един от подходите за проектиране на сложни системи е т. нар. "V" подход за декомпозиране и последващо интегриране в процеса на проектиране. (Didier, et al., 2017) (VDI2206, 2004) Той обаче не отчита в необходимата степен и форма на свързаност взаимното влияние на отделните възли при многовариантно изграждане и при модулни системи, като по такъв начин не е достатъчно ефективен, доколкото не изследва вариантно изграждане и валидиране в свързаност.

МАТРИЦАТА ЗА СТРУКТУРНА СВЪРЗАНОСТ (DSM)

DSM е общ метод за представяне и анализ на модели на системи в различни области на приложение. DSM е квадратна матрица (т.е. има равен брой редове и колони), която показва връзките между елементите в системата. Има три основни градивни елемента за описване на връзката между елементите на системата: паралелни (или едновременно), последователни (или зависими) и свързани (или взаимозависими).

В сравнение с други методи за моделиране на системната структура, DSM има две основни предимства:

- Осигурява прост и компактен начин за представяне на сложни структури.
- DSM позволява редица анализи, като клъстеризиране (за улесняване на изграждане на модулност) и последователност (за свеждане до минимум на разходите и графика на риска в процесите) на изграждането.

3.5. КЛЪСТЕРИРАНЕ (ИЗГРАЖДАНЕ НА МОДУЛИ) НА БАЗА НА DSM.

Когато DSM елементите представляват компонентите на дизайна на продукта (т.е. компонентно базиран DSM), целта на манипулирането на матрицата се променя значително от тази на алгоритмите за последователност. Новата цел се определя от намиране на подгрупи от елементи на DSM (т.е. клъстери или модули), които са взаимно изключващи се или минимално взаимодействащи си подмножества, т.е. клъстери като групи от елементи, които са взаимосвързани помежду си в значителна степен, докато са малко свързани с останалата част от системата. Този процес се нарича „Групиране“ или модулизиране. (Sharman & Yassine, 2004)

3.5.1. ПРИМЕР: DSM матрица за концептуално и структурно изграждане на мотоцикар високоповдигач

Концепция. Основни компоненти на изделието

Важен етап от развитието на един продукт е обособяването на неговите основни възли. То е пряко свързано и с концепцията на самата конструкция. Обособяването на основните компоненти на изделието за разглеждания пример е направено като са развити 21 функционални конструктивни групи и системи. Групирането за клъстеризиране на DSM в този

проект дава възможност да се изградят оптималните структурни конфигурации въз основа на степента на взаимодействие между елементите на цялата машина. Поради спецификата на свързаността в един комплексен продукт, какъвто например е подемно -транспортната техника, тук се предлага специфично дефиниране на връзките като елементи на свързаност в DSM матрицата, като връзките са описани както следва:

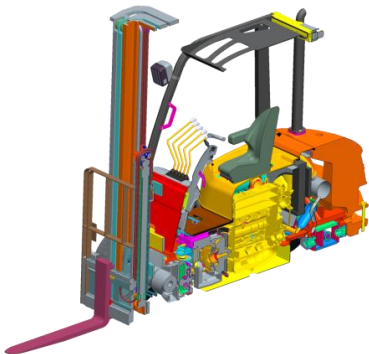
S - Връзка на подчиненост от ред към колона и от колона към ред. При връзка от този тип промяната в единия елемент би довела до задължителна промяна в подчинения елемент.

O - Опционална връзка от ред към колона (над диагонала) и от колона към ред (под диагонала). При връзка от този тип, промяната в единия елемент НЕ би довела до задължителна промяна в свързания елемент.

X - Взаимосвързан тип връзка от ред към колона (над диагонала) и от колона към ред (под диагонала). При връзка от този тип промяната в единия елемент би довела до задължителна насрещна промяна във взаимосвързания елемент.

Тези три дефиниции на свързаност добавят нов елемент при изграждане на DSF матрицата и позволяват по -адекватно и лесно обособяване на модулни структури.

Таблица 3-4: DSM Матрица на свързаност



	1. Шаси	2. Противотежест	3. Преден мост	4. Спирачна система	5. Заден мост	6. съединител	7. Скоростна кутия	8. Двигател	9. Всмукателна система	10. Изпускателна система	11. Охладителна система	12. Кормилна система	13. Хидравлична система	14. Резервоар масло	15. Резервоар гориво	16. Повдигателна уредба	17. Карета и приспособления	18. Колела и гуми	19. Електр. с-ма за	20. Кабина и седалка	21. Осветление и
1. Шаси	S																				
2. Противотежест		S																			
3. Преден мост	O		S				X	O										S			
4. Спирачна система			O	S								O								O	
5. Заден мост	O				S							X	O					S			
6. съединител						S															
7. Скоростна кутия			X	X			X			S		O									
8. Двигател		O			X	X		O	O	O		O			O			O			
9. Всмукателна система								O	S											O	
10. Изпускателна система	O	O								S										O	
11. Охладителна система	O	O					X														
12. Кормилна система				X																X	
13. Хидравлична система						O															
14. Резервоар масло	O											O	O	S		S					
15. Резервоар гориво	O																				
16. Повдигателна уредба	O	X										X					X	S			
17. Карета и приспособления																X		S			
18. Колела и гуми	O	O	O	O																	
19. Електронна с-ма за у-е							O				O	O								O	
20. Кабина и седалка	X		O								O									O	
21. Осветление и сигнал																			O		

Ключовият елемент при този подход на развитие е чрез преминаване от възли към обособяване на модули, при спазване на предложените по-горе правила. С помощта на DSF матрицата е дефинирана свързаността на отделните групи и системи. Те са групирани в съседство според функционалната си свързаност и автономност в 7 основни модула (кълъстери), показани на Фигура 3-19.

ОФОРМЯНЕТО НА МОДУЛИТЕ В КОНСТРУКТИВНИ ГРУПИ Е НЕОБХОДИМО ДА СЛЕДВА СЛЕДНИТЕ ОСНОВНИ ПРИНЦИПИ (СИСТЕМАТИЗИРАНИ ОТ АВТОРА НА БАЗА НА ВНЕДРЕНИ В ПРАКТИКАТА РЕШЕНИЯ):

ДЕФИНИРАНЕ НА ИНТЕРФЕЙСИ МЕЖДУ МОДУЛИТЕ

Концептуалното изграждане на примера на мотокар, може да се твърди, че така развитата концепция ползва високо ниво на модулност на изграждането, при запазване на унификация на възли и елементи в съответния обособен модул на системата, както и между тях. Новостта при тази стратегия на проектиране се състои в това, че от системно

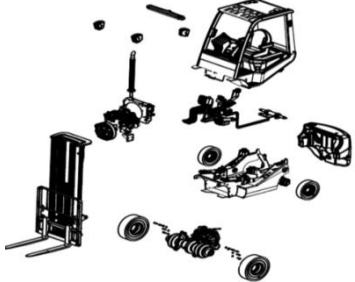
проектиране, както са обособени възлите в таблицата на свързаност, се преминава към нова архитектура – именно на клъстеризация или модулно проектиране. Композирането на модули в по-големи единици позволява описания за придвижване нагоре с едно и също ниво на абстракция.

ПРИМЕРНО РЕШЕНИЕ

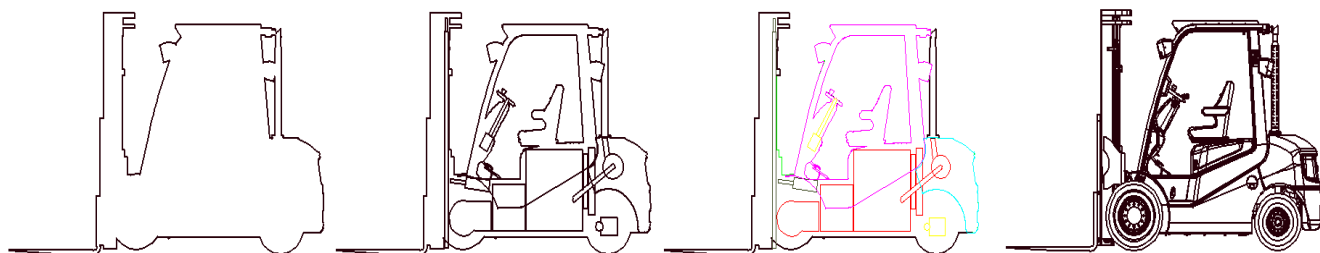
За илюстрация е използван пример от работата по проект за фирмата NEXEN Liftruck от практиката на автора. Фигура 3-20 показва архитектурата на системите в NEXEN FD25, изброени във Фигура 3-19 като DSM матрица на свързаност, показани с индекси от M1 до M7.

Някои от системите са физически разпределени в различни части на мотокара, свързан с интерфейси като хидравлични маркучи, електрически проводници, задвижващи съединители и др.

Фигура 3-19: DMS матрица на свързаност

	1.Шаси	14.Резервоар масло	15.Резервоар гориво	2.Противотежест	5.Заден мост	18.Колела и гуми	3.Преден мост	4.Спирачна система	6.Съединител	7.Скоростна кутия	13.Хидравлична	8.Двигател	9.Всмукателна	10.Изпускателна	11.Охладителна	16.Повдигателна	17.Карета и	19.Електронна с-ма	20.Кабина и	12.Кормилна	21.Осветление и	МОДУЛИ
1.Шаси	■	■																				M1
14.Резервоар масло		■																				
15.Резервоар гориво			■																			
2.Противотежест				■																		M2
5.Заден мост					■																	
18.Колела и гуми						■																
3.Преден мост							■															M3
4.Спирачна система								■														
6.Съединител									■													M4
7.Скоростна кутия										■												
13.Хидравлична система											■											
8.Двигател												■										
9.Всмукателна система													■									
10.Изпускателна система														■								
11.Охладителна система															■							M5
16.Повдигателна уредба																■						
17.Карета и приспособления																	■					6
19.Електронна с-ма за у-е																		■				
20.Кабина и седалка																			■			
12.Кормилна система																				■		
21.Осветление и сигнал.																					■	M7

В тази методология имаме съществена разлика спрямо системното проектиране, базирано на обособяване на отделни системи – например хидравлична система, кормилна система, трансмисия и т.н.



Фигура 3-20: Архитектура на системите в NEXEN FD25

Ляво: структура на системата на системно ниво, показващи отделните системи на машината и отношенията между тях. Дясно: структура обособена на модули на представя машината изградена от модули и отношения между системите и модулите

			МЕХАНИЧНА СТРУКТУРА	КИНЕМАТИКА И ЗАДВИЖВАНИЯ	ЕЛЕКТРИЧЕСКА СИСТЕМА	ЕЛЕКТРОННА СИСТЕМА	СЕНЗОРИ И КОМУНИКАЦИЯ	СОФТУЕРНА СИСТЕМА И ПРИЛОЖЕНИЯ	ХИДРАВЛИЧНА, ЛР, ФЛУИДНИ С-МИ	ОПТИКА И ДР. СИСТЕМИ
Мощност	Номинална	[W]								
	Изходяща	[W]								
Обороти на въртене	На празен ход	[min ⁻¹]								
	Ном. мощност	[min ⁻¹]								
	Ревърс	R, L/R								
Брой удари	На празен ход	[min ⁻¹]								
	Ном. мощност	[min ⁻¹]								
Въртящ момент		[N.m]								
Енергия на удара	Нормална	[J]								
Присъединяване	sds plus/sds max	-								
Пробиване	Стелана Ø	[mm]								
	Дърво Ø	[mm]								
Пробиване в бетон	Средна Ø	[mm]								
Диапазон	Боркорони Ø	[mm]								
	Проход средна Ø	[mm]								
Пробиване в бетон	Средна Ø	[mm/min]								
	Средна	[cm ² /min]								
Къртене	Производителност (широ)	[kg/h]								
	Константна									
	Регулируема									
Електроника	Плавен пуск									
	Индикация на режима									
	Защита от претоварване									
Конструкция	Напр. мотор									
	Моноблок с черупки									
Виброзащита	Моноблок еластично окачен									
	Виброгасяща ръкохватка									
Функции	Пробиване									
	Ударно пробиване Къртене									

Фигура 3-22: Матричен подход за дефиниране на функционалната архитектура на продукта

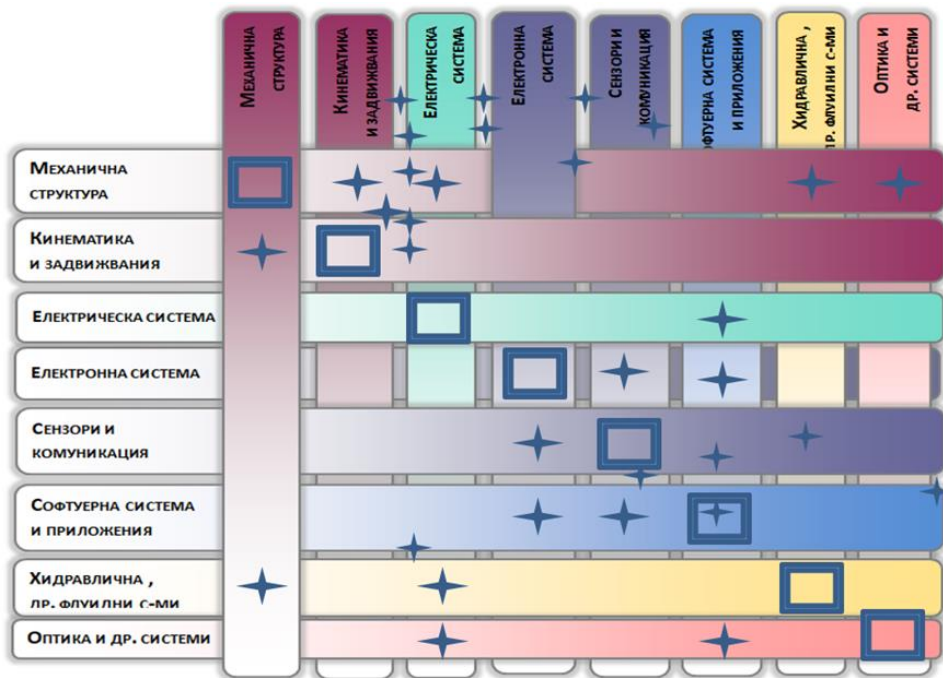
3.6. МАТРИЧЕН ПОДХОД ЗА ДЕФИНИРАНЕ НА ФУНКЦИОНАЛНАТА АРХИТЕКТУРА НА ПРОДУКТА ЗА РАЗПРЕДЕЛЯНЕ НА НЕОБХОДИМИТЕ ФУНКЦИИ МЕЖДУ РАЗЛИЧНИТЕ ОСНОВНИ СИСТЕМИ

Процесите на развитие са с нарастваща сложност и в архитектурно отношение се търсят все по-фрагментирани и структурирани концепции и архитектури, като много често фрагментирането се осъществява както на функционално ниво – обособяват се елементи, възли или модули с ясно дефинирани интерфейси или се обособяват отделните етапи и нива на технологична готовност в процеса на развитие.

По-долу е предложен един матричен подход за дефиниране на функционалната архитектура на продукта с цел да се разпределят необходимите функции между различните основни системи (Фигура 3-22, Фигура 3-23)

ИЗВОДИ ОТ ГЛАВА 3

- Развит е подход за трансформиране на клиентските потребности в технически спецификации при проектиране на комплексни изделия.
- Изпълнението на множество и в голяма степен противоречащи си изисквания, на които трябва да отговарят изследваните модулни структури, определя като належащо използването на нов нетрадиционен интердисциплинарен подход при тяхното проектиране.
- Развит е подход за автоматизирано проектиране на сложни машиностроителни изделия на модулен принцип чрез технологиите на виртуалното инженерство, чрез



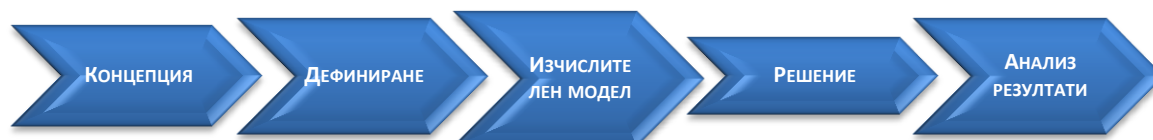
Фигура 3-23: Матричен подход за дефиниране на интерфейсната архитектура на продукта

подходящото за целта разделяне на основни компоненти на системата с прилагане на DSM модифициран метод.

- Предложен е матричен подход за дефиниране на функционалната архитектура на продукта за разпределяне на необходимите функции между различните основни системи в три стъпки в три под-матрици:
 - Формиране на функционалната архитектура на продукта с цел да се разпределят необходимите функции между различните основни системи – механична, електрическа, електронна и др.
 - Изгражда се в матричен вид интерфейсната архитектура на продукта на основата на формираната функционална архитектура, като се определят непроменяеми или „твърди“ интерфейсни дефиниции.
 - В матричен вид се определя и „ниво на технологична готовност“ на всеки от елементите на функционална архитектура с твърдо дефинирани интерфейсни дефиниции.
- Този подход дава възможност да се развиват паралелно отделните системи или елементи с различно ниво на технологична готовност, на основата на непроменяеми интерфейсни дефиниции.

4. АНАЛИЗ НА ПРИЛОЖИМОСТТА НА СИМУЛАЦИОННИТЕ МОДЕЛИ И АНАЛИЗИТЕ КАТО ОСНОВЕН ЕЛЕМЕНТ НА ВИРТУАЛНО ПРОТОТИПИРАНЕ

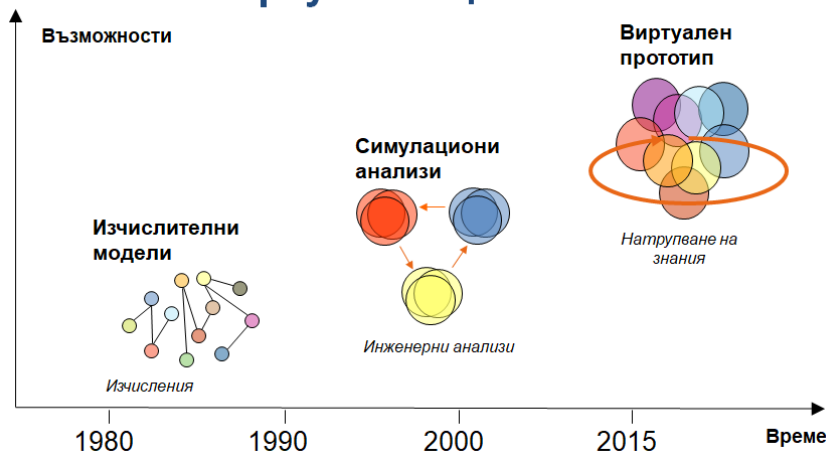
Инженерният анализ е научен аналитичен метод, основан на декомпозиране на системата до ниво на функция или механизъм с цел анализ и оценка на компонентите в съответствие с основните физични принципи и природни закони. Провеждането на инженерен анализ следва основни видове дейности, показани графично на Фигура 4-1.



Фигура 4-1: Основни дейности при инженерен анализ – база за виртуален прототип

ВП представляват взаимосвързани симулационни модели, изградени върху обща 3D геометрия, гранични условия и материални модели за извършване на сложни изследвания на продукта в „дигитална среда“, симулираща реалните условия на експлоатация при взаимосвързани физични процеси. Дефиниция на изчислителен модел, симулационен модел/инженерен анализ и виртуален прототип е посочена на Фигура 4-2.

Нива на виртуализация



Фигура 4-2: Нива на виртуализация през годините

4.3. ПРИЛОЖИМОСТ ПРИ СПЕЦИФИЧНИ СТРУКТУРНИ АНАЛИЗИ (ЗАДАЧИ ЗА ДЕФОРМИРУЕМО ТВЪРДО ТЯЛО)

4.3.5. Структурни експлицитни анализи на ударни въздействия

Разгледаните досега анализи ползват основно имплицитни подходи, главно поради продължителността във времето на симулирания физичен процес (виж Фигура 4-13). Експлицитните подходи са по-подходящи при следните случаи:

- Бързо протичащи процеси, поради спецификата им, описана по-горе, намаляваща значително времето за изчисление.
- Силно нелинеен характер на изследвания процес.
- Затруднения при привеждане на задачата чрез имплицитен подход.

Характерното за експлицитния подход е, че резултатите, които се получават ще бъдат точни, ако стъпките са достатъчно малки. Недостатъкът на брой стъпки води до отклонение от правилното решение, но увеличаването им увеличава и времето за решение. Така се търси максималният интервал време между две стъпки, при който ще се постигне устойчиво решение. Той се определя според необходимото условие на Courant–Friedrichs–Lewy (CFL) за привеждане на частни диференциални уравнения, което в едномерен вид се изписва като:

$$C = \frac{c * \Delta t_{max}}{\Delta x} \leq C_{max}, \text{ известно като число на Courant.}$$

Това условие означава, че за един интервал Δt_{max} , разстоянието, изминато от най-бързата вълна на разпространение в модела ($c * \Delta t_{max}$) трябва да бъде по-малко C_{max} пъти от най-малкия размер на елемент в това направление Δx . При експлицитни анализи $C_{max} = 1$.

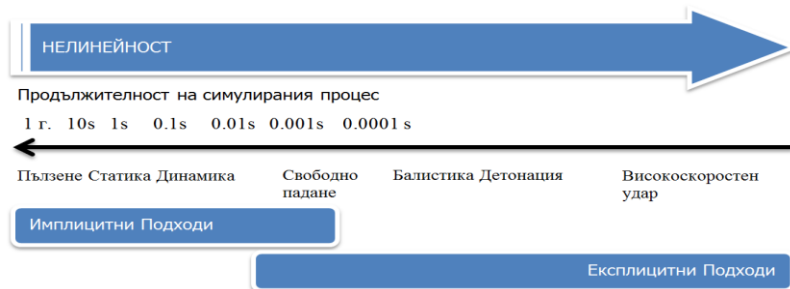
Например, при анализ на стоманена конструкция, имаща минимална характерна дължина на елемент от 5mm, препоръчителната максимална стойност за времевия интервал е 10^{-3} ms. (Roth, et al., 2002)

4.4. МЕХАНИКА НА НЕДЕФОРМИРУЕМИ ТВЪРДИ ТЕЛА

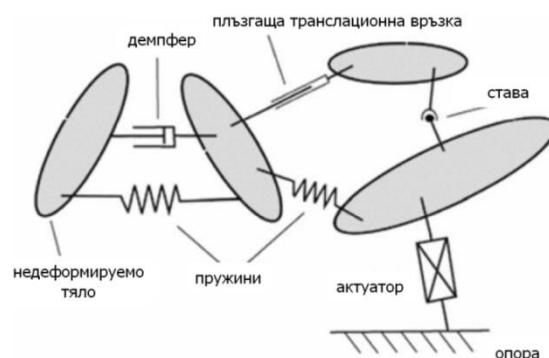
Инженерните анализи, свързани с механиката на недеформируемите тела, изследват динамиката при системи от твърди тела, извършващи движение, без отчитане на техните деформации. Типични приложения са най-често движенията на машинни части, разглеждани по отношение на техни параметри като скорост, ускорение, удари и др., при които се пресъздават кинематични или динамични (включително ударни) физични процеси.

ПРИМЕР ЗА ПРИЛОЖИМОСТ

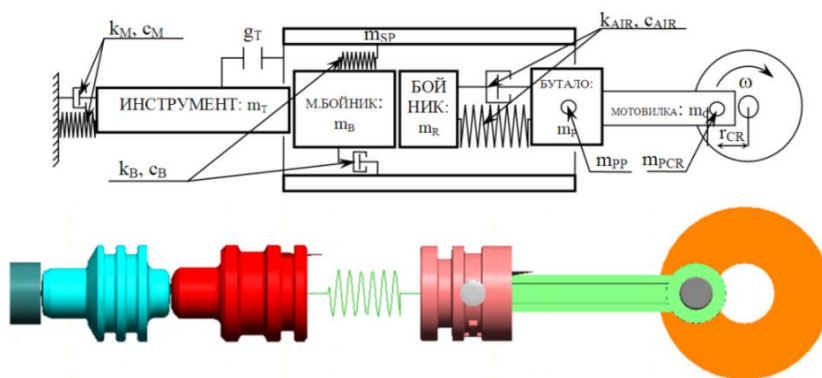
Демонстрирано е приложение на този тип анализи за оптимизиране на работните параметри на ръчен електроинструмент, тип къртач. Цел на оптимизацията е увеличаване на енергията на удар, при запазване или намаляване на вибрациите в ръкохватката (респективно – на реакцията). Създаденият виртуален изчислителен модел дава възможност за вариране на параметрите на системата до достигане на оптимални работни характеристики, като принципна схема на системата е показана на Фигура 4-18. Компоненти на модела са основните работни детайли от резонансния пневматично-вакуумен механизъм: междинен бойник (означен на схемата с B); бойник (означен на схемата с R); бутало (означено на схемата с P); ос на буталото (означена на схемата с PP); мотовилка (означена на схемата с C); ос на кривошипа (означена на схемата с PCR); кривошип (означен на схемата с CR); вретено (означен на схемата с SP); инструмент (означен на схемата с T); обработван материал (означен на схемата с T).



Фигура 4-13: Структурни експлицитни анализи на ударни въздействия



Фигура 4-17: Система от недеформируеми твърди тела

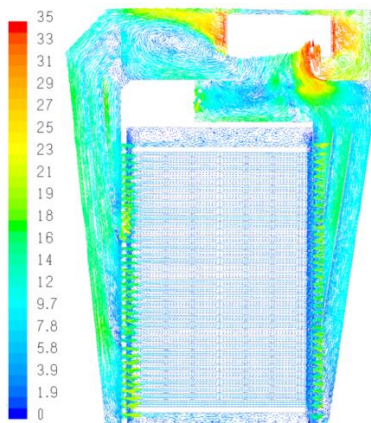


Фигура 4-18: Механика на недеформируеми тела. Приложение

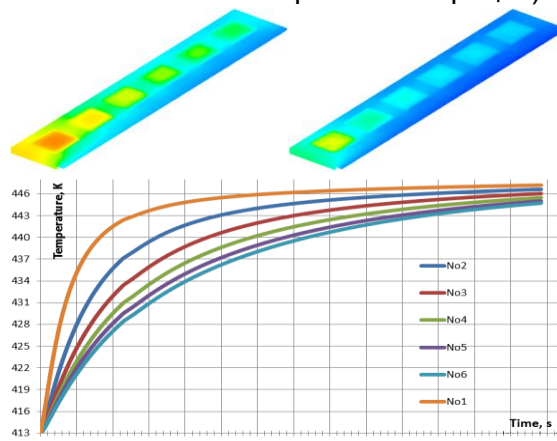
4.6. МУЛТИФИЗИЧНИ АНАЛИЗИ

РАЗГЛЕДАН Е ПРИМЕР ЗА ТЕРМОФЛУИДЕН АНАЛИЗ С ПРИЛАГАНЕ НА ВП.

Той включва съвместни решения на задачи от механика на флуидите и термични процеси при твърди тела. Обект на изследването е автоматизирана система за термична обработка на микропроцесори чрез конвективен топлообмен. Технологичният процес е на спояване на контактите към подложката (Ball Grinded Area монтаж чрез reflow процес).



Фигура 4-32: Мултифизични анализи. Приложение при термофлуиден процес. Скорост на потока в надлъжно сечение през оста на турбината (векторно представяне), m/s



Фигура 4-33: Мултифизични анализи. Приложение при термофлуиден процес. Изменение на температурите на продуктите във времето, K

Основното изискване е спазване на съответен температурен режим на нагряване (виж фигурата). Отдадената топлина към обработваните продукти се възстановява като въздухът се подгрява от нагреватели, разположени хоризонтално във входната зона на вентилатора (под оста на въртене). Проектът включва оптимизиране на конструкцията за намаляване времето за стационариране и достигане на максимална температурна разлика между компонентите под изискваните 3°C .

ИЗВОДИ

- Предложена е разширена дефиниция за ВП – технологията включва създаването и използването на виртуални симулационни модели при отчитане на взаимосвързани процеси и явления за изследване и валидиране на функционалността и експлоатационните качества.
- Изследвани са възможностите на специфични видове инженерни анализи по отношение на приложимостта им при решаване на различни инженерни задачи, с акцент на свързани взаимодействия, които са в основата на ВП. Практически, поведението на даден детайл, възел или машина може да бъде анализирано адекватно само с помощта на ВП.

4.7. ОБРАТНО ИНТЕГРИРАНЕ НА ОПТИМИЗИРАНИ ЧРЕЗ ВИРТУАЛЕН ПРОТОТИП ГЕОМЕТРИЧНИ МОДЕЛИ В ПРОЦЕСА НА РАЗВИТИЕ НА ПРОДУКТА

Подходи за обмен на информация от оптимизационен работен процес (ОРП) към процеса на развитие на продукта (ПРП). Разработени са три основни концептуални подхода, основани на приложението на тези съществуващи инструменти. Схематично те са показани на Фигура 4-35. Всяка стъпка е описана по-долу в детайли. Два основни подхода са възможни, както се вижда от схемата по-горе, като единият от тях има две разновидности:

- Генеративен подход:** Основна специфика е, че окончателният CAD модел е нов, различен от наличния в ПРП такъв.
- Сравнителен подход:** Основна специфика е, че се използва първоначално съществуващия в ПРП CAD модел, който се привежда към РПМ.

4.8. ПРИЛАГАНЕ НА ВИРТУАЛНОТО ПРОТОТИПИРАНЕ ЗА ТЕХНОЛОГИЧНО ОРИЕНТИРАНО ПРОЕКТИРАНЕ И КОНСТРУИРАНЕ

Технологично проектиране означава изграждане на форми и конструкции, съобразени с използваните материали и производствени възможности на наличната технологична база, дефиниране на толеранси и контролни процеси, съвместими с материалите и производствените обеми.

Проверката на изискванията за технологичност на планираните производствени процеси се осъществява постоянно, още от най-ранните етапи на разработката.

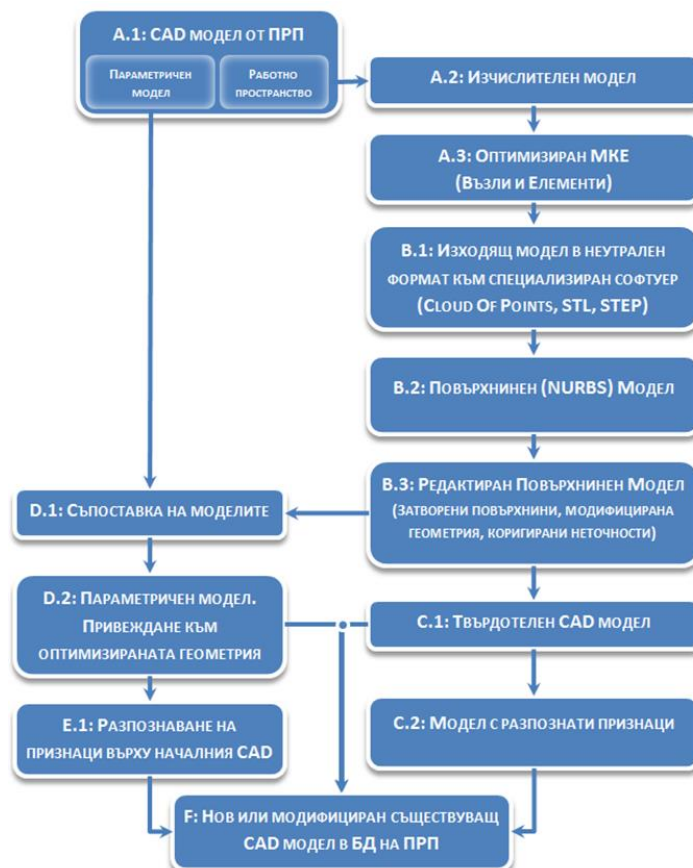
Тези изисквания зависят много от материалите и от дизайна на всеки един детайл и до голяма степен са резултат от емпиричните решения на проектантите в различните етапи от разработката.

Производствените технологии са в много тясна връзка с материалите, които се използват за производство на детайлите.

Това е показано графично на Фигура 4-43. Това обаче не винаги е възможно и най-ранният възможен етап за прилагане на технологичните изисквания зависи от конкретно решаваната задача. Обобщено представени възможните етапи са:

- При подготовката на работното пространство.
- След генерирането на тестов вариант, преди изчисляването му.
- След получаване на резултат от оптимизацията, в края на оптимизационния цикъл.

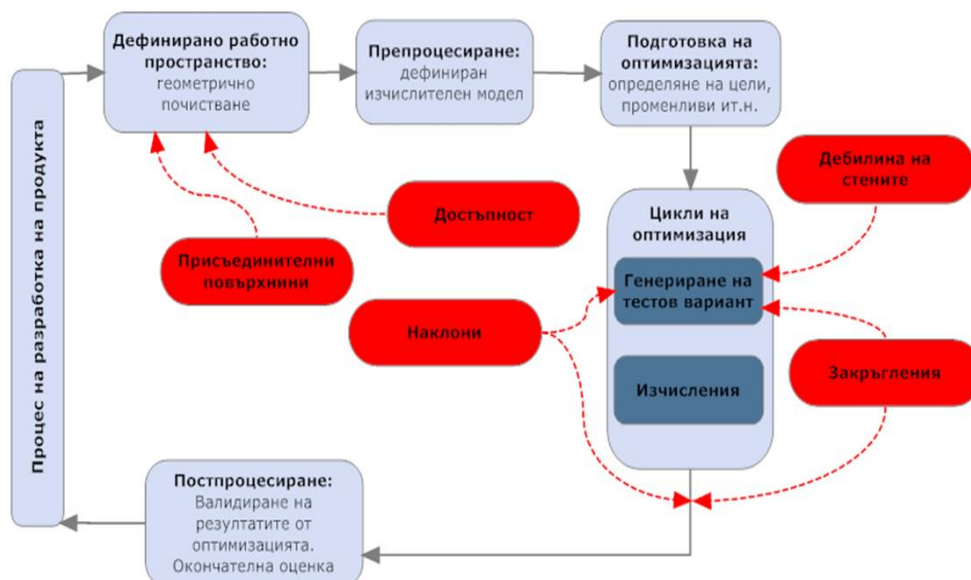
На Фигура 4-47 е разгледан многостъпков подход за решаване на оптимизационни задачи с отчитане на производствените ограничения.



Фигура 4-35: Процесът на оптимизация в цялостния процес по развитие на продукта



Фигура 4-43: Процес на решаване на числени оптимизационни задачи



Фигура 4-47: Процес на решаване на числени оптимизационни задачи с отчитане на технологичните ограничения

ИЗВОДИ КЪМ ГЛАВА 4

- Предложена е разширена дефиниция за ВП – технологията включва създаването и използването на виртуални симулационни модели при отчитане на взаимосвързани процеси и явления за изследване и валидиране на функционалността и експлоатационните качества.
- Предложени са два нови подхода (генеративен и сравнителен) за успешно обратно интегриране на резултатен геометричен модел от оптимизация на формата в съществуващ в процеса на развитие на продукта общ CAD модел.
- Предложена е методика за включване на технологичните ограничения чрез трансформирането им в геометрични такива, представят се като ограничение в посоката или големините на съответните премествания и биват дефинирани векторно чрез параметрични данни за допустимо отклонение, чрез дефиниране на колизионни повърхнини, както и дефиниране на взаимовръзки.
- Предложен е инженерен подход за оценяване на различните структури от технологична гледна точка.

5. ФИЗИЧЕСКО ПРОТОТИПИРАНЕ. АНАЛИЗ НА АДИТИВНИТЕ ТЕХНОЛОГИИ И НА ВИСОКОСКОРОСТНОТО МЕХАНИЧНО ОБРАБОТВАНЕ ЗА БЪРЗО ИЗГОТВЯНЕ НА ПРОТОТИПИ

Съществуват голям брой методи и технологии за адитивно производство, които в по-голямата си част са напълно различни от конвенционалните методи за изработване на физически обекти(прототипи).

5.2. Адитивни технологии за изграждане на метални структури

Адитивните технологии бележат изключително динамично развитие от началото на 80-те години насам. Първоначално са разработени методи основно за 3D принтиране на пластмасови изделия, но в последствие се разработват и технологии за изграждане посредством добавяне на метал (Фигура 5-8).



Фигура 5-8: Някои методи за адитивно изграждане на компоненти от метал

5.2.1. Селективно лазерно разтопяване – SLM

Селективно лазерно разтопяване (SLM – Selective Laser Melting), (Kruth, et al., 2005) (Pham & Dimov, 2003) е метод, при който се използва разтопяване на прахообразен материал с помощта на лазерен лъч с цел получаване на метален детайл с практически неограничено сложна форма.

ПРЕДИМСТВА И НЕДОСТАТЪЦИ

Предимствата и недостатъците на процеса са представени в Таблица 5-5. Като най-точна и приложима за медицински цели се откроява технологията селективно лазерно разтопяване.

Таблица 5-5: Предимства и недостатъци на селективното лазерно разтопяване

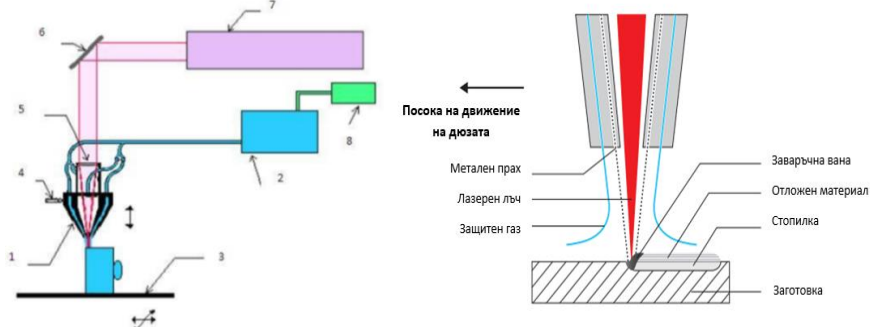
ПРЕДИМСТВА	НЕДОСТАТЪЦИ
•Поддържащата структура е от същия материал; •Работа с разнообразие от материали - неръждаема стомана, инструментална стомана, кобалт, хром, титан, алуминий; •Висока точност по X и Y; •Възможност за изработване на напълно функционални детайли; •Без необходимост от следващо довърждаване на модела; •Технологията позволява направата на много сложна геометрия; •Детайлите може да бъдат полирани чрез конвенционалните полиращи методи.	•Грешки от топлинни деформации; •Недобра точност по Z; •Висока грапавост на повърхнините на модела в сравнение със стереолитографията; •Необходимо е премахване на подпиралните структури.

5.2.2. Получаване на функционални детайли чрез лазерно отлагане на разтопен прахообразен материал –Direct Metal Deposition (DMD)

Използва се отлагане на разтопен прахообразен материал върху подвижна платформа в пространството, а не във вана, както разгледаната по-горе технология. Работната концепция на система от този тип е представена на Фигура 5-11.

От особен интерес са материали като титан. Повечето системи използват суровини на прах, но също има възможност материалът да се подава и като фини нишки.

В този случай материалът се подава извън оста на лъча.



Фигура 5-11: Схема на DMD процес: 1 – Екструдиреща глава; 2 – Прахов материал; 3 – Маса; 4 – Вход защитен газ; 5 – Лещи; 6 – Огледало; 7 – Лазер; 8 – Транспортиращ газ

Таблица 5-6: Предимства и недостатъци на метода за получаване на напълно функционални детайли, чрез отлагане на разтопен прахообразен материал – (L.E.N.S. – Laser Engineered Net Shaping)

ПРЕДИМСТВА	НЕДОСТАТЪЦИ
•Много добро използване на материала- с минимални загуби (за разлика от SLM технологията). •Позволяват изграждането на затворени обеми от повърхнини, като в тях не остава прахообразен материал (за разлика от SLM технологията). •Готовите детайли са близо до „нето“ формата и плътността на същите, получени по конвенционалните методи. •Възможност за производство на големогабаритни детайли и/или довършване на допълнителни елементи.	•Поддържащата структура е от същия материал като основната, което затруднява премахването ѝ; •Необходимост от дообработване на повърхнината на детайла; •Грапави повърхнини, които изискват допълнителна финишна обработка

Една от първите такива системи, внедрени в световната практика, се намира в България - СДРУЖЕНИЕ ЗА НАУЧНОИЗСЛЕДОВАТЕЛСКА И РАЗВОЙНА ДЕЙНОСТ, Гр. София и е доставена от екип на ТУ -София (Фигура 5-12).

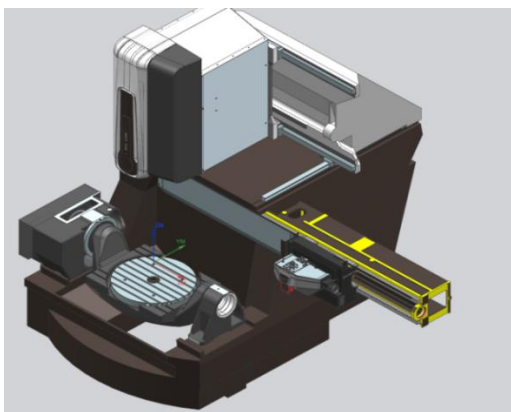
5.3. ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПРИЛОЖИМОСТ НА ХИБРИДНА АДИТИВНА ТЕХНОЛОГИЯ

В последните години се работи в посока изграждане на турбинни лопатки чрез адитивни технологии. Изпробват се както SLM, така и DMD технологии за 3D принтиране на метални структури. При DMD машините е възможно внедряването на фрезови и/или стругови операции – т. нар. хибридни машини, което позволява довършителните обработки да се извършват на една установка. Липсата на смяна на установки от своя страна води до по-висока точност при изработката на прецизни детайли.

За целите на настоящата разработка е използвана уникална хибридна машина от най-висок клас Lasertec 65 3D (Фигура 5-19) на DMG MORI.



Фигура 5-12: Хибридна машина Lasertec 65 3D



Фигура 5-19: Хибридна машина Lasertec 65 3D, ситиуирана в Лаборатория за 3D креативност и бързо прототипиране – виртуален близък



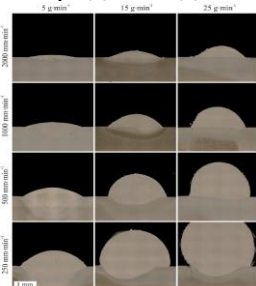
Фигура 5-28: Кадър от процеса по изграждане на детайл турбинна лопатка

5.3.2. Изследване на процеса на директно изграждане на метални структури чрез добавяне на материал при хибридна система Lasertec 65 3D за идентификация на основните процесни параметри

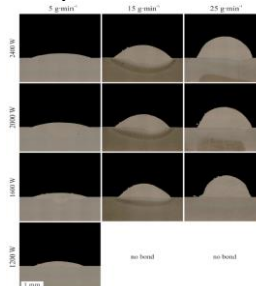
За целите на изследването на лазерната глава на машината е монтирана дюза COAX 9 с диаметър 3 mm (Фигура 5-28). Използван е прахообразен материал от типа на инструменталните стомани с големина на зърната 45-106 μm . Оптималните параметри за работа с даден материал се определят посредством опити, като процесът е итерационен, като след всеки експеримент се изследва получената структура. Основните параметри, подлежащи на изследване, са:

- Мощност на лазера [W].
- Подавателна скорост [m/min].
- Дебит на праха (количество прах, преминаващо през дюзата за единица време) [g/min].

Съотношението между подавателната скорост и дебита на праха определя формата и размерите на провара (Фигура 5-17) (Вах, et al., 2018). Съотношението между мощността и дебита на праха определя адхезията между слоевете (Фигура 5-18)



Фигура 5-17: Изследване на съотношението между подавателна скорост и дебит на праха при постоянна мощност на лазерния източник



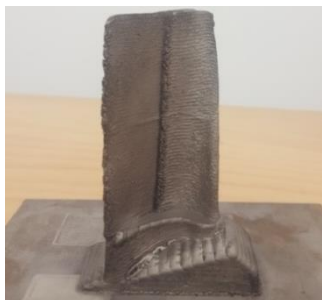
Фигура 5-18: Изследване на съотношението между мощност и дебит на праха при постоянна подавателна скорост

Съществуват и т. нар. второстепенни параметри, които обикновено не подлежат на валидация и се настройват при първоначалното стартиране на процеса. Такива параметри са:

- Диаметър на дюзата (зависи от компоновката) [mm].
- Дебит на инертния газ [l/min],
- Фокусно разстояние [mm].
- Разстояние между дюзата и наваряваната повърхност [mm]. Втори етап – Виртуална симулация и създаване на управляващи NC програми чрез дигитален близък на DMG.

Дигиталният близък представлява прецизно копие на физическата машина. ДБ на машината е необходим не само за по-добра визуализация на кинематиката при виртуалната симулация на процеса, но и за да се извърши постпроцесирането с точните параметри на използваната машина.

На Фигура 5-31 са показани изгледи на изградения детайл. След това е изградена друга част от детайла, за да се направи оценка на вътрешната структура. За целта е направен шлиф (Фигура 5-32).



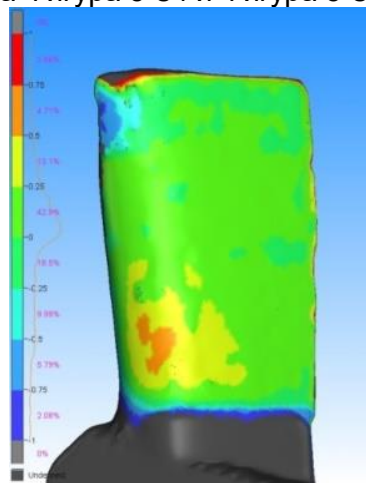
Фигура 5-31: Изглед на детайл - III



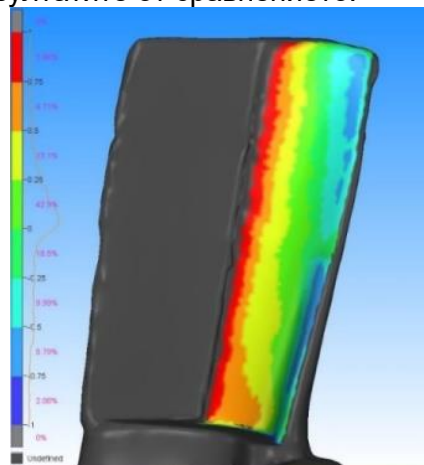
Фигура 5-32: Шлиф

5.3.3. Оценка на геометричните свойства на получените 3D обекти

На Фигура 5-34 и Фигура 5-35 са показани резултатите от сравнението.



Фигура 5-34: Гаусово разпределение на отклоненията от геометрията - I



Фигура 5-35: Гаусово разпределение на отклоненията от геометрията - II

ИЗВОДИ

- При директно изграждане на метални структури чрез добавяне на материал е необходимо да се отдели време за избор на подходящи параметри за работа с даден материал.
- Изграденият детайл обикновено не е подходящ за директно внедряване в даден механизъм/система, поради грубата повърхност.
- Вътрешната структура на детайла е изключително качествена (Фигура 5-32). Детайлите, произведени по DMD технология се характеризират с висока твърдост (до 67 HRC). Допълнителното уякчаване се дължи на изключително високата температура по време на процеса (над 1500 °C).
- Оценки на геометричните свойства на получения обект могат да бъдат направени по стойностите от Фигура 5-34 и Фигура 5-35. 61.4% от геометричните отклонения са в интервала ± 0.25 mm. Отклоненията се дължат на грубата повърхност на детайла (Фигура 5-31).

5.5. ТЕХНОЛОГИЯ С ОТНЕМАНЕ НА МАТЕРИАЛИ - CNC ВИСОКОСКОРОСТНО ФРЕЗОВАНЕ (HSM – HIGH SPEED MILLING) ПРИ БЪРЗО ИЗРАБОТВАНЕ НА ФИЗИЧЕСКИ ПРОТОТИПИ

Аддитивното производство не е универсално решение за всеки един случай на бързо създаване на прототипи. CNC технологията като алтернатива на методите с добавяне на материал е икономична, широко разбираема и разпространена, предлага широк избор на материали и отлична точност.

От съществено значение са динамичните способности на машината и задвижванията по осите. Това се определя и от значителното нарастване на работните подавателни скорости по осите при HSM. Една такава машина е в режим на ускоряване или забавяне на подаването в голяма част от времето, през което работи.

Особено високи са изискванията за постоянство на редица моментни параметри на процеса като биене (изисква се специален вид инструментални държачи с повишена точност), високи обороти (включително над 40 000 min⁻¹) и адаптивно управление на подаването.

ИЗВОДИ от глава 5

На базата на натрупания в последните години опит във водещата в страната и на Балканите, лаборатория към МТФ на ТУ -София, както и на база на редица проекти, може да се обособят следните по-важни области на ефективно приложение на адитивните и хибридните технологии:

- За геометрична верификация на 3D CAD модела.
- За валидация на ергономичните характеристики, удобство и естетическо възприятие.
- За задоволяване на конкретни потребителски нужди (например изработване на детайли за космическата индустрия, имплантанти в медицината).
- Създаване на нови оптимизирани конструкции, без рестрикции от различните технологични процеси и техните ограничения върху формообразуването – тази посока открива цяла нова вселена за формоизграждане и оптимизация на структури от метали, неметали и мулти-материални композиции само чрез добавяне на материал.
- Поради това, че изгражданият обект може да бъде на практика с произволно сложни в геометрично отношение повърхнини, включително с кухини, се откриват съвършено нови области на приложимост по смисъла на интегрираност на традиционно сбор от елементи в по-интегрирани компоненти.
- Фактът, че не се налага използването на специален предварително изработен инструмент демонстрира огромното предимство на адитивните методи по отношение на необходимото време за изготвяне на обекта, спрямо конвенционалните производствени методи.
- Някои методи за създаване на физически прототипи чрез отнемане на материал, като високоскоростното фрезование (HSM), имат свое обосновано място при създаване на ФП. Това се отнася в много голяма степен при необходимост от ФП с по-проста форма, но с висока точност и здравина, както и при обработване на свръх твърди материали с ултразвук.
- Прилагането на комбинация на адитивни методи с такива с отнемане на материал или така наречените „хибридни“ технологии, откриват нови хоризонти пред създаването на ФП, а също и като директни производствени технологии.



Фигура 5-40: Специализирана система за високоскоростно фрезование доставена в МТФ, ТУ София

6. СТРАТЕГИЯ ЗА ПРИЛАГАНЕ НА ВИРТУАЛНОТО И ФИЗИЧЕСКОТО ПРОТОТИПИРАНЕ ЗА ЕФЕКТИВНО РАЗВИТИЕ НА СЛОЖНИ СИСТЕМИ

Един от методите за бързо и ефективно решаване на тези проблеми е изработването на прототипи на изделието. Много често стои въпросът да се разработва частичен или цялостен прототип. Балансът е много съществен и няма общо правило за преценка – във всеки конкретен случай се прилага добре аргументирано използване на единия или другия подход. По-долу е направен анализ на предимствата и недостатъците на двата вида прототипи.

6.1.1 Приложимост на виртуалните и физическите прототипи

Таблица 6-3: Сравнение на ВП и ФП за оценка на общите аспекти при оценката на проекта.

Оценявани аспекти	ВИРТУАЛНО ПРОТОТИПИРАНЕ (ВП)		ФИЗИЧЕСКО ПРОТОТИПИРАНЕ(ФП)	
	ВП	Интегрирано ВП	Хибридно ВП+ФП	ФП
Естетически качества				
Цвят	3	3	3	3
Форма	0	1	2	3
Материал	0	1	2	3
Ергономичност / Използваемост				
Мнемоничност	3	3	3	3
Естетика	3	3	3	3
Лесно ползване	0	2	3	3
Удобство на ползване	0	2	3	3
Достъпност	0	1	3	3
Възприемане чрез сетива	0	1	3	3
ЛЕГЕНДА:	3	2	1	0
	Много добра	Добра	Неутрална	Лоша

Таблица 6-4: Оценка на силните и слабите страни на ВП и ФП прототипи по отношение на важни фактори в PDP.

Оценявани аспекти	ВИРТУАЛНО ПРОТОТИПИРАНЕ (ВП)		ФИЗИЧЕСКО ПРОТОТИПИРАНЕ(ФП)	
	ВП	Интегрирано ВП	Хибридно ВП+ФП	ФП
Сложност на изделието	3	2	1	0
Себестойност при промени	3	2	1	0
Време за разработка	3	2	1	0
Итеративен подход на разработка	3	3	2	0
Оценяване на естетически качества	3	3	3	0
Динамично изпитване	3	3	3	0
Тактиленост	0	1	3	3
Функционално изпитване	0	1	2	3
Взаимодействие с потребителите	0	1	2	3
Оценка на ергономията	0	1	2	3
Разработване на опростена структура	0	0	1	3
ЛЕГЕНДА:	3	2	1	0
	Много добра	Добра	Неутрална	Лоша

6.2. Нови възможности и изисквания пред ФП

Анализът на ВП и ФП ясно показва, че ролята на ФП и тестването далеч не е приключила, това важи още повече в контекста на виртуалното разработване на продукти.

Противно на убеждението, че ВП ще намали изискванията за физическо тестване, в практиката се наблюдава по-скоро откриване на нови приложения, нови предизвикателства и възможности пред ФП.

В практиката са известни редица подходи за ефективно прилагане на ВП и ФП в подходяща комбинация за бързо и с най-малки разходи постигане на необходимия резултат.

Известният „V” подход за виртуално проектиране дава много добри резултати при еволюционно развитие на продукти с голяма степен на взаимосвързаност в поведението на елементите. Друг аспект на съчетаването на виртуалните технологии с бързото физическо материализиране се прилага с ускорени темпове в медицината и по-специално в областта на имплантологията. При целесъобразно комбиниране на ВП и ФП при прилагане на „W” подход за прототипиране може да се постигне значително намаляване на разходите и времето за прототипиране, при минимален риск за съществуване на скрити недостатъци, които да се появят в серийното производство.

6.5. ФРАКТАЛЕН ПОДХОД ЗА ПРОЕКТИРАНЕ

С цел да се избягнат недостатъците на „V”, а също така и за различни по-комплексни случаи и на „W” подхода е развит и предложен нов Фрактален подход при процеса на развитие на нов продукт (ПРП). Едно от основните понятия във фракталните системи е мащабът на системата. При фракталните подходи характерното е идентичната структурата на нивата на фрагментиране били то по отношение на сложност (комплексност) или на вариантност, където най-високото ниво се отнася за целия продукт и най-ниското до най-малкия градивен елемент/възел, използващ фрактални свойства спрямо общия подход. От гледна точка на процесите, самоподобността може да се разглежда в най-малко три различни измерения, а именно:

- Структурираност на елементи – например отделен възел или „Модул“ (обособени елементи на продукта).
- Функционалност – функционално обособени системи (задвижвания, сензорика).
- Информационна архитектура.

Характерните свойства на фракталния принцип на организация могат да бъдат обобщени по следния начин (Peraltaa & Marcob, 2015):

- Фракталният метод се основава на самоорганизация на функции или дейности, базирани на подобие.
- Самоусъвършенстване – фракталите се самонапасват, т.е. оптимизират своята форма и поведение (геометрични, енергийни, информационни, повърхностни и т.н.), което им позволяват да се адаптират към всяка промяна на средата, за да съществуват (контекстна ситуация на отговор на външен натиск).
- Устойчивост – тяхното взаимодействие със средата (времева и пространствена еволюция) се осъществява чрез генериране и интегриране на необходимото разнообразие за осъществяване на целта – правилно разполагане в структурата.
- Фрактално базираните системи са отворени – обменят информация с околната среда.
- Фракталите са по поведение нелинейни системи. Тяхното взаимодействие с околната среда и тяхната устойчивост се основава на радикална адаптация и постепенна иновация. (Peraltaa & Marcob, 2015).

Основната идея на този подход е да се прилагат подобни „фрактални“ елементи в процеса на развитие при наличие на голям брой варианти или фамилии, изградени от унифицирани елементи или в още по-голяма степен изградени на модулна основа. В този смисъл принципът на модулно изграждане може да се основава именно на фракталния подход. Приложимостта е в две основни форми:

- При проектиране на структури от „долу на горе“.
При генериране на варианти или фамилизирани редове на възли и елементи е необходимо да се прилагат идентични „фрактални“ подходи и стъпки при проектирането им – например при фамилизиране на размерен принцип на продукти да се използват идентични или „фрактални“ проектантски подходи и стъпки за развитие на подобни в структурно отношение елементи с подобни параметри.
- При прототипиране и валидиране на поведението.

При вариантното или модулното изграждане могат да бъдат създавани голям брой варианти или клиентски изпълнения. Основният въпрос за валидиране на конкретното вариантно или персонализирано решение в този случай е как да може да се прототипира и валидира всеки един вариант, за да се намали риска от проявяване на ефекти от взаимното влияние на нетествани композиции.

За тази дейност в практиката масово се ползват два подхода:

- По аналогия с най-близката подобна композиция с известно поведение.
- На основата на известното поведение на отделните елементи/модули да се предположи поведението на цялата композиция.

При сложни системи със силна взаимнообвързаност и взаимно влияние на елементите и двата подхода са рискови и не дават възможност да се оценят именно композиционните ефекти.



Фигура 6-11: Детерминистичност и отвореност. Фрактален подход за проектиране

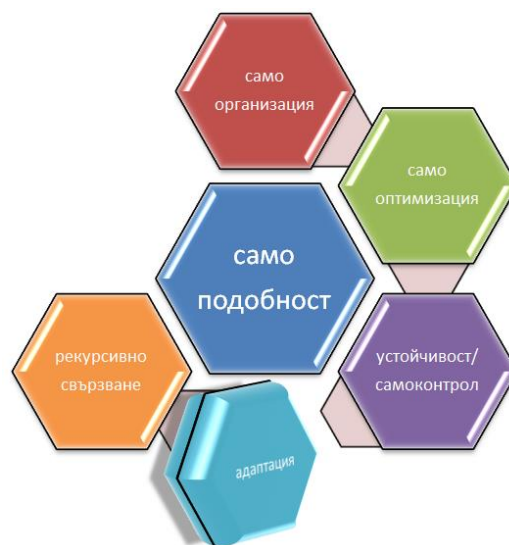
Като се вземат предвид недостатъците на съществуващите подходи за прототипиране на композиционни варианти, описани по-горе, тук е предложен и дефиниран нов подход за устойчиво фрактално проектиране, който е приложим при проектиране на системи от комплексен тип и по-специално чрез фамилизация или персонализация на продукта, отговарящ максимално добре на клиентските изисквания, чрез композиционно прилагане на фракталния подход.

Могат да се посочат няколко основни принципа на фракталната теория:

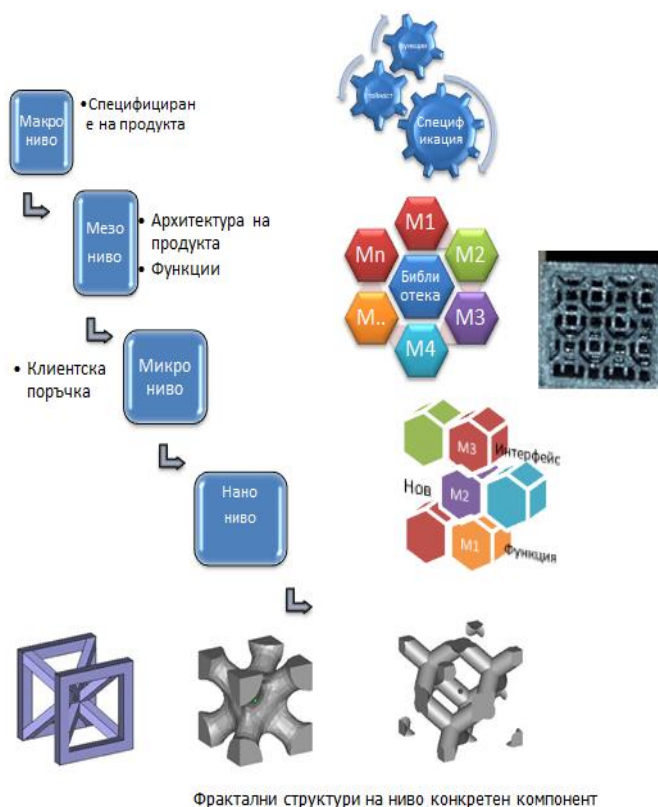
- Принцип на фрактална свързаност и организация;
- Принцип на фрактализация на начина на проектиране на устойчив продукт: Този принцип включва интегрирането на социалната, икономическата и екологичната перспектива във фракталите подходи при проектирането за целия жизнен цикъл от гледна точка на изискваното адаптационно поведение (минимална сложност на предизвикана модернизация или разходи при рециклиране). Фракталният подход на проектирането трябва да е така организиран и конфигуриран в рекурсивни форми, че да се намалява до минимум сложността на системата и да се гарантира устойчивостта ѝ (Фигура 6-12).

Разделението на нива осигурява на проектната система „Тримерна“ самоподобност и динамика на управление на всяко ниво или мащабиране в дълбочина (рекурсивно влагане) при необходимост. Тази структура намалява сложността, гарантира устойчивостта на системата и позволява постигане на самоорганизация, саморегулиране и самоконтрол без необходимост от коригиращи действия и ефективност на използване (без намеса, ненужно изразходване на ресурси или дублиране на информация).

Оттук се вижда, че областта на приложимост на фракталния подход се проявява при сложни вариантни или модулно базирани архитектури на продукти с високо ниво на фамилизация или персонализация.



Фигура 6-12: Принципи на Фракталния подход за проектиране



Фигура 6-14: Фрактални нива при проектиране – от фрактална архитектура към клиентска поръчка и виртуален прототип базиран на фрактални елементи

		Комплексност >		
		Типов	Вариантност	Модулност
< Степен на Индивидуализация	Конфигурации	“V”	“W”	“W”
	Фамилизация	“W”	“W”	“W”/“Fractal”
	Персонализация		“Fractal”	“Fractal”
			“Fractal”	“Fractal”

Фигура 6-15: Приложимост на Фракталния подход за проектиране

ИЗВОДИ ОТ ГЛАВА 6

- Предложен е иновативен фрактален метод на композиране на сложни системи за бързо осъществяване на вариантно развитие, модулно изграждане чрез преизползваемост на компоненти за голяма гъвкавост и ефективност на продуктовата и процесната организация и управление в целия жизнен цикъл на продукта.
- Нивото на структуриране не е ограничено и всяко ниво, което е вложено в предходното, има фрактална матрица спрямо системното ниво.
- Основното предимство на фракталния метод, за разлика от досега разгледаните, е възможността процесът на развитие да не се разглежда и управлява като последователно-итеративен, а като такъв с много входни точки, както и с много възможни изходи в зависимост от проектния етап, нивото на технологична готовност и нивото на структуриране на отделните системи и фрагментация на компонентно ниво, при това с опростени самоподобни структурни решения.
- Разработеният Фрактален метод позволява бързо осъществяване на вариантно развитие, модулно изграждане, преизползваемост на компоненти, ефективно управление на измененията, „саморазвитие“ при дименсиониране чрез ВП и много други конструктивно-технологични предимства от една страна, както и отвореност на процеса на развитие с възможност за привличане на добавяни проектантски и инженерни ресурси на различните етапи или нива на готовност на проекта.

7. РАЗВИТИЕ НА ХИБРИДЕН МЕТОД ЗА ПРЕДВАРИТЕЛНА ОЦЕНКА НА НИВОТО НА ДОВЕРИЕ В РЕЗУЛТАТИТЕ ОТ ВИРТУАЛНО ПРОТОТИПИРАНЕ (ВП) НА МУЛТИФИЗИЧНИ ПРОЦЕСИ ЧРЕЗ ФИЗИЧЕСКО ТЕСТВАНЕ – „ЧЕРНА КУТИЯ/БЯЛА КУТИЯ“

Критичен компонент при приложението на технологията за виртуално прототипиране в процеса на разработване на продукти (Product Development Process - PDP) е нивото на степента на достоверност на резултатите от инженерните анализи и симулации с ВП.

7.1. Възможни подходи

Разгледани са възможните подходи за приложение на физическото прототипиране за верификация и валидация на виртуалното прототипиране. Следващата фигура (Фигура 7-2) показва различните етапи от провеждане на инженерния анализ и мястото на физическите тестове.

Както е видно и от фигурата, възможни са три подхода при прилагане на физическите тестове в помощ на виртуалното прототипиране – според етапа на използването им:

- Подход за предварително валидиране на ВП.
- Подход за междинно валидиране на ВП.
- Финален подход за валидиране на ВП чрез получените резултати от ФП.



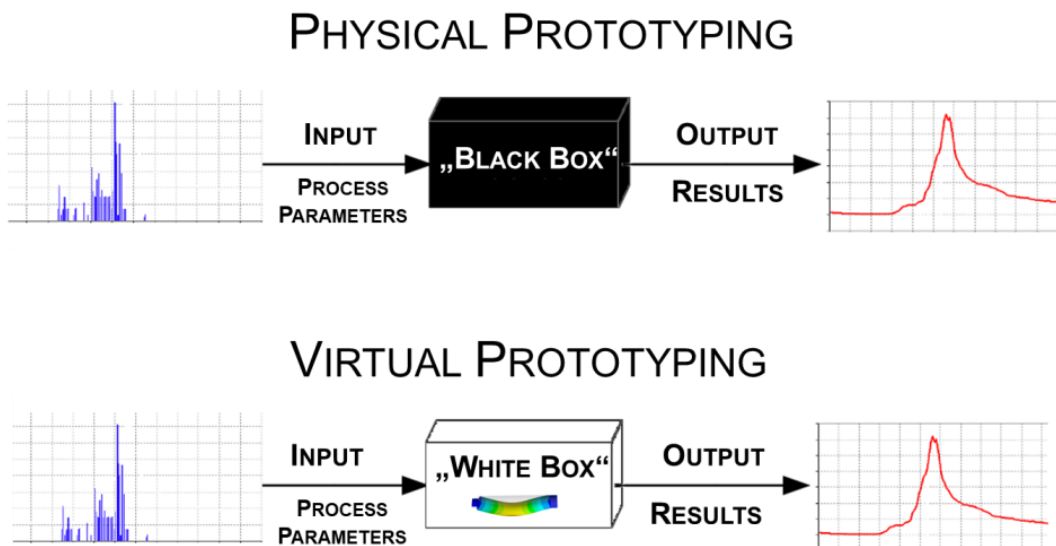
Фигура 7-2: Етапи на изграждане на модел на провеждане на инженерен анализ и място на физическото прототипиране

7.5. НОВ МЕТОД ЗА ПРИЛАГАНЕ НА „БЯЛА КУТИЯ“ ПРИ ПОЛЗВАНЕ НА ВП И ТЕСТВАНЕ С „ЧЕРНА КУТИЯ“ ПРИ ИЗПОЛЗВАНЕ НА ФП

От гледна точка на информацията, която се въвежда и съответно получава от тестовите върху прототипи, те могат да бъдат обособени все обособят на две основни категории: „бяла кутия“ при ползване на ВП и „черна кутия“ при използване на ФП.

„Бялата кутия“ предполага, че имаме пълна видимост на вътрешната работа на системата, по-специално логиката и структурата на процесите. Използвайки техниките за тестване на белите кутии, инженерът може да проектира тестови случаи, които да се изследват добре на структурно ниво, но не могат да се получат много точни количествени резултати поради симулационния тип виртуално пресмятане.

Тест
ването в
бяла кутия
(наричано
още
„разбираем
а кутия“ или
„прозрачна
кутия“)
предполага
проектантът
-анализатор
да знае и да
разбира как
работи ВП –
те може да
„виждат
вътре“ в
симулацион
ните
модели,
Фигура
7-14.



Фигура 7-14: Метод за комбиниране на „БЯЛА КУТИЯ“ ПРИ ПОЛЗВАНЕ НА ВП И ТЕСТВАНЕ НА „ЧЕРНА КУТИЯ“ ПРИ ИЗПОЛЗВАНЕ НА ФП

Тук авторът предлага нов метод за изследване на сложни обекти чрез съчетаването на прилагането на ВП като „бяла кутия“ и ФП като „черна кутия“ в итеративна свързаност. След като е изграден начален вид на ВП, се провеждат тестови симулации и то в точки на пространството на параметрите, които могат да бъдат адекватно възпроизведени и тествани със създаден за целта физически прототип, разглеждан като „Черна кутия“. Получаваните тестови резултати от ФП обикновено са с по-висока точност от точността на симулациите. Получените количествени резултати от физическите тестове се интерпретират по подходящ начин в коефициентите на моделите на ВП, които не са добре теоретично дефинирани (например коефициенти на триене, коефициенти на дисипация на енергия, контактни ефекти др.). Този процес се повтаря итеративно до получаването на добро ниво на съответствие между симулационните резултати от ВП и измерванията от тестовите с ФП.

Новостта на метода се състои в итеративната свързаност на ВП и ФП и по-специално на калибрирането на ВП чрез обратна връзка с данни от ФП чрез вътрешен микро итеративен цикъл. Тази задача по същество е „обратна“ по зададени точни резултати на изхода и идентични входни въздействия да се определят параметрите на изчислителните модели на ВП. За решаването на тази обратна задача се прилага многократно решаване на правата задача – задават се стойности на съответния коефициент във ВП и се следят изходните резултати от симулациите, като за това се прилагат микро итерации вътре във ВП до постигане на добро съответствие на получаваните изходни резултати от симулациите спрямо измерените от тестовите с ФП при равни входни параметри.

На Фигура 7-15 е представено съчетаването на прилагането на ВП като „бяла кутия“ и ФП като „черна кутия“.

ИЗВОДИ КЪМ ГЛАВА 7

- Развит е хибриден метод за предварителна оценка на нивото на доверие в резултатите от мултифизични симулации на поведението на изследвания обект чрез виртуално прототипиране (ВП) съвместно с физическо тестване върху ФП, базирани на етапа от процеса на виртуално прототипиране и обратна връзка с параметрите от физически тестове.
- Изследвани са три подхода за оценка на степента на достоверност на резултатите от виртуалните прототипи – начален – за верификация на граничните условия, междинен – за подобряване на точността на получаваните резултати и финален – за валидиране получаваните резултати.
- Предложен е нов метод за подобряване на ефективността и ефикасността на виртуалното прототипиране, наречен „БЯЛА КУТИЯ/ЧЕРНА КУТИЯ“ за изследване на сложни обекти чрез прилагане на ВП като „бяла кутия“ и ФП като „черна кутия“ в итеративна свързаност до постигане на фина калибрация на ВП. Новостта на метода се състои в итеративната свързаност на ВП и ФП и по-специално на калибрирането на ВП чрез обратна връзка с данни от ФП чрез вътрешен за ВП микро цикъл.
- Апробацията на метода „БЯЛА КУТИЯ/ЧЕРНА КУТИЯ“ и трите подхода за верификация и валидация на ВП са доказани в три успешно приключили проекта с международни индустриални партньори, използвани като демонстрационни тест случаи.



Фигура 7-15: Съчетаването на прилагането на ВП като „бяла кутия“ и ФП като „черна кутия“

8. ВИРТУАЛНИЯТ ПРОТОТИП КАТО ОСНОВА ЗА ДИГИТАЛЕН БЛИЗНАК. „LL“ МЕТОД

С нарастването на индустриализацията на „интернет на нещата“ и появата на милиони интелигентни, свързани системи, концепцията за дигитални (цифрови) близнаци ДБ (Digital Twin) бързо придобиват важно значение в много индустриални сегменти и обещават да революционизират начина, по който компаниите проектират, изграждат и поддържат своите продукти и процеси.

8.1. КОНЦЕПЦИЯТА ЗА ДИГИТАЛЕН БЛИЗНАК

Концепцията за дигитален близнак се прилага най-вече в случая, в който се получава повече информация от физически работещ продукт и платформата Интернет на нещата (IoT) като комуникационна среда. (LC-Insights LLC, 2016)

Тук се дава авторска дефиниция за демаркацията на понятията ВП и ДБ. Основното, което разграничава ВП от ДБ е следното:

- ВП е абстрактен информационен и симулационен „двойник“ на номинален физически обект и не отчита специфичните особености на всеки един физически обект и използва абстрактно, а не реално време за симулиране на процесите.
- ДБ не е абстрактен информационен и симулационен „двойник“ на реален физически обект, а е индивидуализиран за всеки един такъв обект, като отчита специфичните особености на всеки един физически обект – или дигиталният близнак (ДБ) е конкретен за всеки конкретен физически обект.
- ДБ включва в себе си и координатата „РЕАЛНО ВРЕМЕ“ – т.е. дигиталният близнак колектира данни (в информационна база данни, негова неразделна част) за поведението на физическия (или виртуален) обект като параметри, получавани като обратна връзка от сензори не само при определени условия, но и във функция от времето.

В случай на използване на виртуално прототипиране (ВП), концепцията „Дигитален близнак“ (Digital Twin) може да се разгледа и като еволюционна трансформация на ВП в хода

на неговото развитие и така да се трансформира от инструмент за валидация в хода на проектирането на един продукт (обект) към ДБ и да се прилага към известната практика в областта на комплексните продукти. Осъществяването на надграждане на ВП със свързани БД за колектиране на информация за отделни параметри от виртуални тестове, от поведението на ФП или дори функциониращ продукт **позволява трансформацията от ВП към ДБ.**

8.2. ИНТЕГРИРАНО ВИРТУАЛНО ПРОЕКТИРАНЕ НА СЛОЖНИ ИЗДЕЛИЯ ЧРЕЗ НОВ „LL“ МЕТОД

С цел да се избягнат недостатъците на „V”/„W” методите, а също така и за различни по-комплексни случаи приложими съвместно с новопредложения Фрактален подход, тук е предложен нов метод, основаващ се на успоредно развитие на виртуалния и физическия прототипи (ФП в случай, че е необходим) в процеса на развитие на нов продукт (ПРП), като за разлика от „V”/„W” методите, процесът на развитие не върви от „общото към частното и обратно“, а на основата на дефинираната архитектура се развиват успоредно ВП и ФП, като така се позволява отделни елементи на проектираната система да бъдат в различен етап на готовност и да се съвместяват в процеса без интерфейсни конфликти.

Втората много важна разлика в метода е, че в предложената идеология на развитие на ВП, той не се изгражда от отделни фрагменти за отделни симулации на определени аспекти на поведението, а от самото начало се стартира пълната архитектура на виртуалния прототип, като не се „Пристроява“, а се „Надгражда“ в целия процес на създаването му.

Така в много по-голяма степен и по-лесно се изграждат взаимосвързани модели за интеграция на процесните елементи до постигане на комплексен и напълно функционален ФП. Обратно, в предложения метод изготвяните ФП могат да бъдат и напълно фрагментарни, обслужващи отделни аспекти на поведението на продукта и се ползват основно за валидиране на ВП. Тук ключовата идея е, че ФП са трудни за създаване на вариантност и модифициране, а също, че взаимното влияние на отделните елементи на системата и свързаността на процесите ще се осигурява най-вече от консистентността на ВП, изграден на фрактален принцип, а не от евентуално симетрично развиван и разрастващ се ФП. Така методът „LL“ позволява да се развива с надграждане в отделните фрактални структури и на отделните етапи ВП, като се пести време и средства, при нарастващ по сложност и обем физически аналог на ВП.

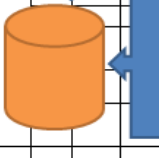
При фракталното структуриране всеки един възел (ниво) се развива, тества и внедрява фрактално (автономно, самоподобно, по идентичен алгоритъм), а продуктът се оценява на системно ниво – в общата матрица. „LL“ методът съчетан с фрактален подход дава много голяма гъвкавост на общата организация на процеса големи възможности за вариантност проектиране, както и за преизползване на възли и елементи в други решения.

Втората съществена идея на предложения метод се състои в това, че в процеса на изграждането му и след валидирането му, ВП се трансформира от абстрактен във „индивидуален двойник“ на физическия обект или в „Дигитален близък“ за всеки един произведен физически продукт. Една графична интерпретация на този успореден поток на процесите и в последствие трансформиране на ВП в ДБ и неговото „клонироване“ за всеки произведен продукт е показана на Фигура 8-1.

ИЗВОДИ към глава 8

- Предложена е авторска дефиниция за демаркацията на понятията ВП и ДБ.
- Предложен е нов „LL“ метод, основаващ се на еволюционно изграждане на виртуалния прототип и фрагментарно на физическите прототипи в процеса на развитие на нов продукт (ПРП), като процесът на развитие се осъществява хибридно и успоредно – концепцията и архитектурата „от горе на долу“, виртуалният прототип „от долу на горе“, а физическият прототип – фрагментарно по нива.
- В предложения „LL“ метод, ВП се изгражда от самото начало на основата на цялостната си архитектура, като не се „пристроява“, а се „Надгражда“ в целия процес на еволюцията си. Така методът „LL“ позволява ВП да се развива с надграждане в отделните фрактални структури и на отделните етапи, като се пестят много време и средства за аналогичен нарастващ по сложност и обем физически прототип.
- Предложеният иновативен „LL“ метод позволява отделни елементи на проектираната система да бъдат в различен етап на готовност и да се развиват с различна скорост.
- Новост на предложения метод е принципът на трансформация – в процеса на изграждане ВП се „обучава“ от проведените тестове с ФП и след финалното му валидиране, ВП се трансформира от абстрактен „двойник“ на номиналния продукт в „индивидуализиран близък“ на конкретен физически обект или „Дигитален близък“ на всеки отделен произведен продукт.

- Предложените методи на фрактално проектиране, модулно изграждане и „БЯЛА/ЧЕРНА КУТИЯ“ са апробирани в условията на индустриални проекти и са демонстрирани добри резултати по отношение на ефективност и ефикасност.
- Платформата "Индустрия 4.0" е ефективен отговор на измененията в съвременните технологии на ново качествено и функционално ниво. Съчетаването на реалния свят на производството с виртуалния свят на информационните и комуникационните технологии, при което традиционните промишлени процеси се допълват, се развиват и оптимизират чрез дигитализация и вградена интелигентност.

ДЕЙНОСТИ	ВИРТУАЛНО		ФИЗИЧЕСКО		ПРОИЗВОДСТВО
	прототипиране	Дигитален близък	прототипиране	Test серия	
Продуктово планиране					
Идентифициране на нуждите на клиента					
Продуктови Спецификации					
Създаване на концепции и избор					
Валидиране на концепцията					
Архитектура на продукта					
Проектиране на продукта		ВП			
Дизайн за производство		ВП			
Прототипиране		ВП			
Икономическа оценка на продукта		ВП Финал			
Индустриализация		ДБ		"0" серия	
База данни			ДБ Финален		Пробна Серия
			ДБ близък Продукт 1		Продукт 1
			...		...
			ДБ близък Продукт N		Продукт N

Фигура 8-1: Съчетаването на прилагането на ВП като „бяла кутия“ и ФП като „черна кутия“

Нов „LL“ метод за развитие на нов продукт с фрагментарни ФП и надграждане на ВП до трансформиране във ДБ и мултиплицирането му за всеки конкретен физически продукт.

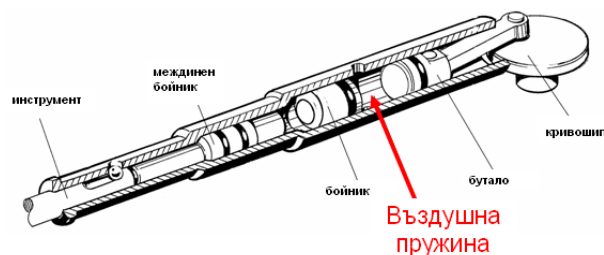
9. АПРОБАЦИЯ НА ПРИЛОЖИМОСТТА НА ВИРТУАЛНОТО И ФИЗИЧЕСКОТО ПРОТОТИПИРАНЕ ПРИ РАЗВИТИЕ НА НОВИ ПРОДУКТИ.

9.3. РАЗВИТИЕ НА ФАМИЛИЯ УДАРНО-ПРОБИВНИ РЪЧНИ ЕЛЕКТРОИНСТРУМЕНТИ С ИНОВАТИВНА УДАРНА СИСТЕМА С КОНТРОЛИРАН РЕЗОНАНС ЧРЕЗ ВИРТУАЛНО И ФИЗИЧЕСКО ПРОТОТИПИРАНЕ

Проектът за изграждане на „Фамилия ударно-пробивни ръчни електроинструменти с ударна система с контролиран резонанс“, с работно название *SparkHAMMER*, има за цел създаването на иновативна фамилия високопроизводителни ударно-пробивни машини (наричани още перфоратори) с иновативна ударна система базирана на принципа на контролиран резонанс.

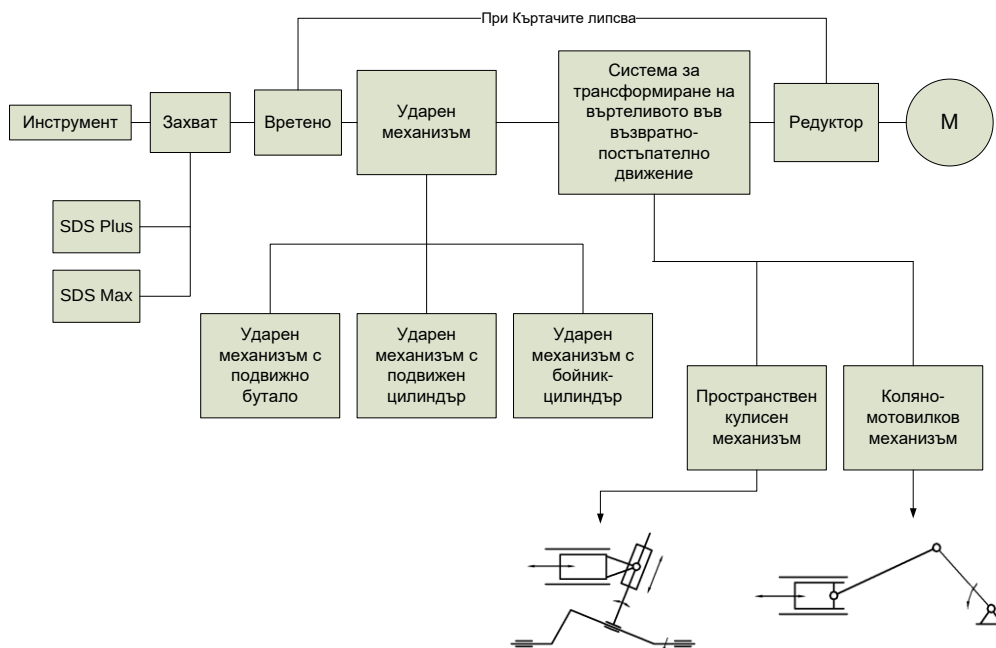
Създаване на виртуален модел на пневматично-вакуумна резонансна система

Пневматично-вакуумният механизъм осигурява задвижване на системата при работа в режим на къртене. Новият принцип, който е предложен, се състои в това да се намери метод за поддържане на механизма за работа в близка до резонанса област. Това дава възможност резонансът да увеличи чувствително нейната производителност.



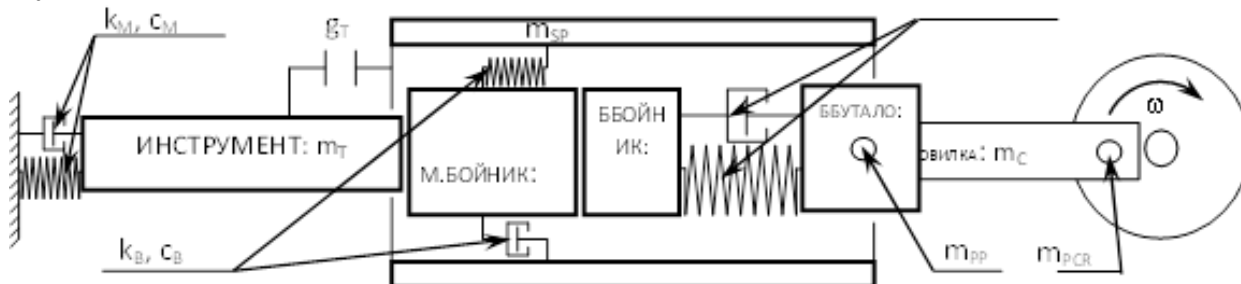
Фигура 9-22: Генериране на удара

за работа в близка до резонанса област. Това дава възможност резонансът да увеличи чувствително нейната производителност.

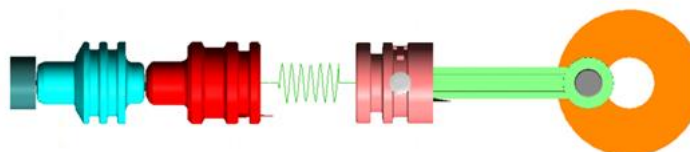
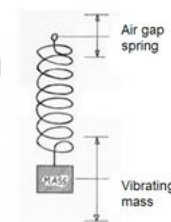
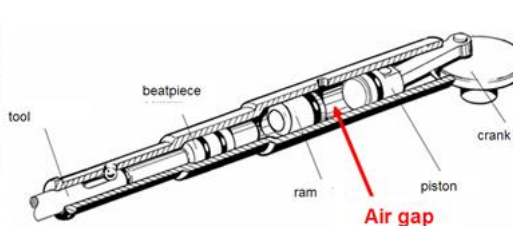


Фигура 9-24: Структурно изграждане на ударно-пробивните машини

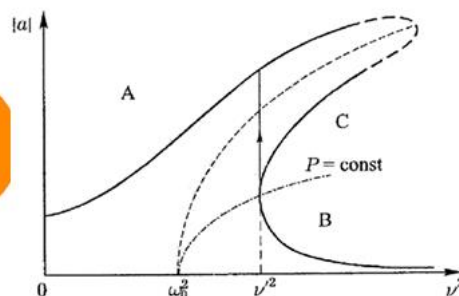
С цел създаване на виртуален прототип е създаден изходен тримерен модел на системата. На негова основа, чрез дефиниране на необходимите данни, част от които се настройват итеративно, е построен виртуален изчислителен модел (фиг. 3.1), благодарение на който може да се изучи поведението ѝ. Принципно схема на системата е показана на Фигура 9-30.



Фигура 9-30: Принципно схема на пневматично-вакуумен механизъм



Фигура 9-31: Виртуален прототип



Фигура 9-34: Резултати за различни честоти на въртене на задвижващото звено

На основата на дефинираната принципна схема на механизма, е изграден виртуален модел, показан на Фигура 9-31. Този модел се ползва за симулиране движението на твърдотелни обекти, без отчитане на техните собствени деформации, за определяне енергията на удар.

9.3.6. Резултати от проведените симулации при използване на виртуалния модел

Също така намаляването на честотата се налага поради неустойчивия режим в близост до оптималните за резонанса обороти, поради опасност от преминаване в задрезонансна област, където има рязко спадане на енергията, виж Фигура 9-34.

Проведените тестове и сравнителни резултати върху прототипите на съответните конструкции показват добро съвпадение с получените от симулациите.

Виртуалните модели могат да бъдат добра основа за последващи оптимизации, както на конструкциите на проектираната фамилия от машини, така и избиране на подходящите параметри за получаване на оптимални резултати.

9.3.13. Верификация на виртуалния прототип

Разгледаният виртуален прототип е валидиран в значителна степен и чрез частични ФП за определяне на допълнителни стойности на някои от параметрите на модела (триене, топлинно натоварване) от режима на работа на прототипа. Физическият прототип е изпитан в реални условия и са измерени стойностите на виброускорението в ръкохватката с цел да бъдат съпоставени с определените от изчислителния модел такива.

Другият електроинструмент от средния клас на гамата е представен от размера БПВР 540. Показани са стилистичният дизайнерски проект и реализираният функционален физически прототип в по-ранен (неоцветен) вид, Фигура 9-70. Постигната е висока производителност (най-добри показатели в световен мащаб) по сравнение с водещите световни производители като Bosch, Hilti, Makita, виж. Фигура 9 71.

ИЗВОДИ

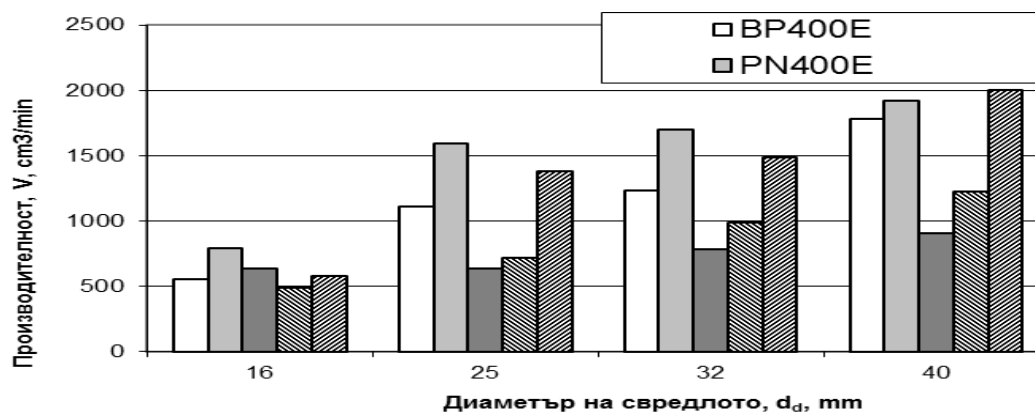
- Чрез технологията за ВП е развита иновативна резонансна ударна механична/пневматично вакуумна система – новост на световния пазар.
- Дефиниран е оптимален обхват на фамилията като област и типоразмерен ред, позволяваща гъвкавост, максимално удовлетворяване на потребителските нужди и ефективно производство.
- Постигната е висока производителност (най-добри показатели в световен мащаб), подобро удобство за работа (чрез намалено собствено тегло) и подобрена ергономия за оператора и общо намаляване на умората.
- Постигнато е подобро удобство за работа (чрез намалено собствено тегло) и подобрена ергономия.



Фигура 9-69: Стилистичен и дизайнерски проект за машина от среден клас–перфоратор BP540CE.



Фигура 9-70: Функционален физически прототип на машина от среден клас–перфоратор BP540CE



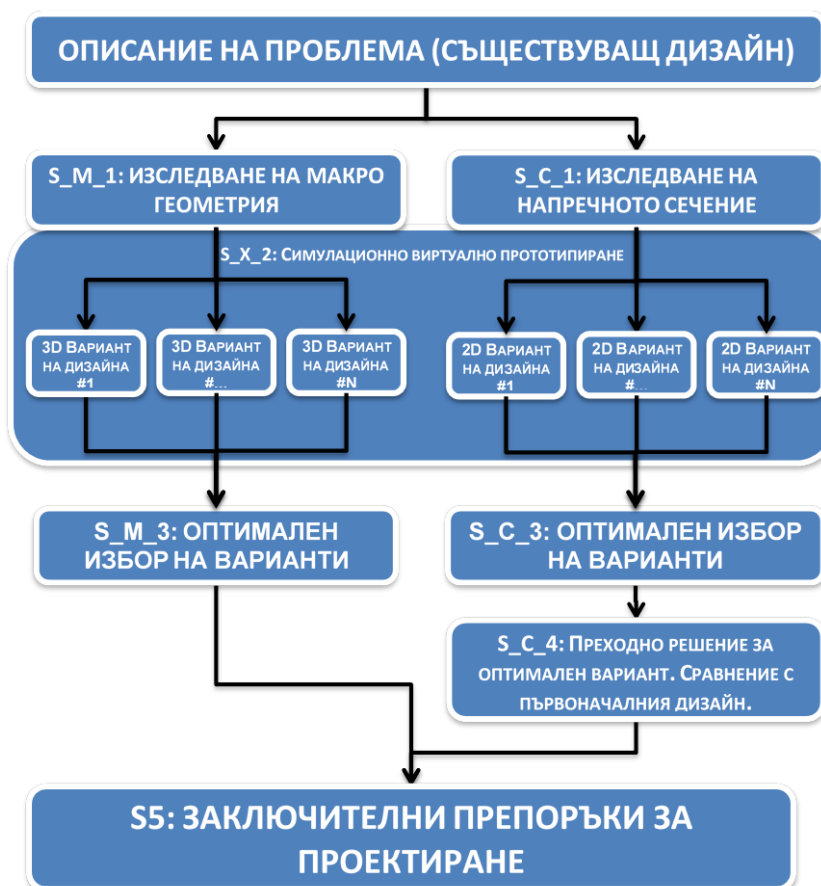
Фигура 9-71: Сравнение на проектирана машина BP400E с конкурентни образци

9.5. АПРОБИРАНЕ НА ВИРТУАЛЕН ПРОТОТИП ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА МУЛТИФИЗИЧНИ ПРОЦЕСИ. ПОДОБРЯВАНЕ НА РАБОТНИТЕ ПАРАМЕТРИ НА ИЗПАРИТЕЛ НАСТОЛЕН ХЛАДИЛНИК

Хладилниците за битова употреба са важен уред в домакинството вече повече от 100 години. Изпарителят е важен компонент, много често определящ ефективността на системата. Това е устройство за абсорбиране на топлина от хладилното пространство в хладилната система чрез изпаряване на хладилния агент.

Геометрията се основава на изпарителния модул за настолен хладилник (проба от KT1730 на фирма Liebherr). Изпарителната серпентина

е залепена върху тънка алуминиева плоча. Серпентината се произвежда от алуминиева тръба, деформирана до "продълговато" напречно сечение. Кривата му е съобразена с характеристиките на хладилника (входно и изходно положение). Серпентината е свързана с тънка алуминиева плоча с висококачествено контактено лепило за топлопроводимост.

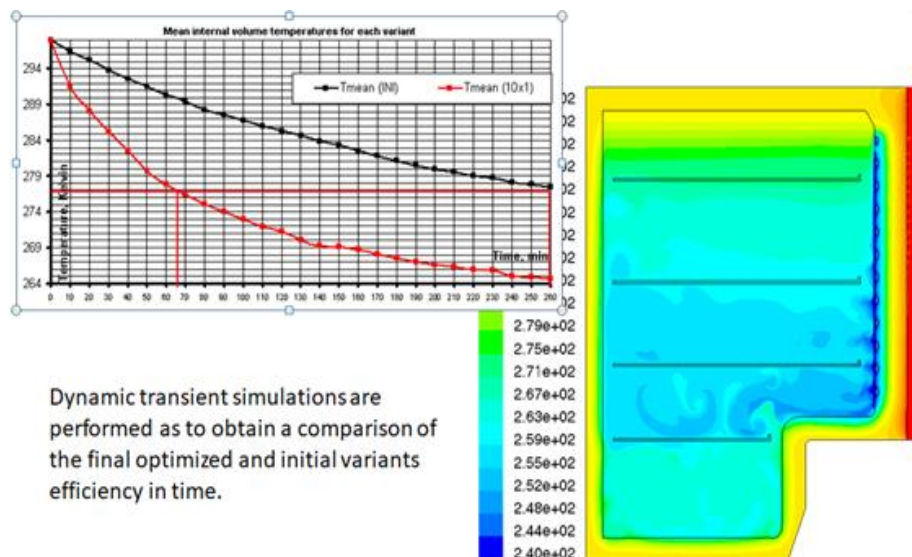


Фигура 9-82: Методика за оценка на вариантите

ИЗВОДИ

Разработен е нов дизайн на изпарител за настолни хладилници, базиран на виртуални прототипи. Основните резултати от проведеното изследване са:

- Демонстрирана е възможност за оценка на конструкцията в ранния етап на проектиране. Това позволява да се намалят разходите за разработване на продукти и времето за достигане до пазара, като се избягват неправилни конструктивни решения.
- Осигурено е намаляване и дори премахване на физическите тестове и значително намаляване на времето и разходите.
- Възможност за оценка на вътрешните параметри на изследваната конструкция и ясно разбиране на протичащите процеси. Това е специфичното предимство на виртуалното прототипиране спрямо физическото такова.



Фигура 9-87: Окончателен вид на конструкцията.

9.6. ПРИЛОЖЕНИЕ НА ИНОВАТИВЕН МЕТОД ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА МУЛТИФИЗИЧНИ ПРОЦЕСИ ЧРЕЗ ВИРТУАЛНО ПРОТОТИПИРАНЕ – ИЗСЛЕДВАНЕ И ВАЛИДИРАНЕ НА АКУСТИЧНИ ПАРАМЕТРИ НА Ж.П. КОЛЕЛО

9.6.1. Изследване на акустика за ж.п. компоненти

Оценката на акустичните параметри на ж.п. елементите е задължителен етап в процеса на сертифициране на новоразработено изделие и по-специално – на железопътни колела. Подходът за конвенционална оценка включва измервания и експерименти върху физически прототип. Това предлага алтернатива, базирана на компютърни симулации, която позволява да се оцени конструкцията на ранен етап от развитието на изделието и да се проверят различни варианти. Независимо от това, този подход не дава пълна "вътрешна" информация за механизма за генериране на шум и изисква специализиран инструмент.

9.6.4. Методика за акустична оценка на железопътните колела чрез виртуални прототипи

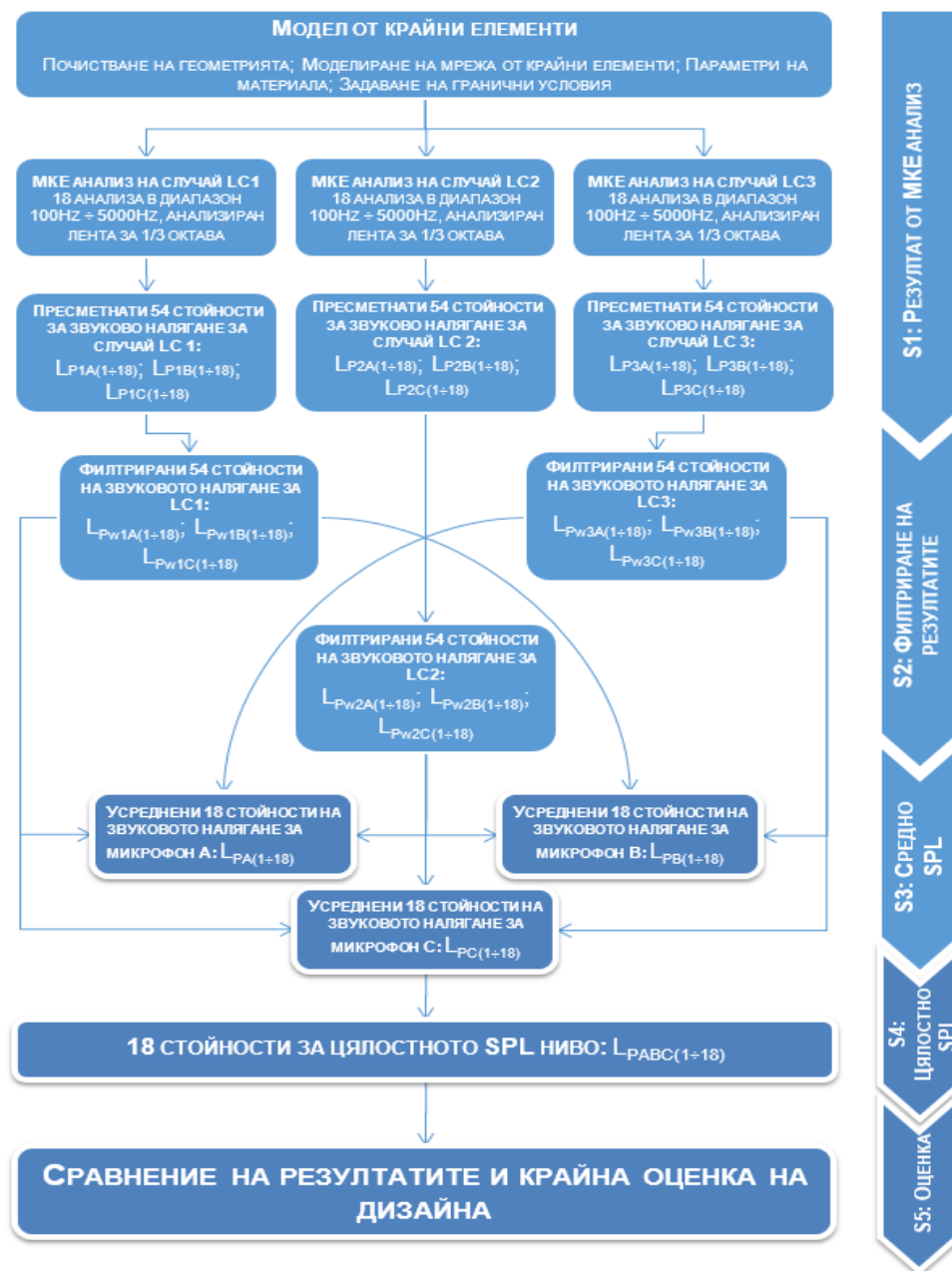
Създадена е нова методология, базирана на оценката на акустичното поведение на изпитваното колело в сравнение с референтно колело, използвайки технологиите на виртуалното прототипиране. Основен параметър за това сравнение е нивото на звуковото налягане (SPL), както е определено в (EN 13979-1: 2003 + A1: 2009 2009). Методологията е показана като цяло на Фигура 9-88.

Състои се от следните етапи:

- **S1: Резултати от анализите на крайните елементи:** Определяне на SPL в характерни точки за обхвата 100Hz ÷ 5000Hz, анализирани с 1/3 октава. Разгледани са три отделни случая на натоварване, съгласно изискванията на стандарта и показани на Фигура 9-90. Те са обозначени като L_{Pcri} , където:
 $s = 1, 2, 3$ - обозначение на изпитания случай на натоварване (Фигура 9-89);
 $r = A, B, C$ - обозначение на микрофона съгласно схемата на Фигура 9-90 (референтен номер (EN 13979-1: 2003 + A1: 2009 2009));
 i - е групата от 1/3 октава;

- S2: Филтриране на резултатите:**
 Всяко ниво на звуково налягане (изчислено за грубост на единица) в i -тата $1/3$ октава се претегля според следната зависимост:

$$L_{Pwcri} = L_{Pcri} + C_i + R_i + H_i$$
 където:
 L_{Pcri} - ниво на звуковото налягане, изчислено за $1/3$ октава i ;
 C_i е стойност от А филтъра в dB;
 R_i е отражението на грапавостта, изразена в звуково налягане, dB (1m);
 H_i е контактният филтър в dB.



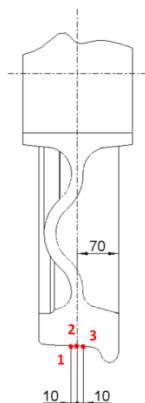
Фигура 9-88: Блок-диаграма на използваната методика.

Контактното филтриране се изчислява съгласно формулата на Remington:

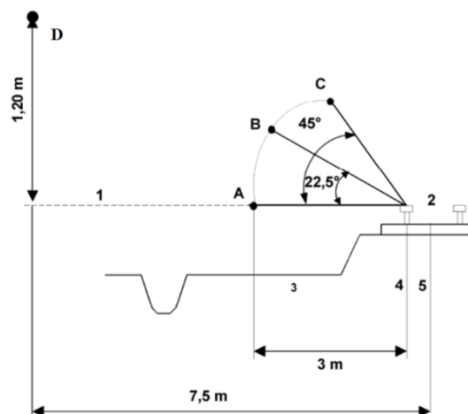
$$H_i = 20 * \log \left[\frac{1}{1 + \frac{\pi}{4} * \left(\frac{2 * \pi * a * f_i}{V} \right)^3} \right]^{\frac{1}{2}}$$

където:

- a – половината дължина на контактната зона в посоката на търкаляне (в m), както е определено за изпитваното колело;
- V – скоростта на търкаляне (m/s);
- f_i е централната честота на i -тата $1/3$ октава.



Фигура 9-89: Разполагане на изследваните случаи на контакт между релсата и колелото.



Фигура 9-90: Разположения на характерни точки, за които за отчитани акустични параметри (микрофони при изследване на физически прототип).

- **S3: Средна стойност на SPL за всеки микрофон:** Изчисляване на средната стойност на SPL за трите позиции на контактните точки на колелото:

$$L_{Ppi} = 10 * \log \left(\frac{1}{3} * \left(10^{\frac{L_{Pw1pi}}{10}} + 10^{\frac{L_{Pw2pi}}{10}} + 10^{\frac{L_{Pw3pi}}{10}} \right) \right)$$

Където:

L_{Pw1pi} , L_{Pw2pi} , L_{Pw3pi} са средно претеглените нива на налягането (над микрофони $p = A, B, C$), изчислени за контактните позиции 60 (натоварване 1), 70 (натоварване 2) и 80 (натоварване 3) mm от вътрешната повърхност на фланеца,

- **S4: Общ SPL:** Полученото ниво на звуково налягане L_{PABC} съответства на претеглената средна стойност на тези три нива на звуково налягане, дадени от следната зависимост:

$$L_{PABCi} = 10 * \log \left(0,4 * 10^{\frac{L_{PAi}}{10}} + 0,2 * 10^{\frac{L_{PBi}}{10}} + 0,4 * 10^{\frac{L_{PCi}}{10}} \right)$$

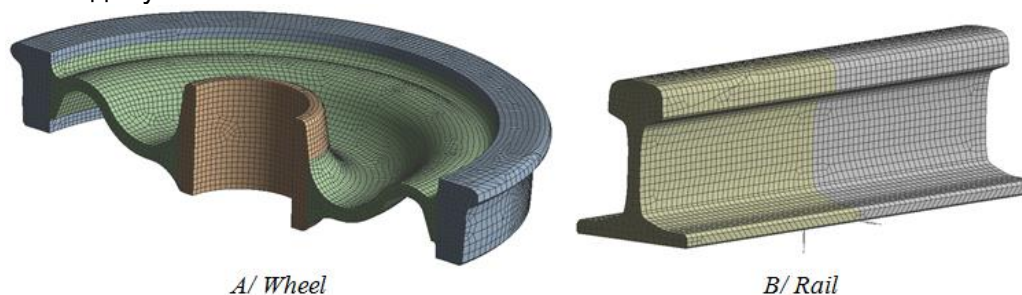
- **S5: Сравнение на резултатите и окончателна оценка на проекта:** Определената обща SPL функция над честотния диапазон се сравнява с референтните стойности.

9.6.5. Практическо приложение

Основният дял в анализа се формира от симулациите на Крайните елементи (FEA) (етап 1 на предложената методология). Необходими са множество анализи (3 случая на натоварване, всяка от които с 18 октави или общо 54 анализа) и резултатите от тях да бъдат обобщени. Тази първа стъпка е описана подробно по-долу.

- **S2: Виртуален прототип**

Изграден е модел от крайни елементи, базиран на представената по-горе геометрия. Симулационният модел съдържа около 731 000 възли и 842 000 елемента и е показан на Фигура 9-93 по-долу.



Фигура 9-93: Модел от крайни елементи, използван за провеждане на инженерните анализи.

Системата колело/релса, може да бъде представена от две динамични системи, свързани в точка и под въздействието на относителното преместване между тях. Това е типичен модел на вертикално натоварване. В този модел движението на колелото по протежение на релсата се игнорира и се заменя с „движещо се натоварване“, при което „лента“ на графовостта въздейства както върху колелото, така и върху релсата. Освен вертикалното направление, най-важно е да се включи и страничното направление.

Резултатите от симулацията от 54 анализа са представени чрез SPL разпределения за примерна честота (100Hz) по случаи на натоварване. Тези разпределения са представени в равнината на симетрия, което е достатъчно представително за текущото проектиране.

ИЗВОДИ

- Предложен е подход за използване на виртуален прототип за оценка влиянието на параметрите на конструкцията върху акустичните показатели и е доказана ефективността на тази оценка и преглед на протичащите физични процеси с използване на виртуален прототип в ранния етап на проектиране.
- Практически е доказан чрез сертификация от TUV научноизследователски подход, базиран на технологиите за виртуално прототипиране и изискванията на индустриалните стандарти за сертифициране на акустичното поведение на железопътни колела чрез референтен физически тестов образец.
- Методиката е апробирана чрез реален индустриален проект, където резултатите от виртуалното прототипиране се сравняват с експерименталните резултати и на тази база се търси съответствие на изискванията на европейския стандарт EN 13979-1.
- Представената научноизследователска работа е съществена стъпка в изграждането на нова обща методология, базирана на технологиите за виртуално прототипиране и изискванията на индустриалните стандарти, за сертифициране на акустичното поведение на железопътните колела.

9.7. РАЗВИТИЕ НА КОМПЛЕКСНО ИЗДЕЛИЕ – ФАМИЛИЯ ВИСОКОПОВДИГАЧИ ЧРЕЗ ТЕХНОЛОГИИТЕ НА ВИРТУАЛНОТО ПРОТОТИПИРАНЕ

Целта на примера е да демонстрира приложението на различните изброени компоненти на виртуалното инженерство и по-специално на ВП и ФП при отделните етапи, илюстрирано чрез пример от индустриалната практика на авторите – развитието на комплексно изделие – гама високоповдигачи – електрокари и мотокари.

Тази приложимост е илюстрирана на Фигура 9-101. Цялостното проектиране на изделието е извършено при използване на виртуални прототипи от концепирането и структурирането на продуктовата фамилия. Изхождайки от концепцията, създадена чрез виртуален прототип, е разработена модулна архитектура за изграждане на различни конфигурации на гамата високоповдигачи. Наличието на създадения виртуален прототип позволява не само визуализацията на различните варианти на изделието (различни комбинации по товароподемност, тип на задвижването, различни видове мачти), но и тяхното валидиране още в ранните етапи на проектиране.

Разработени са 10 групи мачти за мотокари (по товароподемност и варианти на изпълнение с пневматични или бандажни гуми), както и 5 групи мачти за електрокари – общо 15 групи мачти. Всяка една група съдържа 3 подгрупи – тристепенна мачта, двустепенна със задвижвана карета и двустепенна без задвижване на каретата, при което вариантите стават 45. Всяка една подгрупа от изброените се изпълнява в 6 варианта според наличието на допълнително прикрепвани приспособления или наличието на странично изнасяне на каретата и вилците, което увеличава крайния брой варианти на изпълнение на мачтите на 270.

Наличието на изградена инженерингова мрежа позволява да се работи в екип, включващ групи, разположени в отдалечени географски райони. Например, концептуалната и конструктивна разработка е реализирана от екип в рамките на Европейския Съюз (България и Обединеното кралство), докато производството е организирано в страна от Далечния Изток.

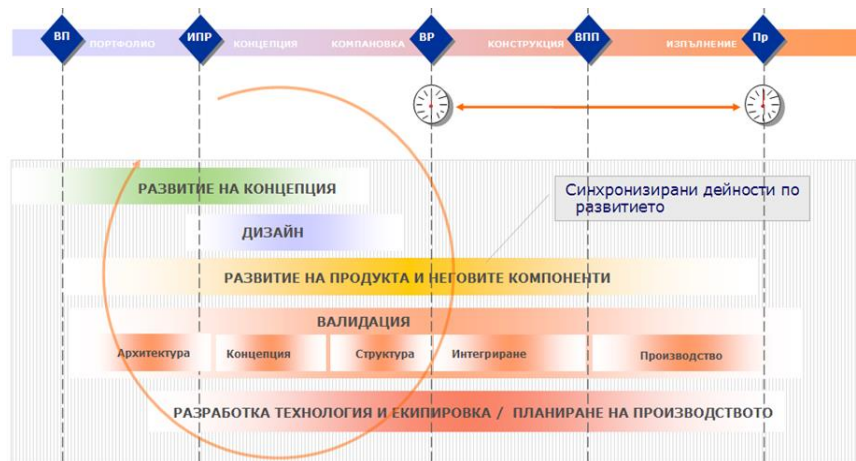
Създаване на продукта коректно!



Фигура 9-101: Жизнен цикъл на фамилия високоповдигачи (мотокари) при използване на подходи от виртуалното инженерство

Целта на разработката е изграждане и валидиране на концепция, основана на модулен принцип, използваща групиране на неговите компоненти в модули, които могат да бъдат третирани като логически единици. Тази концепция дава възможност за по-нататъшно оформяне на фамилията ред, в които различните членове имат едни и същи модули.

Важно разделяне, определящо размер на вариантност, е по товароподемност на машините. Това разделяне определя крайния брой на проектираните машини на общо 43. Тази вариантност се увеличава и при включването на различни опции на компонентите на самата машина, както е показано по-долу, при което вариантите машини надвишават 1000. Този голям брой варианти (продуктово портфолио) не е самоцел, а е реална необходимост, продиктувана от пазара.



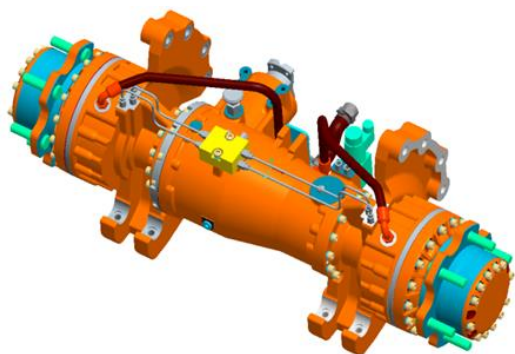
Фигура 9-102: Приложение при развитието на фамилия високоповдигачи (мотокари)

9.7.1. Вариантно проектиране на архитектурата на изделието

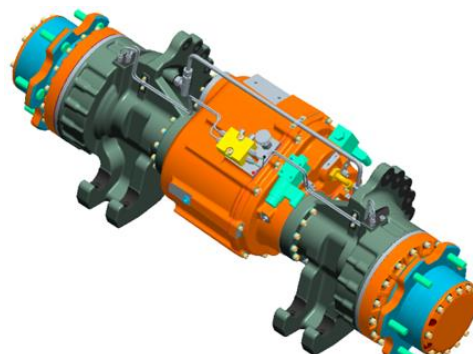
Важно разделяне, определящо размера на вариантността, е товароподемността на машините. Това разделяне определя крайния брой на проектираните машини на общо 43. Тази вариантност се увеличава и при включването на различни опции на компонентите на самата машина, както е показано по-долу, при което вариантите машини надвишават 1000. Този голям брой варианти (продуктово портфолио) не е самоцел, а е реална необходимост, продиктувана от пазара. Информационното осигуряване на такъв брой варианти би било силно затруднено, ако не се ползват технологиите на виртуалното инженерство. От една страна, необходимостта от висока икономическа ефективност на изделията изисква голяма степен на унификация и модулност между отделните варианти, а от друга, сервизната

поддръжка и логистиката, свързани с голям брой варианти, би изисквала значителен ресурс, ако това не е на лице. При всяко едно положение, валидацията на разработката без ползване на виртуален прототип ще бъде свързана с голям разход на време и средства, без директна възвращаемост.

9.7.3. Структуриране. Пример „преден мост“



А/ Едноскоростен вариант, 55kW



Б/ Двускоростен вариант, 75kW

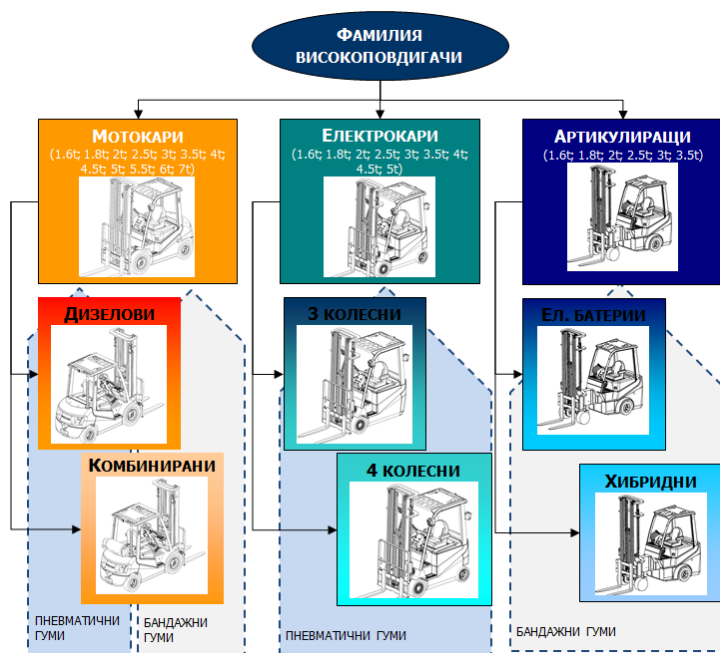
Фигура 9-104: Структура на подвзвел преден мост

Структурирането на едно изделие представлява в своята същност един преходен процес между развитата концепция и създаването на конкретната компоновка. Виртуални прототипи на този компонент на трансмисията са показани на Фигура 9-104.

Разделянето в две групи — според товароподемността и типа на машината, в която се вгражда компонента, е структурирано в няколко отделни варианта.

ИЗВОДИ

- Апробиран е предложеният модулен подход на изграждане на фамилия кари, като се демонстрира композирането и поддържането на една значителна вариантност, обхващаща над 200 отделни компоновки машини за по-ефективно удовлетворяване на потребностите на клиентите и постигане практически на персонализация чрез композиции от налични модули.
- За всяка композиция се генерира в 3D индивидуален ВП – основа за дигитален близък.
- Разработена е иновативна за световния пазар архитектура – за всички големина във фамилията от 1,6 до 5,5 тона се използва една и съща модулна кабина (за разлика от машините, които са с различни размери, водачът е подобен).
- Поддържането на голям брой варианти (стотици варианти и изпълнения) е възможно при използването на системи от типа PLM (Product Lifecycle Management) и др., които са основни елементи на технологията ИНДУСТРИЯ 4.0, като големият брой клиентски композиции налага прилагането на технологията „дигитален близък“.
- Друг аспект е относително краткият срок на създаването ѝ (под 3 години) при малко на брой (5-7 експерти) пряко ангажирани с това специалисти. За сравнение – водещата компания TOYOTA FORKLIFTS е използвала за подобен проект над 3 години и екип от над 50 специалисти (съгласно интервю, осъществено от автора по време на изложението CeMAT 2010, Hannover, DE).



Фигура 9-103: Структура на фамилията високоповдигачи



- Не на последно място трябва да се спомене физическата отдалеченост на разполагане на екипа, създал инженерната разработка (България, Лаб. „CAD/CAM/CAE в Индустрията“ към ТУ-София), маркетинг и мениджмънта (Великобритания) и производството (Тайван). Това, при посочените по-горе срокове на разработка, е възможно единствено при използване на съвременните технологии на виртуалното прототипиране – тази технология и създадените подходи за модулно изграждане от една страна до силно намалено време до достигане на пазара и за индивидуализация на продукта, а от друга – понижава общите разходи за разработката му.



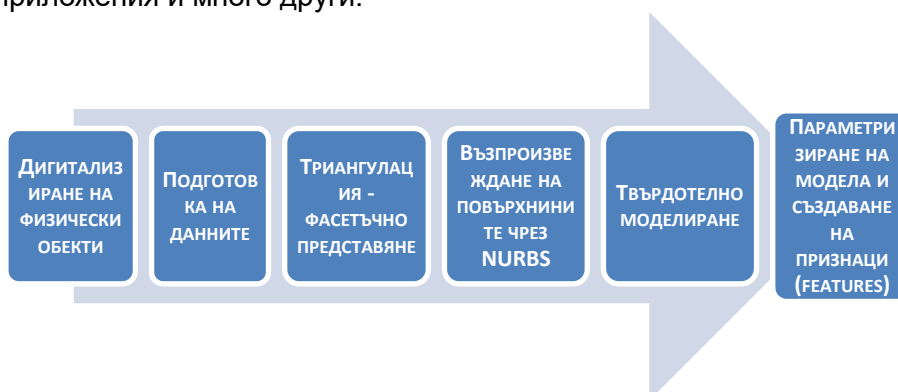
Фигура 9-109: Физически прототипи на изделието и серийно производство

10. АНАЛИЗ НА ПРИЛОЖИМОСТТА НА ВИРТУАЛНИТЕ ТЕХНОЛОГИИ И ФИЗИЧЕСКОТО МАТЕРИАЛИЗИРАНЕ ЗА ИМПЛАНТИ В МЕДИЦИНАТА

10.1. ИЗСЛЕДВАНЕ НА МЕТОДИ ЗА СЪЗДАВАНЕ НА ПЕРСОНАЛИЗИРАНИ ИМПЛАНТИ ЧРЕЗ ИЗПОЛЗВАНЕ ВИРТУАЛНИ И ФИЗИЧЕСКИ ПРОТОТИПИ

10.1.1. Снемане на отпечатък/ директно сканиране

Тези процеси са известни под общото наименование Reverse engineering (реверсивен инженеринг) RE – Фигура 10-2. Тази технология има много приложения, като се включват все повече в документиране или възстановяване на артефакти, верификация на формата и геометрията на изработени по методите на бързото прототипиране образци, създаване на медицински приложения и много други.

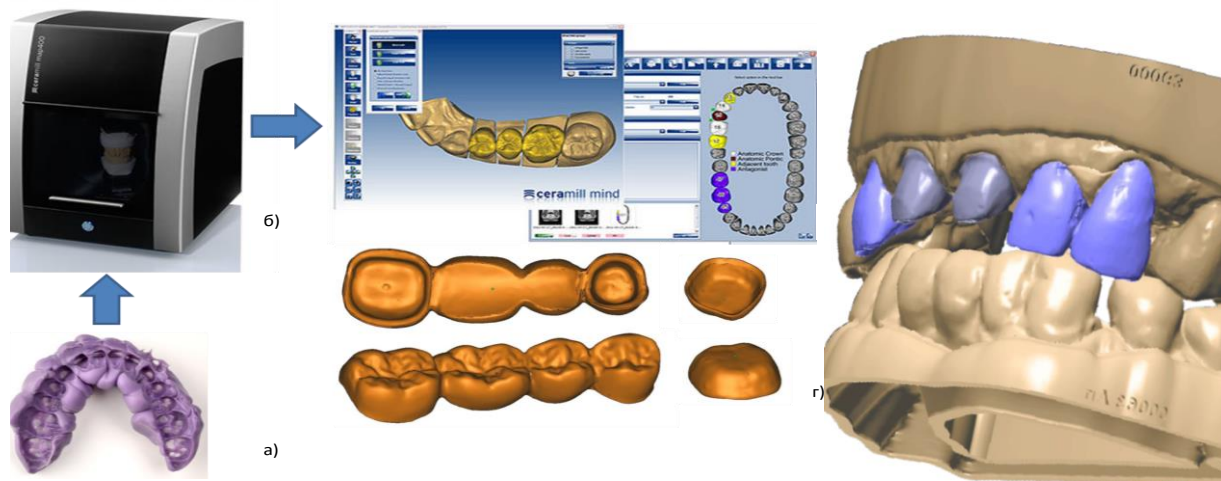


Фигура 10-2: Протичане на процеса ре-инженеринг

При RE се снима масив (облак) от координатни точки (Cloud of Points-COP) с помощта на контактно или безконтактно обхождане на повърхността на физическия образец, който след филтрация и обработване се свежда до мрежа от триъгълници. За съжаление в такъв вид те не са директно използвани в CAD средата. Необходимо е да се осъществи процес, при който това множество от точки, обединено в мрежа, да се превърне в NURBS повърхнини и признаци (features), с които работят CAD системите. Този процес се нарича реконструкция и следва последователността, показана на Фигура 10-2, която наподобява тази, използвана за връщане на геометрия от FEM оптимизация в CAD средата, виж по-горе.

10.1.3. Моделиране на имплантите

По така полученият чрез импортиране твърдотелен модел на сканирания елемент се изгражда като обратен отпечатък твърдотелен 3D модел на съответния зъб (за корона), мост и т.н. Преобразуването от повърхнинен към твърдотелен модел може да се извърши и директно в CAD моделиера.



Фигура 10-9: Обработени обекти

Тук практически се създава точният модел на търсения от стоматолога и клиента краен резултат (мост, челюст, коронка, фасет и т.н.).

10.2. ТЕХНОЛОГИЧНИ МЕТОДИ ЗА ПРОИЗВОДСТВО НА ИМПЛАНТИ

Така напълно готовият детайл трябва да се произведе. Известни са следните 4 метода на производство:

- Чрез директно метално изграждане.
- Чрез отнемане на материал – NC CAM производство.
- Чрез изграждане на формообразуващ инструмент с AM с последващо лееие.
- Лееие по стопяеми модели на AM изграден модел.

10.2.1. CAM – производство

Полученият от CAD системата напълно завършен вид на импланта, който е във виртуален тримерен вид (коронка, мост, челюст, фасет...), трябва да се изготви във физически вид, така че да се постави на пациента.



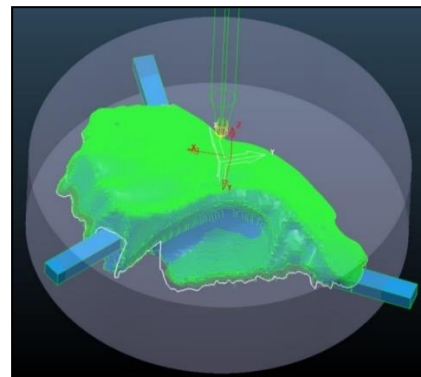
Фигура 10-11: Имплант обработка в CAM среда.



Фигура 10-12: Многофункционален обработващ център за изготвяне на импланти от твърди и свръх твърди материали.

CAM софтуерът, започвайки от геометрията на 3D модела, създава на негова база изходна заготовка (автоматично или ръчно), след което се задават:

- Инструментът/инструментите, параметрите и режимите на рязане.
- Типът на обработка, (Фигура 10-11), в зависимост от технологичните възможности на софтуера и обработващия ЦПУ център (Фигура 10-12) от 3 оси на работа до реална 5-осна такава.
- Избират се подходящи стратегии за обработка в зависимост на наличните в пакета опции и съобразно геометричните елементи на детайла.
- Създава се инструменталният път със съответните подавания.
- Извършва се прецизно виртуално анализиране на процеса на рязане с цел избягване на брака, вследствие от грешки свързани с подрязване, връзване или недостатъчно и неточно обработен детайл. Извършва се анализ за колизии и се извършва процес на постпроцесиране, който всъщност трансформира „сорс“ изходящия код от програмата в код, годен да се прочете от цифровото управление на машината (фреза, център, 3 до 5 оси).



Фигура 10-13: Готов виртуален вид на импланта след „виртуално“ обработване(симулация на процеса).

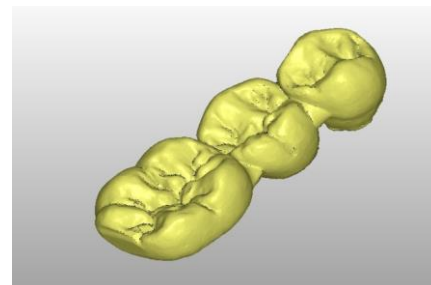
Така новите технологии, силно повлияни от света на машиностроенето, навлизат все повече в денталното производство, довеждайки до качество на по-високо ниво, спестено време и доволни пациенти.

10.2.2. Леене по стопяеми модели или леене във формообразуващ инструмент

ЛЕЕНЕ ПО СТОПЯЕМИ МОДЕЛИ

Като изходни данни за процеса се използват моделите, получени чрез специални пластмаси посредством адитивна технология с 3D принтер (Rapid Prototyping) чрез метода на „Струйна технология“ или подобни. Процесите се използват за изготвяне на високо точни модели на имплантите от восъкоподобен полимер.

Процесът на леене по стопяеми модели се развива по конвенционалния подход: Моделът се залага във формата за леене като „сърце“. След изпичане заложеният модел се стопява и освобождава кухня със същата форма. Следва заливане на стопилката в така получената форма, при което материалът заема кухнята и се получава необходимата форма на импланта.



ЧРЕЗ ИЗГРАЖДАНЕ НА ФОРМООБРАЗУВАЩ ИНСТРУМЕНТ С АМ С ПОСЛЕДВАЩО ЛЕЕНЕ

При този метод в моделиера се създава негатив на желания имплант, за да може в последствие той да се формова в тази негативна форма, като има възможност да се отчете свиването на материалите. Негативният образ на желания имплант се разделя на две основни части, за да може да се отвори след заливане и формоване на импланта. За изработването на импланта чрез формоване се използва специален формообразуващ инструмент, наречен „форма“, която се състои от две главни полуформи. Получаваните отливки могат да имат много тънки стени – от 0,3 до 0,5 mm. Прибавките за механична обработка са минимални – 0,2-0,7 mm, а често пъти отливките са с много гладка повърхност, което не налага провеждането на механична обработка.

Фигура 10-14: CAD модел на имплант

ДИРЕКТНО МЕТАЛНО ИЗГРАЖДАНЕ НА ИМПЛАНТА (SLM – СЕЛЕКТИВНО ЛАЗЕРНО ТОПЕНЕ)

Това е една от най-новите технологии и се явява първият метод за бързо прототипиране, при който метален прах с размери между 10 и 45 μm се използва като изходна суровина, и крайният резултат са плътни детайли. Важно предимство е липсата на органични компоненти. Тук е разгледан тестов пример за изпълнение на определен брой зъбни коронки чрез адитивно производство. Използваната машина е модел SLM 125HL, показана на Фигура 10-17. Апаратурата се помещава в лаборатория „CAD/CAM/CAE в Индустрията“ към Машинно-технологичния факултет на „Технически университет – София“.



Фигура 10-17: Общ изглед на машината.

SLM определено превишава в значителна степен познатите методи на работа, защото:

- Не се използват никакви инструменти.
- Постиганото качество на продукцията е добро.
- Могат да се използват като изходна суровина много различни метали и сплави, като легирани стомани, кобалт – хромови сплави, Inconel 625 и 718 и титаниеви сплави Ti6AlV4.
- Крайното метално изделие е и крайния продукт, готов за директна употреба.
- Може да се изгради сложна сглобена единица с впечатляваща точност.

Технологията, поради изброените свойства, се явява прогресивен избор за изграждането на метални импланти.

ИЗВОДИ

- **Анализирани са възможностите на най-разпространените технологии за изготвяне на костни и зъбни импланти. Всички те имат предимства и недостатъци при производството, в зависимост от геометрията и структурата на импланта. Например, персонализираните гръбначни импланти са за предпочитане, структурирани във фрактална решетка, което се произвежда само чрез SLM процес.**
- **Основните недостатъци на технологиите за 3D печат са свързани с трудния и времеемък инженерингов и производствен процес, разнообразието от материали за био-печат е ограничено, цената на имплантите и някои ограничения на наличните в момента 3D принтери. В момента наблюдаваме постоянно подобрене във всички гореспоменати аспекти.**
- **Използването на SLM технологията за производство е относително скъпо и има ограничена якост на материала. Препоръчително е да се използва технологията за производство на импланти, чиято геометрия помага за по-добро заемане на работната зона, така че да се намали процентът на използвания прахообразен материал.**
- **Технологията има своите предимства в персонализираното имплантиране, когато геометрията е много сложна и не може да се произвежда с други методи или когато са необходими решетъчни фрактални структури.**
- **AM формите за леене във формообразуващ инструмент са добро решение, като се има предвид цената и времето за производство на лярската форма. Изискват допълнително ръчно постпроцесиране.**
- **HSM има превъзходство над SLM технологията и AM формите по отношение на точност и якост на материала поради липсата на термични или подобни процеси. Този метод също дава често и най-кратко общо време за производство на имплантите при сравнително по-прости форми и изисквана висока якост на изделието. Ниската ефективност на материала(под 30%) може да се отбележи като недостатък на процеса.**

10.4. РЕКОНСТРУИРАНЕ ОТ ТОМОГРАФСКИ ИЗОБРАЖЕНИЯ И ИЗГРАЖДАНЕ С АДИТИВНА ТЕХНОЛОГИЯ НА СУБПЕРИОСТАЛНИ ИМПЛАНТИ

10.4.1. Въведение

В нашето съвремие възстановяването на частично или цялостно загубените зъби се прави масово чрез поставяне на вътрекостни зъбни импланти и последващо полуподвижно или неподвижно протезиране.

Конструкция на субпериостални импланти

Субпериосталните импланти са една от първите форми импланти въобще в по-новата история на имплантологията. (Фигура 10-28).



Фигура 10-28: Триподалният имплантат на Linkow. (Linkow & Chercheve, 1970)

10.4.3. Технологични етапи при създаване на субпериостални импланти

СНЕМАНЕ НА ТОМОГРАФСКИ ИЗОБРАЖЕНИЯ

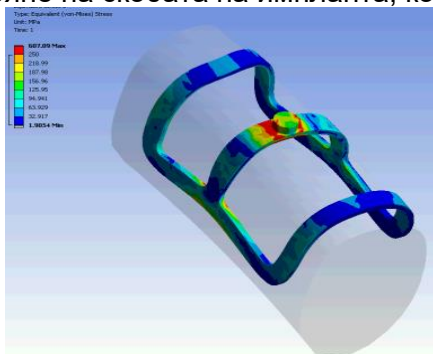
На базата на опитите, извършени в МТФ при ТУ-София, с помощта на томограф е създаден точен 3D компютърен модел на челюстта, която е изработена като физически прототип от пластмаса (ABS) чрез използването на налична във факултета прототипираща машина, както е показано на Фигура 10-17.

Технологията позволява още на виртуално ниво, на основата на геометрията на челюстта, която идва от томографския скенер, прецизно да се моделира виртуален субпериостален имплант в CAD 3D пакет, чийто модел е визуализиран на Фигура 10-48.

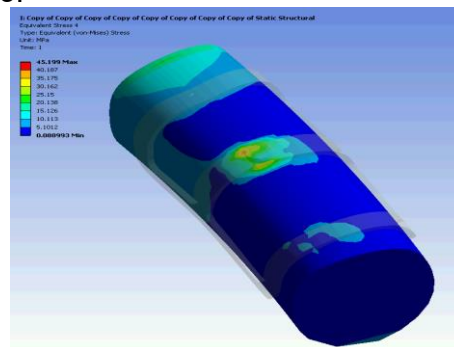
10.4.6. Изследвания с ВП за оптимизация на натоварването при дъвкателен процес върху костта

С цел по-равномерно разпределяне на натоварването при дъвкателен процес (около 600 N) се препоръчва да се задава хлабина между реброто, носещо главата, и костта. Якостта и податливостта на импланта е изследвана с ВП, който позволява оптимизация на структурата и на геометрията на импланта, както и на контактното разпределение на натоварването по повърхността на костта. По -долу е направен виртуален прототип на импланта с цел намирането на оптимална форма на импланта, която да натоварва максимално равномерно костта.

Получените резултати показват, че натоварването се разпределя по-благоприятно върху по-голяма площ при наличието на такава минимална хлабина. Трябва да се има предвид, че при натиск с увеличаване на хлабината между СИ и костта, се получава разтваряне на скобата на импланта, което е нежелано.

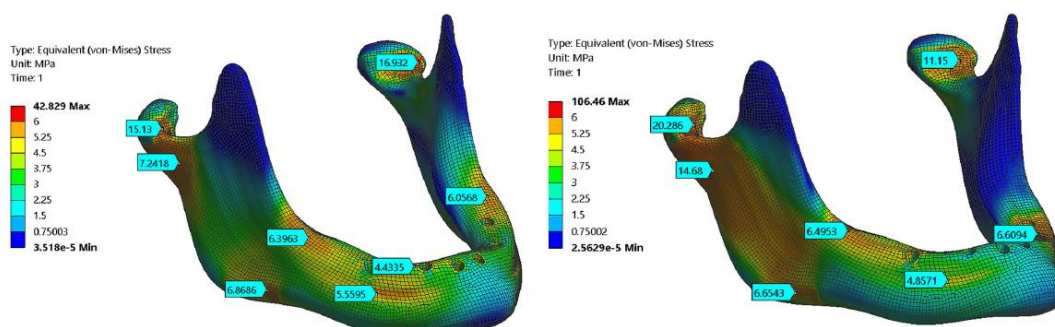


Фигура 10-40: Поле на разпределение на напреженията на СИ, МРa



Фигура 10-41: Поле на разпределение на напреженията на костта, МРa

Ясно се вижда, че единствено е натоварена главата на натиск и от нея се предава директно на костта. Останалата част от СИ почти не носи.



Фигура 10-45: Поле на разпределение на напреженията на костта, МРа

Готов субпериостален имплант може да се види на картината от по-долу, Фигура 10-46.



Фигура 10-46: Снимка на физически изготвен субпериостален имплантат, разположен върху прототип на мандибулната челюст също създадена чрез адитивна технология – отлагане наразтопен материал(FDM) – от материал ABS.

На Фигура 10-46 също така е показан крайният резултат на демонстрация на цялата композиция, заедно със зъбите, присъединени към импланта и в едно с прототипната мандибулна кост. Така, с помощта на прототипната мандибулна челюст се дава възможност на хирурга да бъде уверен за разполагането на елементите, включително скрепителните винтове и тяхното разположение в костта, с което да осъществи много точно планиране на операцията преди да се започне същинската хирургична интервенция.



Фигура 10-48: Имплант, изготвен по класическият способ (горе) и с дигитални технологии (долу) – **отпада една операция на пациента**

ИЗВОДИ

- Предложен и валидиран е нов метод за изграждане на импланти, базиран на компютърна томография, 3D реконструкция, чрез която се създава 3D модел на изследваната област на челюстта, виртуално се моделира субпериосталният имплант и чрез адитивно производство се изготвя физически персонален субпериостален имплант.
- Субпериосталният имплант е конструктивно оптимизиран с помощта на ВП за оптимално разпределение на дъвкателното натоварване върху челюстта и за да се осигури оптимална коравина на импланта.
- С помощта на 3D принтирана прототипна мандибулна челюст се дава възможност на хирурга да осъществи много точно планиране на операцията, преди да се започне същинската хирургична интервенция.
- Предложеният иновативен метод създава удобство за пациента и пести здравен ресурс, защото при този метод се осъществява само една хирургическа интервенция, свързана с поставянето на импланта, а не две, както е по конвенционалната технология до сега, с което се спестява значително време на пациента.

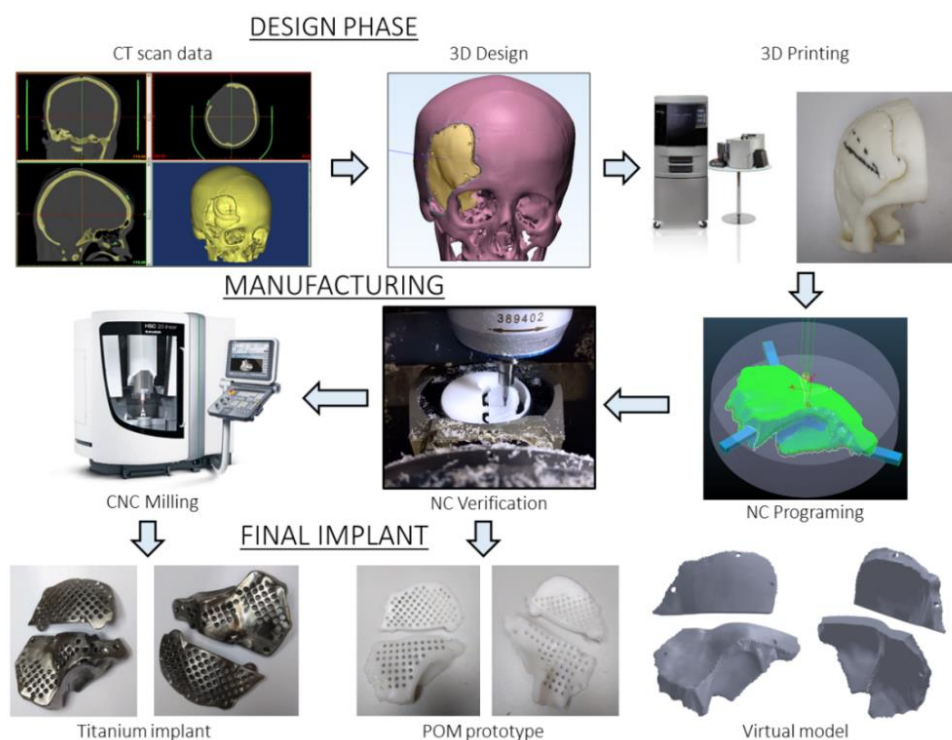
10.5. ИЗСЛЕДВАНЕ НА МЕТОДИ ЗА 3D РЕКОНСТРУКЦИЯ И МОДЕЛИРАНЕ НА БАЗАТА НА ТОМОГРАФСКИ ДАННИ ПРИ СЪЗДАВАНЕ НА ПЕРСОНАЛИЗИРАНИ ЛИЦЕВО-ЧЕРЕПНИ ИМПЛАНТИ ЧРЕЗ ИЗПОЛЗВАНЕ ВИРТУАЛНИ И ФИЗИЧЕСКИ ПРОТОТИПИ

Реконструкцията на лицево-черепната част е изключително предизвикателство, дори за най-опитните хирурзи. Някои от най-важните фактори, които допринасят за сложността, са анатомията и наличието на жизненоважни структури в близост до засегнатата част, уникалността на всеки дефект и шансовете за инфекция. Предложеният иновативен метод за организация на работния процес за CAD/CAM изработени импланти е показан на Фигура 10-49 и е описан накратко по-долу.

Особеното тук е, че освен виртуалната подготовка – реконструкция на черепната област по томографски сканирани изображения, се прилага и двустъпково прототипиране.

В следващите части се подчертават предимствата на 3D моделирането и производството на импланти за краниопластика.

Към дизайна на персонализираните лицево-черепни импланти е необходимо да се интегрират съседните анатомични структури. Софтуерът спестява и много време, защото премахва първата стъпка на реверсивното инженерство, а именно, превръщане на данните от пациента в тримерен модел, в CAD формат (Фигура 10-50).



Фигура 10-49: Иновативен метод за проектиране и производство на CAD/CAM изработени импланти.

Първата стъпка от подготовката на примерния модел включва създаване на очертанието на черепната равнина около травмираната част.

Следващата стъпка от създаването на импланта е използването на здравата геометрия на черепа, като се изгражда огледален образ. След ръчното напасване на реалния модел с огледалния, имплантът се създава с помощта на вече създадената кривина около травмата. Така се гарантира сходна геометрия между здравата и увредената част на черепа и се гарантира добър преход около импланта (Фигура 10-51).

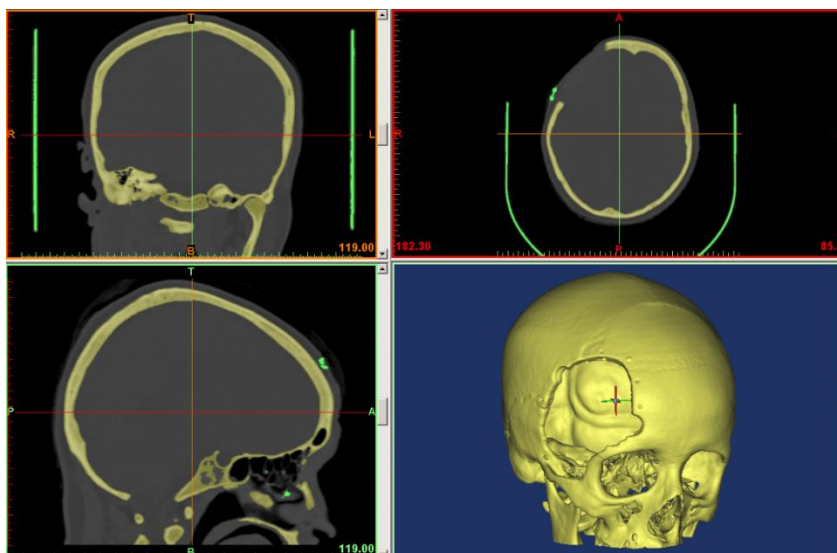
Със създаването на прототип, чрез послойно изграждане, имплантът може да се разгледа физически и да се обсъди с лекарите, отговорни за операцията. Разглеждат се формата и размерите, както и напасването на място при пациента.

Използван е 3D принтерът FDM Dimension Elite на Stratasys, наличен в лабораторията "CAD/CAM/CAE в индустрията" за създаване на импланта, показан на Фигура 10-52.

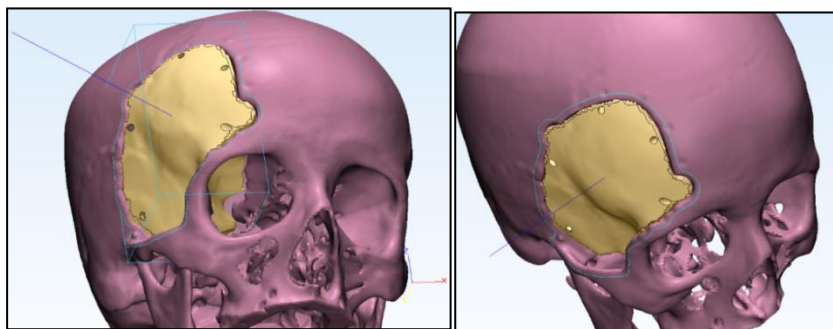
За физическата изработката чрез отнемане на материал се използва фрезови център DMG Ultrasonic 20, който също е наличен в лабораторията "CAD/CAM/CAE в индустрията" към Техническият Университет-София.

Специални инструменти са подбрани за предстоящото обработване на импланта. След избиране на заготовката, материала и работните инструменти, нужни за неговата обработка, може да започне следващата стъпка по създаване на работната програма.

Едно от свойствата на софтуера, е, че той позволява внедряване на работната среда за конкретно използваната машина и по-специално на дигиталният ѝ близък (ДБ). В случая това е обработващият център DMG Ultrasonic 20, неговата работна среда и процеса на симулиране са показани на Фигура 10-55.



Фигура 10-50: Импортиране на томографските данни в софтуера Mimics



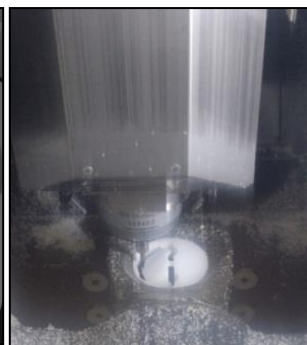
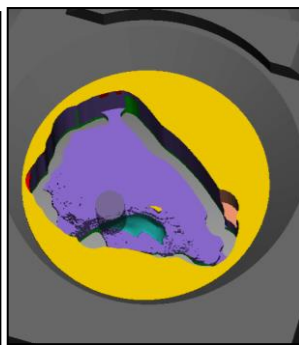
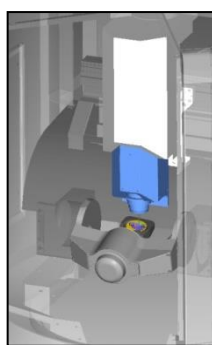
Фигура 10-51: Финален примерен вид на импланта



Фигура 10-52: 3D принтирания имплант с част от черепа



Фигура 10-57: Двете части на импланта в крайния си вид

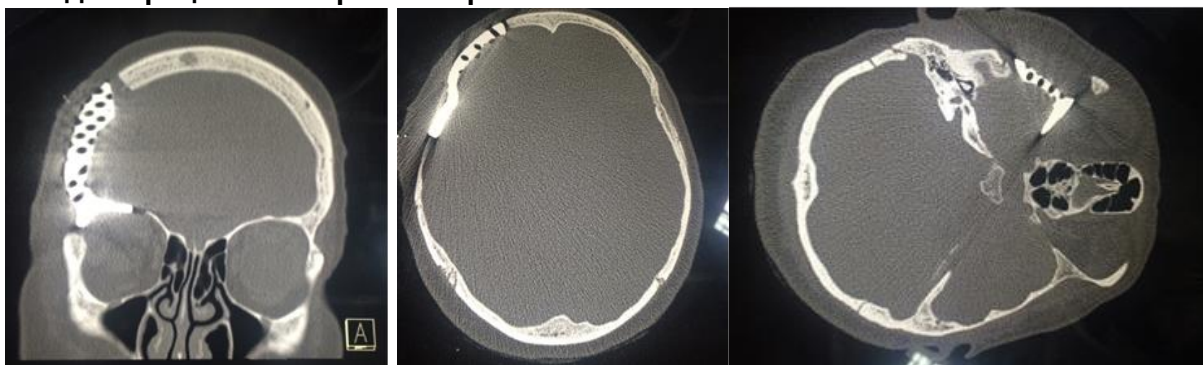


Фигура 10-55: Работна среда на обработващия център и симулация на фрезовия процес

Резултатите от операцията по имплантиране са показани на Фигура 10-58, те демонстрират как напредъкът в медицината и инженерството са позволили създаването на резервни части за човешкия организъм с повишена точност, въпреки сложните геометрични форми. Изображенията показват съвпадането на контура на повърхнините на импланта и черепа. Пациентът показва бързо възстановяване след операцията и бързо възприемане на импланта.

ИЗВОДИ

- Разработена и апробирана в клинични условия е иновативна методика за създаване на персонализирани лицево-черепни импланти на основата на обработка на томографски изображения и реконструиране на костната система с тримерно моделиране на липсващата част (с използване на огледална трансформация от съществуващата част на костта от другата половина), междинно прототипиране от полимер за „проба при пациента“ и ефективно планиране на операцията.
- Резултатите от операцията по имплантиране демонстрират съвпадането на контура на повърхнините на импланта и черепа. Пациентът показва бързо възстановяване след операцията и бързо възприемане на импланта.



Фигура 10-58: Томография на пациента две седмици след операцията

10.6. МЕТОДИКА ЗА ИЗРАБОТКА НА ПЕРСОНАЛИЗИРАНИ ИМПЛАНТИ ЗА КРАНИОПЛАСТИКА БАЗИРАНА НА ДИРЕКТНО БЪРЗО ПРОИЗВОДСТВО НА ФОРМООБРАЗУВАЩИ ИНСТРУМЕНТИ

С натрупания опит в решаването на задачи в сферата на черепните импланти ни бе предоставена възможност да работим по най-тежкия случай в лекарската практика на неврохирургията на УМБАЛСМ "Н.И.Пирогов", причинен от фиброзна дисплазия (ФД).

За да спасят зрителния нерв, неврохирурзите са премахнали голяма част от засегнатите кости. При лечението на пациента е необходимо да се извърши краниопластика.

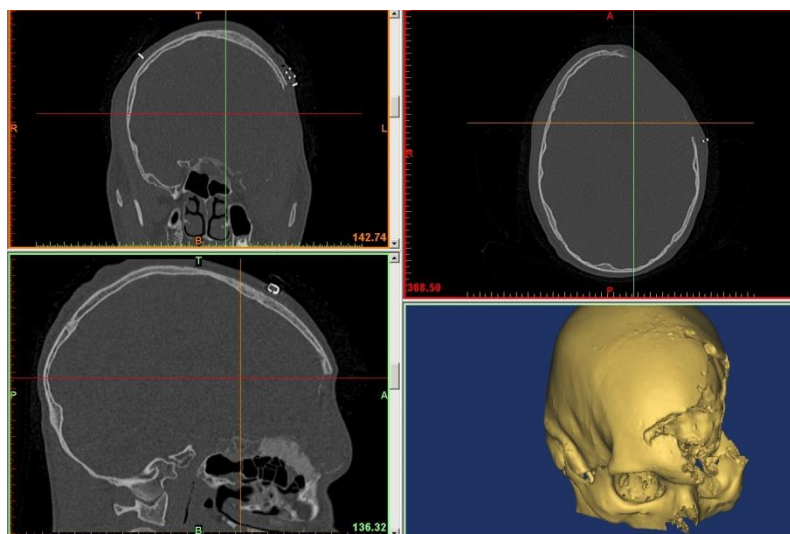
За постигане на целта са използвани най-съвременните технологии, базирани на 3D био-моделиране, където в първата фаза данните от томографското изследване на пациента се използват за 3D реконструкция на засегнатата област. След редица обработки са изолирани единствено важните костни структури на черепа, показани на следващата фигура (Фигура 10-59). На Фигура 10-59 също така е показано състоянието на черепа след операцията. Един от основните проблеми при реконструирането на дефектната кост е липсата на какъвто и да е модел на дефекта, по който инженерът да се ръководи. Единствената възможност е да се направи огледален образ на лявата част на черепа, която както бе изяснено по-нагоре в текста, не е напълно симетрична с дясната. Процесът по

цялото формиране включва и използване на инструменти за така нареченото директно моделиране на сложни повърхнини. Създава се огледален образ на черепа по характерни анатомични точки.

След това се пристъпва към моделиране на импланта. Процесът протича при съгласуване с лекарския екип, който дефинира изискванията за околния контур, така че да имат възможност за манипулиране на импланта по време на операцията и да се избегне засягането на нерви при поставянето му. Окончателната форма на импланта е представена на Фигура 10-63.

Поради гореспоменатите ограничения по отношение на избора на материал за импланта като възможен вариант за изработка на такова персонализирано изделие най-подходящи са технологиите за бързо изготвяне на формообразуващи инструменти (Rapid Tooling).

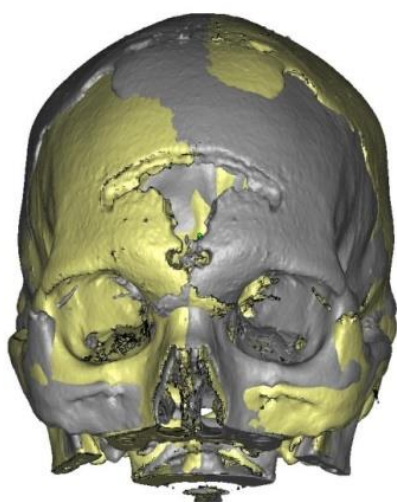
Последната стъпка при изработка на импланта е инжектирането на PMMA материала в предварително обмисления инструмент, произведен чрез адитивна технология. формата на импланта е сложна, тъй като за изграждането ѝ са взети под внимание естетически и функционални съображения, а не технологични то тогава, за да се извади готовият детайл формата е необходимо формата да има известна податливост или да се разрушава частично.



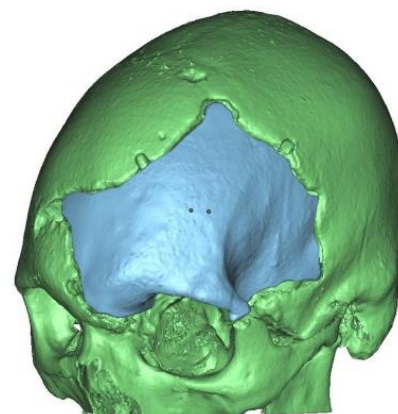
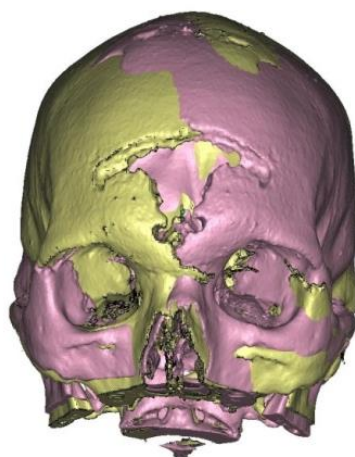
Фигура 10-59: Изолирани костни структури на черепа

Заклучение

- Разработен е специален метод за прилагане на хибриден подход при изготвяне на импланти. Използват се технологиите за бързо изготвяне на формообразуващи инструменти с адитивна технология (материализация на негативно изображение) и формоване на необходимия имплант в този еднократен инструмент до втвърдяването му.
- Предложеният метод за бързо физическо и виртуално прототипиране позволява в кратки срокове да се проектират и изработват животоспасяващи импланти, които дават възможност за все повече успешни трансплантации.

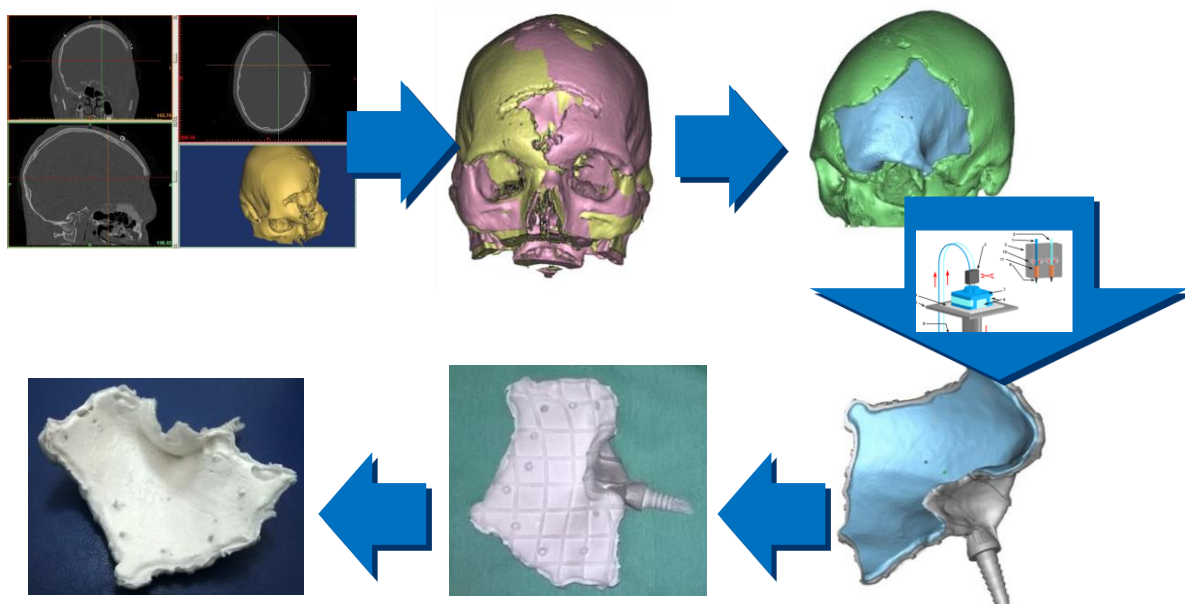


Фигура 10-62: Итеративно възстановяване



Фигура 10-63: Окончателна форма на импланта

Със съвременните методи за тримерно моделиране е възможно създаването на сложни, персонализирани изделия, спазвайки уникалната разработена методика показана на Фигура 10-68.



Фигура 10-68: Методика за изработка на персонализирани импланти за кранеопластика базирана на директно бързо производство на формообразуващи инструменти

ИЗВОДИ ОТ ГЛАВА 10

- CAD/CAM технологиите и адитивните технологии (3D печат) се прилагат все по-широко в различни сфери на медицината – предоперативно виртуално 3D планиране, подготовка и симулация на предстоящата оперативна процедура; информираност и образованост на пациента; производство на индивидуални, поръчкови импланти за краниална хирургия (черепни дефекти), производство на индивидуални, поръчкови импланти за спинална хирургия (неопластични лезии и травматични увреждания) и др., чрез демократизация на персонализирания и индивидуализиран подход към пациента.
- Във всички приложения процесът може да бъде описан като подобен и включва: сканиране на зоната за интервенция на пациента, реконструиране на костната система, концепция на индивидуализирания имплант, проектиране, инженеринг и производство с цялостен контрол и мониторинг на всяка стъпка.
- 3D технологиите имат потенциал да осигурят по-добро планиране, по-добри резултати, по-кратко време на работа, по-ниска степен на усложнения, съкратен период на възстановяване и престой в болница и като резултат – по-добри грижи за пациентите.

ОБЩИ ИЗВОДИ

С изпълнението на поставените в дисертационния труд цел и предложената нова парадигма на проектиране на иновативни продукти във виртуална среда, могат да се формулират следните основни изводи, произтичащи от изпълнените задачи и постигнатите резултати от изследванията:

- ✓ Защитена е тезата за необходимост от нова парадигма в проектантския процес. Развити са иновативни стратегии, методи и подходи, включително на модулен принцип, за бързо специфициране и концепиране на комплексни архитектури на иновативни продукти с намалена итеративност, при изпълняване на динамичните изискванията на клиентите спрямо функционалност, вариантност и не на последно място – на цена на притежанието.
- ✓ Създаден е матричен подход за ефективно разпределение на необходимите функции между различните системи (механичните, електронните, сензорните и програмните), с цел постигане на ниска себестойност и оптимална надеждност при композиционно изграждане с максимално използване на налични комерсиални компоненти.
- ✓ Предложена е иновативна стратегия и „фрактален метод“ за композиционно развитие на нови продукти със сложни вариантни и модулни структури, позволяващ най-точно и адекватно моделиране, симулиране и изследване на поведението на разработвания обект на възможно най-ранен етап, както и за развитието на подобрени варианти (оптимизация).
- ✓ Анализирани са специфични видове инженерни анализи като елемент на ВП по отношение на приложимост и ефективност в процеса на развитие на нови продукти.
- ✓ Изследвани са възможностите за еволюция на виртуалния прототип към технологията „дигитални близнаци“, позволяваща най-точно и адекватно моделиране, симулиране и изследване на поведението в работни условия на номиналния разработван продукт, а в последствие на индивидуалния физически продукт и през експлоатационния му период за изграждане на кибер-физични системи.
- ✓ Разработен, валидиран и апробиран е методът на „Бялата и черната кутия“ с използване на три предложени подхода, целящи „самообучение“ чрез фина настройка на специфични аспекти на поведението на виртуалните прототипи чрез обратна връзка с тестови данни от физическо прототипиране. Тези подходи са апробирани в реални проекти при идентификация и оценяване на конкретни физични величини и/или процесни параметри за постигане на високи нива на доверие в симулационните резултати.
- ✓ В резултат на предложените методи и подходи са разработени и внедрени под ръководството на автора в индустриалната практика редица иновативни проектни решения за индустриални партньори от страната и чужбина, като редица нови решения са патентовани (9 международни патента), а някои от тях са достигнали до световните пазари (пример иновативната ударна квази резонансна система е световна новост, удостоена с редица награди).
- ✓ Предложен е нов „LL“ метод, който е базиран на новата парадигма на „фрактално структуриране“ на проектантския и прототипен процес в замяна на широко използваните, но отдалечаващи се в редица случаи от практиката „V/W“ модели. Така се осигурява възможност за стъпковото надграждане на ВП в хода на създаването и валидирането му чрез фрагментарни ФП за общо намаляване на времето за развитие и валидиране на изделиято в различните стадии на проекта,

като се осигурява най-ефективният баланс с изготвянето на физически прототипи. Подходите са демонстрирани с прилагането им в индустриални проекти.

- ✓ **Анализирани са специфичните изисквания, начините на работа и особеностите на създаването и производствените процеси в сферата на здравеопазването и имплантологията. Доказани са големите възможности на виртуалните и адитивните технологии да променят парадигмата в имплантологията, отваряйки възможности за ускоряване на процесите, съкращаване на броя или сложността на хирургичните операции и на времетраенето на хирургичните интервенции.**
- ✓ **Предложени са и са реализирани три практически метода за прилагане на технологиите на виртуалното прототипиране и бързото физическо изграждане в съчетание с медицински знания за персонализация на костни и зъбни импланти с адекватно дефиниране на необходимата им геометрия. Тези методи революционизират начина на имплантирането в пациента, чрез виртуално или физическо прототипиране на елементи от процеса, за добро планиране на хирургичните операции и постигане на точен и адаптиран към обкръжаващата костна система начин на присъединяване, с включване на кинематиката и товарните потоци на костната система.**
- ✓ **Разработена и апробирана в клинични условия е иновативна методика за създаване на персонализирани лицево-черепни импланти на основата на обработка на томографски изображения и реконструиране на костната система, с тримерно моделиране на липсващата част/части (с използване на огледална трансформация от съществуващата част на костта от другата половина), междинно прототипиране от полимер за „проба при пациента“ и ефективно планиране на операцията.**
- ✓ **3D технологиите имат потенциал да революционизират здравеопазването с динамични темпове, като осигурят по-добро планиране, по-добри резултати, по-кратко време на работа, по-ниска степен на усложнения, съкратен период на възстановяване и престой в болница и като резултат – по-добри грижи за пациентите.**

III. ПРИНОСИ

А) НАУЧНИ ПРИНОСИ

1. Предложен е нов фрактален метод при композиране на сложни системи за бързо осъществяване на вариантно развитие и модулно изграждане чрез използваемост на компоненти, целящ голяма гъвкавост и ефективност на продуктовете и процесната организация в целия жизнен цикъл на продукта.
2. Разработен и апробиран е нов принцип и метод на работа на пневматично-вакуумни механизми за ударни системи, функциониращи в квази резонансен режим с повишена ефективност на енергията на удара. Предложеният метод и конструкцията са защитени с български и световен патент.
3. Предложен е нов метод, наречен „БЯЛА/ЧЕРНА КУТИЯ“ за подобряване на ефективността и ефикасността на виртуалния прототип (ВП), разглеждан като „бяла кутия“ чрез обратна връзка с данни от тестове с физическите прототипи (по модела „черна кутия“) и организиране на вътрешен за ВП симулационен микро цикъл за фина калибрация в итеративна свързаност и „самообучение“ на ВП.
4. Предложен е нов „LL“ метод за развитие на нов продукт, основаващ се на еволюционно изграждане на виртуалния прототип и фрагментарно на физическите прототипи, при който процесът на развитие върви хибридно и успоредно – концепцията и архитектурата „от горе на долу“, виртуалният прототип „от долу на горе“, а физическият прототип – фрагментарно по нива.

В) НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

1. На основата на модифицирана матрица на функциите за качество (QFD) е предложен подход за идентификация на потребностите на потребителите (с използване на прототипи) и трансформирането им в технически спецификации.
2. Създаден е матричен метод за фамиленото структуриране, основан на минимално функционално-стойностното препокриване между членовете на фамилията при максимално високо ниво на унификация.
3. Предложен е матричен подход за дефиниране на функционалната архитектура на продукта с разпределяне на необходимите функции между основните системи в три стъпки и в три под-матрици.
4. Предложени са два нови подхода (генеративен и сравнителен) за успешно обратно интегриране в процеса на развитие на продукта на резултатен геометричен модел от оптимизация с постигане на „жива“ геометрия и свързаност.
5. Развит е метод за предварителна оценка на нивото на доверие в резултатите от мултифизични симулации с виртуален прототип (ВП) чрез обратна връзка с измерени параметри от физически тестове върху ФП, като са предложени три възможни подхода за оценка на степента на достоверност на резултатите от виртуалните прототипи – начален, междинен и финален.
6. Предложен е хибриден аналитично-симулационен подход за проектиране на еластични свързващи елементи, позволяващ „самообучение“ чрез интегриране на тестови резултати с прилагане на метода „БЯЛА/ЧЕРНА КУТИЯ“ и формиране на система, основана на натрупване на знание.
7. Предложен е комбиниран структурно-параметричен подход за оптимизация на формата и параметрите на еластична система чрез ВП при добре дефинирано пространство от ограниченията и твърди функционални изисквания с прилагане на евристичен подход за създаване на варианти концепции и параметрична оптимизация на генерациите чрез виртуален експеримент.
8. Предложен е подход за оценка влиянието на параметрите на конструкцията върху акустичните показатели на Ж. П. колело и е доказана ефективността на тази оценка с използване на виртуален прототип в ранния етап на проектиране.

Подходът е доказан чрез сертификация от TUV и изискванията на индустриалните стандарти за акустичното поведение на железопътни колела чрез референтен физически тестов образец. Това е една съществена стъпка в изграждането на нова обща методология за акустично изследване на основата на ВП.

9. Предложен и валидиран е нов метод за изграждане на импланти, базиран на компютърна томография, 3D реконструкция и създаване на 3D модел на изследваната област на челюстта, виртуално изграждане и адитивно изработване на физически персонален субпериостален имплант.
10. Разработена и апробирана в клинични условия е иновативна методика за създаване на персонализирани лицево-черепни импланти на основата на обработка на томографски изображения и реконструиране на костната система с тримерно моделиране на липсващите части (с използване на огледална трансформация от съществуващата част на костта от другата половина на черепа), междинно прототипиране от полимер за „проба при пациента“ и ефективно планиране на операцията.
11. Разработен е специален метод за прилагане на индиректен подход при изготвяне на импланти. Използват се технологиите за бързо изготвяне на формообразуващи инструменти с адитивна технология (материализация на негативно изображение) и формоване на виртуално изградения имплант в този еднократен инструмент до втвърдяването му.

С) Приложни приноси

1. Разработен и валидиран е мултифизичен виртуален прототип на пневматично-вакуумен ударен механизъм.
2. Изследвани са общите характеристики, областите на ефективно приложение, както и предимствата и недостатъците на адитивните методи. В табличен и лесен за използване вид са оценени някои от по-важните характеристики на промишлено използваните адитивни методи.
3. Установено е, че комбинираната обработка на фрезование с ултразвук е ефективно да се използва при твърди и крехки материали, включително на неметални материали като стъкло, порцелан, циркониев диоксид стъклени влакна и др.
4. Направена е оценка на технологиите за адитивно производство и бързо прототипиране по отношение на точност чрез еталонен модел, на който е осъществен размерен анализ за определяне точността на процеса и конкретни геометрични елементи.
5. Предложените методи на фрактално проектиране, модулно изграждане, „БЯЛА/ЧЕРНА КУТИЯ“ и „LL“ метода са апробирани в условията на индустриални проекти и са демонстрирани добри резултати по отношение на ефективност и ефикасност.
6. За практическо приложение на разработения комбиниран структурно-параметричен подход е разработен софтуерен инструмент за подпомагане на проектирането на изчисления на етап разработка на еластични свързващи елементи, без начален геометричен модел. Продуктът е внедрен в условията на водещата инженерингова компания Visteon Bulgaria, като съществено намалява времето за проектиране в сравнение със създаване на детайлен ВП.
7. Апробиран е предложеният модулен подход на изграждане на фамилия кари, като се демонстрира композирането и поддържането на една значителна вариантност, обхващаща над 200 отделни компановки машини за по-ефективно удовлетворяване на потребностите на клиентите и постигане практически на персонализация чрез композиции от налични модули. За всяка композиция мотокар се генерира в 3D индивидуален ВП – основа за дигитален близък, което се осигурява от технологиите от виртуалното инженерство и Индустрия 4.0.
8. Анализирани са възможностите на най-разпространените технологии за изготвяне на костни и зъбни импланти. Посочени са предимствата и недостатъците им при производството, в зависимост от геометрията и структурата на импланта. Очертани са областите на ефективно приложение.

9. Постигнато е много добро разпределение на дъвкателното натоварване върху челюстта от субпериосталния имплант, чиято конструкция е оптимизирана с помощта на ВП, за да се осигури оптимална коравина на импланта.
10. Предложеният индиректен подход за бързо виртуално изграждане и физическо формоване на импланти във формообразуващ адитивно изграден инструмент позволява в кратки срокове да се проектират и изработват животоспасяващи импланти, които дават възможност за все повече успешни трансплантации.

IV. Публикуване, научни направления и дисеминация.

По важните резултати от тази работа са представени в два монографични труда:

- **Тодоров, Г., К. Камберов**, Виртуално инженерство. CAD/CAM/CAE&PLM Технологии, ISBN 978-619-7171-15-0, Дайрект Сървисиз ООД, 704 стр., София, 2015г.
- **Тодоров, Г., К. Камберов**, Инженерни анализи, ISBN978-619-7171-63-1, Дайрект сървисиз ООД, 280 стр., София, 2018г.

Както и в 30 публикации:

A) SCOPUS

1. **Todorov, G.**, Kamberov, K., Pantaleev, T., Koprarev, N., Elastic rail clip design development, based on virtual prototyping, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 393(1),012120, 2018
2. **Todorov, G.**, Kamberov, K., Design concept evaluation of tooth implant-abutment interface based on engineering analyses using virtual prototypes,2018,Journal of the Balkan Tribological Association 24(3), pp. 521-530
3. **Todorov, G.**, Sofronov, Y., Kyurkchiev, G., Benchmarking of different additive technologies as rapid manufacturing techniques,2018Journal of the Balkan Tribological Association, 24(3), pp. 477-483
4. **Todorov, G.**, Kamberov, K., Kralov, I., Ignatov, I., Influence of the contact roughness upon railway monobloc wheel acoustic behaviour on virtual prototyping approach, 2017, AIP Conference Proceedings
5. **Todorov, G.**,Kamberov, K.,Semkov, M.,Thermal CFD study and improvement of table top fridge evaporator by virtual prototyping, 2017 Case Studies in Thermal Engineering 10, pp.434-442(Citations-2)
6. **Todorov, G.**, Todorov, T., Ivanov, I., Valtchev, S., Klaassens, B., Tuning techniques for kinetic MEMS energy harvesters 2011 INTELEC, International Telecommunications Energy Conference (Proceedings), DOI: 10.1109/INTLEC.2011.6099874 (Citations -7)

B) Web of Science

1. **Todorov, Georgi**; Kamberov, Konstantin. Virtual Prototyping Of Drop Test Using Explicit Analysis, : 43rd International Conference on Applications of Mathematics in Engineering and Economics (AMEE) 2017 PROCEEDINGS OF THE 43RD INTERNATIONAL CONFERENCE APPLICATIONS OF MATHEMATICS IN ENGINEERING AND ECONOMICS (AMEE'17) Book Series: AIP Conference Proceedings Volume: 1910 Article Number: UNSP 020013 Published: 2017 (Citations -1)
2. Abadzhiev, Metodi; **Todorov, Georgi**; Kamberov, Konstantin, MANDIBULAR FLEXURE - A REASON FOR CHRONIC PAIN SYNDROME IN EDENTULOUS PATIENT RESTORED WITH FIXED ZRO(2) CONSTRUCTION OVER IMPLANTS, INSERTED IN NATURAL BONE AND BONE GRAFT AREA. CASE REPORT. JOURNAL OF IMAB Volume: 23 Issue: 1 Published: JAN-MAR 2017 Pages: 1432-1440

C) Публикации в списания и конференции

1. **Тодоров, Г.**, Николов, Н., Митов, В., Нови методи за създаване на дентални импланти, част 2, Сборник доклади на МНК МТФ'2012 18-20 октомври, 2012, София, България, стр. 411-419;

2. **Todorov, G.**, Dobrev, I., Kamberov, K., CFD and thermal analyses application at reflow oven design improvements based on virtual prototyping techniques, Proceedings of International Conference on Innovative Technologies, IN-TECH 2012, Rijeka, 26 - 28.
3. **Todorov, G.**, K. Kamberov, Sv. Stoev, I. Savov Structural Analysis and Verification of Snap-Fit Joints in Plastic Parts CONTECH '13, Istanbul, Turkey, 26th to 28th December 2013
4. **Тодоров Г.**, Я. Софронов, Х. Христов, Якостно и деформационно поведение на субпериостални импланти, сп. „Машиностроене и електротехника“, ISSN 0025-455X, бр.06/2013, с. 10-12
5. **Тодоров Г.**, К. Камберов, Цв. Иванов, Б. Врабевски, Ефективност на инженерните анализи, сп. СЮ, CAD/CAM&GIS, бр.8, година IX, 09/2013
6. Софронов Я., **Г. Тодоров**, К. Камберов, Реконструкция в CAD средата на геометрия след оптимизация или сканиране на реален обект при развитие на комплексен продукт, сп. СЮ, CAD/CAM&GIS, бр.8, година X, 09/2014
7. Камберов К., **Г. Тодоров**, Ст. Малешков, Б. Романов, Подходи за обратно интегриране на оптимизирани геометрични модели в процеса на развитие на продукта, сп. „Машиностроене и електротехника“, ISSN 0025-455X, стр. 14-19, бр. 5-6, година LXIII, 2014
8. **Тодоров Г.**, Б. Романов, Б. Врабевски, Я. Софронов, Възможности за избягване на деформации в ореберени детайли чрез оптимизация на геометричната структура, „Механика на машините“, № 107, 2014, ISSN 0861-9727, с. 15-19.
9. **Тодоров Г.**, Я. Софронов, Цв. Иванов, Изготвяне на мащабни физически прототипи за идентификация на функционални параметри, „Машиностроене и Машинознание“, 2014, ISSN 1312-8612, стр. 102 – 106.
10. **Тодоров Г.**, Митов В., Николов Н., Софронов Я., Методика за 3D реконструиране от томографски изображения на кости и практическото и приложение при изграждане на импланти; Списание „CAD ДАЙДЖЕСТ“, ноември 2014 г.
11. **Тодоров Г.**, Митов В., Върбанов Б., Софронов Я., Христов Х., 3D Реконструиране от томографски изображения на челюстна кост за субпериостални импланти и практическото и приложение, Списание „Машиностроене и електротехника“, ISSN 0025-455X, брой № 9, 2014 г.
12. Kamberov K., **G. Todorov**, Sv. Stoev, B. Romanov, Mechanical Strenght Test of Train Wheel Basaed on Virtual Prototyping, Proceedings in Manufacturing Systems, vol. 10, issue 3, 2015, Bucharest, pp 99-104
13. **Тодоров Г.**, К. Камберов, Цв. Иванов, Валидация на конструкции чрез инженерни анализи на виртуални прототипи, сп. „Машиностроене и машинознание“, ISSN 0025-455X, бр.5, 2015, стр.9-12;
14. **Тодоров Г.**, Б. Загорев, К. Камберов, Б. Романов, Проектиране на иновативни продукти чрез хармонизация на стилистично и функционално решение, сп. „Машиностроене и машинознание“, ISSN 0025-455X, бр.6, 2015, стр.7-1;
15. **Тодоров Г.**, К. Камберов, Б. Романов, Мултифизичен термо-флуиден анализ за определяне работните параметри на тестова магнитна глава, 28 Международна научна конференция, Сборник доклади, Созопол, България, 11-14 Септември 2015, стр.407-414
16. **Тодоров Г.**, К. Камберов, Ил. Савов, Автоматизиран подход за CAD моделиране на ортези за костни импланти, 28 Международна научна конференция, Сборник доклади, Созопол, България, 11-14 Септември 2015, стр.391-398
17. Софронов Я., **Г. Тодоров**, К. Стоичков, Ю. Цаков, А. Тодоров, Н. Николов, Прогресивни методи за изработка на дентални импланти, 2015, Сборник доклади международна научна конференция „70 години МТФ“, МТФ 2015, ISBN: 978-619-167-178-6, стр. 445 – 449.
18. **ТОДОРОВ, Г.**, И. САВОВ, КАМБЕРОВ, К., КОНСТРУКЦИИ НА ОРТЕЗИ, ОСНОВАНИ НА ТЕХНОЛОГИИТЕ ЗА БЪРЗО ПРОТОТИПИРАНЕ НА ПОЛИМЕРНИ СТРУКТУРИ С БИОПРИЛОЖЕНИЕ, „МАШИНОСТРОЕНИЕ И ЕЛЕКТРОТЕХНИКА“, ISSN 0025-455X, БР. 5-6, ГОДИНА LXV 2016, СТР. 12-15
19. **ТОДОРОВ, Г.**, КАМБЕРОВ, К., СЕМКОВ, М., РАЗВИТИЕ НА КОНСТРУКТИВНА КОНЦЕПЦИЯ ЧРЕЗ ВИРТУАЛНО ПРОТОТИПИРАНЕ, СПИСАНИЕ „МАШИНОСТРОЕНИЕ И ЕЛЕКТРОТЕХНИКА“, ISSN 0025-455X, БР. 10-11, ГОДИНА LXV 2016, СТР. 27-30
20. **ТОДОРОВ, Г.**, СОФРОНОВ Я., Н. НИКОЛОВ, КАМБЕРОВ, К., ПРИЛОЖЕНИЕ НА 3D CAD/CAM ТЕХНОЛОГИИ В МЕДИЦИНАТА, СП. СЮ, CAD/CAM&GIS, БР.8, ГОДИНА XII, 09/2016, СТР. 66-72
21. **ТОДОРОВ Г.**, КАМБЕРОВ К., СТАТЕВ П., ИНДУСТРИЯ 4.0 –ПРЕДИЗВИКАТЕЛСТВА И ВЪЗМОЖНОСТИ, СП. СЮ, CAD/CAM&GIS, БР.9, ГОДИНА XII, 09/2017, СТР. 66-72
22. **ТОДОРОВ Г.**, ПРИЛОЖИМОСТ НА ТЕХНОЛОГИЧНАТА КОНЦЕПЦИЯ „ИНДУСТРИЯ 4.0“ ПРИ РАЗВИТИЕ НА НОВИ „МАСОВО ПЕРСОНАЛИЗИРАНЕ“ НА ФАМИЛИЯ ВИСОКОПОВДИГАЧИ, МАШИНОСТРОЕНИЕ И ЕЛЕКТРОТЕХНИКА “ ISSN 0025-455X,, БР. 5-6, СТР.12-18, 2017

Защитени патенти, свързани с изследването

Название	Изобретатели:	Публикация
METHOD AND SYSTEM FOR DIRECT CASTING OF CAST COMPONENTS BY ADDITIVE MANUFACTURING OF COMPOSITE MONOLITHIC MOLDS	TODOROV GEORGI DIMITROV [BG] IVANOV TSVETOZAR TIHOMIROV [BG]	WO2017008130 (A1) — 2017-01-19
DEVICE INTERLOCKING WITH A COMPARTMENT	TODOROV GEORGI DIMITROV [BG]; KAMBEROV KONSTANTIN [BG]; EVANS JAMES [US]; DEGINGER CHRIS [US]	WO2016134287 (A1) — 2016-08-25
ADDITIVE MANUFACTURING MACHINE FOR CREATING THREE-DIMENSIONAL OBJECTS FROM POWDER MATERIAL	TODOROV GEORGI DIMITROV [BG]; IVANOV TSVETOZAR TIHOMIROV [BG]	US2018021978 (A1) — 2018-01-25
METHOD AND SYSTEM FOR LAYER-WISE GENERATION OF THREE-DIMENSIONAL MODELS FROM POWDERED MATERIAL	TODOROV GEORGI DIMITROV [BG]; IVANOV TSVETOZAR TIHOMIROV [BG]	WO2016161489 (A2) — 2016-10-13
APPARATUS FOR PACKAGING A PRODUCT WITH AN EXTENSIBLE FILM	CAPPI ANGELO [IT]; TODOROV GEORGI DIMITROV [BG]	US2017217611 (A1) — 2017-08-03
A DEVICE FOR ATTACHING WORK TOOLS	MANTOVANI ALBERTO [IT]; TODOROV GEORGI DIMITROV [BG]	WO2006103558 (A1) — 2006-10-05
PERCUSSIVE MECHANISM FOR PORTABLE ELECTRIC PERCUSSION DRILLING MACHINES	PEYKOV VELICHKO [BG]; GANCHEV NIKOLAY [BG]; TODOROV GEORGI [BG]; ROMANOV BORISLAV [BG]	WO 2009/036526 A1 BG109958 (A) — 2009-03-31
UNINTERRUPTIBLE POWER SUPPLY SYSTEM	ZHIVKOV VENELIN [BG]; TODOROV GEORGI [BG]; NIKOLOV NIKOLAY [BG]; IVANOV TSVETOZAR [BG]	BG2135 (U1) — 2015- 10-30
MODULE FOR UNINTERRUPTED ELECTRIC CHARGING WITH A KINETIC ACCUMULATOR OF ENERGY	TODOROV GEORGI [BG]; NIKOLOV NIKOLAY [BG]; KAMBEROV KONSTANTIN [BG]	BG2655 (U1) — 2017- 06-30
JOYSTICK	NIKOLOV NIKOLAY [BG]; TODOROV GEORGI [BG]; ZABCHEV GEORGI [BG]	BG112068 (A) — 2017-01-31
CONTACT SYSTEM FOR ELECTRICAL CABINETS WITH MOVABLE CHASSIS	NIKOLOV NIKOLAY [BG]; TODOROV GEORGI [BG]; GROZDANOVA SNEZHANKA [BG]	BG1954 (U1) — 2014- 08-31

Защитени докторски дисертации по тематиката на изследването с научното ръководство/съръководство на автора

	Име	Тема	Защитил
1	Константин Христов Камберов	Моделиране и прогнозиране на надеждностните показатели в етапа на проектиране	27.09.2011
2	Борислав Борисов Врабевски	Интегрална оптимизация на динамично натоварени детайли в етапа на проектиране	20.05.2014
3	Величко Мартинов Пейков	Изследване на ударни механизми за ръчни ударни и ударно-пробивни електроинструменти	08.10.2012
4	Андриана Трайче Инова	Използване на функционално-стойностния анализ в среда на cad/cam	03.11.2012
5	Явор Петров Софронов	Проектиране на манипулационни механизми на роботи-екстрактори на отливки	19.11.2015
6	Красимир Стоянов Василев	Моделиране на точността на обработване на инструментални повърхнини със сложна форма с високоскоростно фрезозване	27.09.2012
7	Виктор Крумов Митов	Изследване на технологиите за бързо изграждане на дентални импланти	11.12.2014
8	Борислав Георгиев Романов	Проектиране на сложни пластмасови елементи, базирано на моделиране и изследване на процеса на запълване чрез виртуален прототип	01.04.2016
9	Цветозар Тихомиров Иванов	Автоматизирано проектиране на модулни машини за рязане на листов материал	05.02.2016
10	Николай Петков Острев	Бързо прототипиране и изработване на LED тела	20.09.2017

АНОТАЦИЯ

Изследването е посветено на средствата, методите и подходите на виртуалното и физическото прототипиране при развитието на нови продукти, позволяващи ранно тестване на концептуални решения, идентификация на функционалността, откриване на потенциалните инженерни проблеми, както и бързо и адекватно персонализиране на решенията, при което се намалява съществено броят на конструктивните изменения и броят на изработваните прототипи и свързаните с това нови стратегии.

Изследването обхваща процесите на развитие, идентификация и валидация при създаването на иновативни продукти и решения, както и процесите, позволяващи висока степен на персонализация при следване на необходимостта от възможно най-голямо съкращаване на процеса от идеята до продукта и при постигане на максимална икономическа ефективност. Фокусът на изследването е върху развитие на стратегиите, методите и подходите за прилагане на CAD/CAM/CAE технологиите и по-специално в развитието и апробацията на ефективно прилагане на виртуалните и физически прототипи за скъсяване на времето, подобряване на качествените и екологичните показатели при развитие на продуктите, вариантното проектиране и персонализация, а също и за устойчивост на организационните и процесни методи и средства за минимизиране на риска и подобряване на качеството и ефективността на иновациите.

В работата е разработена методологична последователност за концепиране и проектиране на сложни индустриални продукти и системи, включително и за създаване на импланти. Защитена е тезата за необходимостта от нова парадигма в проектантския процес. Развити са иновативни стратегии, методи и подходи за бързо специфициране и концепиране на комплексни архитектури на иновативни продукти с намалена итеративност, включително на модулен принцип при изпълняване на динамичните изискванията на клиентите спрямо функционалност, вариантност и не на последно място – на цена на притежанието. Създаден е матричен подход за ефективно разпределение на необходимите функции между механичните, електронните, сензорните и софтуерната системи, с цел постигане на ниска себестойност и оптимална надеждност при композиционно изграждане с максимално използване на налични комерсиални компоненти. Предложен е нов фрактален метод, както и иновативен „LL“ метод за виртуално и физическо прототипиране. Предложен е нов метод „Бяла/Черна“ кутия за валидиране на виртуалните прототипи. Чрез примери от индустрията е доказано, че симулациите дават много точни оценки при оптимизацията на дизайна в съчетание с физически тестове и обратна връзка с виртуалния прототип, еволюиращ в дигитален близък.

Съчетаването на виртуалните технологии с методите на адитивните технологии (RP) се очертава като обещаващ инструментариум за създаване и изграждане на медицински импланти, включително с персонификация. Анализирани са специфичните изисквания, начините на работа и особеностите на създаването и производствените процеси в сферата на здравеопазването и имплантологията. Предложени са и са реализирани три практически метода за прилагане на технологиите на виртуалното прототипиране и бързото физическо изграждане, в съчетание с медицински знания за персонализация на костни и зъбни импланти с адекватно дефиниране на необходимата им геометрия. Тези методи революционизират начина на организация на целия процес, чрез виртуално или физическо прототипиране на елементи от процеса, за добро планиране на хирургичните операции и постигане на точен и адаптиран към обкръжаващата костна система, начин на присъединяване с включване на кинематиката и товарните потоци на костната система.

В резултат на предложените методи и подходи са разработени и внедрени, под ръководството на автора, в индустриалната практика редица иновативни проектни решения за индустриални партньори от страната и чужбина, като редица нови решения са патентовани (9 международни патента), а някои от тях са достигнали до световните пазари (например иновативната ударна квази резонансна система е световна новост, удостоена с редица награди).

ANOTATION

The Research Thesis is dedicated to the methods and approaches of virtual and physical prototyping in the development of new products, enabling early testing of conceptual solutions, functionality identification, detection of potential engineering problems as well as rapid and adequate personalization of solutions, where the number of constructive modifications and the number of prototypes and the associated new strategies are substantially reduced.

The Research covers the processes of development, identification and validation in the creation of innovative products and solutions as well as processes, allowing a high degree of personalization allowing to pursue the need to reduce the process loop from the idea to the market as much as possible and to achieve maximum efficiency and reverse of investments. The focus of the study is on developing the strategies, methods and approaches for the application of CAD/CAM/CAE technologies and particularly in the development and testing of effective application of virtual and physical prototypes for shortening the time, improving the quality and the environmental performance of the new products' development, design and personalization as well as the sustainability of the organizational and process methods and tools to minimize the risk for errors and improve the quality and efficiency of the innovations.

The Thesis has developed a methodological sequence in conceiving and designing complex industrial products and systems, including the medical implants' creation. The thesis defines the need for a new paradigm in the design process organization. Innovative strategies, methods and approaches have been developed to quickly specify and conceive the complex architectures of innovative products, including modular design principle in fulfilling the dynamic demands of the customers for functionality, variance and last but not least – the cost of ownership.

A matrix approach has been developed to efficiently divide & distribute the functionality between mechanical, electronic, sensor and software systems to achieve low cost and optimum reliability when composing the product structure with maximum use of commercial components.

A new fractal method is proposed as well as an innovative "LL" method for virtual and physical prototyping. A new "black/white" box method was worked out to validate virtual prototypes. Industry held test cases have shown that FEM simulations achieve very accurate estimates when optimizing the design combined with physical tests and feedback allowing the virtual prototype to evolve into a "digital twin".

The combination of virtual technologies and additive technologies is defined as a promising tool for creating and manufacturing medical implants, including personalized ones. The specific requirements, the working methods and the specifics of the creation and production processes in the sphere of healthcare and implantology are analyzed. Three practical methods of implementing the technologies of virtual prototyping and rapid physical manufacturing in combination with medical knowledge for personalization of bone and dental implants along with adequate definition of the geometry are proposed and realized. These methods revolutionize the process of organizing the whole implants' creation process by virtual or physical prototyping of process elements, good planning of surgical operations and achieving a precise and adapted to the surrounding bone system implants as well as a way of joining with the inclusion of dynamic loads to bones.

As a result of the proposed methods and approaches, a number of innovative design solutions for industrial partners have been developed and implemented into industrial scenarios under the author's supervision, with a number of new solutions being patented (9 international patents). Some of the products have reached the world's markets (for an instance, the innovative hammer quasi-resonance system was recognized as a world-wide innovation, honored with a number of awards).



TECHNICAL UNIVERSITY OF
SOFIA

FACULTY OF INDUSTRIAL
TECHNOLOGY

Dep. "Manufacturing Technologies and
Machine Tools"

VIRTUAL AND PHYSICAL PROTOTYPING

Prof. d-r Georgi D. Todorov

ABSTRACT Of **Dissertation**

For Science degree
"Doctor of Science"

Professional field:

5.1 "Mechanical Engineering"

Science specialty :

**«Computer Added Design and Automation
Systems»**

**Sofia
2019**

The Dissertation Thesis was discussed and confirmed for public presentation by the Department of Manufacturing Technologies and Machine Tools, Faculty of Industrial Engineering at TU-Sofia, by voting at a meeting of the Department Council, held on 18.03.2019.

The Candidate is a professor at the Technical University of Sofia, he is the founder of the "CAD / CAM / CAE in the Industry" laboratory at FIT, TU-Sofia which is more than 25 years old. Since 2009 he has been the head of the "Center for Virtual Engineering - Prof. Dr. Il. Boyadzhiev", since 2010 prof. Todorov is a Dean of Faculty of Industrial Technology at TU-Sofia.

The Dissertation's research activities has been carried out in the "CAD/CAM/CAE in the Industry" Laboratory and in R&D Projects with a number of industrial partners.

The numbering of the formulas, figures, tables and used literature in the abstract correspond to those in the full text dissertation.

The Dissertation Thesis Book has a total volume of 423 pages, containing 359 figures, 44 tables, and a list of the 186 sources used.

The public presentation of the dissertation will take place on 11.07.2019 at 3 p.m. in the conference room of the LIC of the Technical University of Sofia at a meeting of a Scientific Jury composed of:

Prof. d-r. Eng. Lubomir Dimitrov	Chairman
Prof. d-r. Eng. Ivo Malakov	Scientific Secretary
Prof. D.Sc. Eng. Venelin Jivkov, Cor.Mem.	Member
Prof. D.Sc. Eng. Nikolay Minchev, DHC	Member
Prof. D.Sc. Eng. Dimitar Dichev	Member
Prof. d-r. Eng. Angel Dikov	Member
Prof. d-r. Eng. Lutchezar Stoev	Member

The Dissertation Thesis and connected Documents are available to those interested in the office 3230, FIT, Bl.3, Technical University of Sofia.

Author: **Georgi Dimitrov Todorov**

Thesis Title: **VIRTUAL AND PHYSICAL PROTOTYPING**

Edition: 20 pcs.

Publisher: TU Sofia Press Center

ACKNOWLEDGMENTS:

The author expresses special thanks to:

The team of CAD/CAM/CAE in the Industry, FIT, TU-Sofia, which contributed greatly to the motivation, conception, creation and finishing of the Thesis. All PhD students and graduates who have worked in related fields and contributed to the creation of graphic and other materials;

Our industrial partners:

CMS Srl, Italy; Deltica, USA; Genmark Automation, USA; Mantovanibenne Srl, Italy; Nexen Lift Trucks Ltd., UK; VISTEON (JCI), Bulgaria, France; SIGUREN Ingénierie, France; Sensata Technologies / Sensor-Nite Industrial, Bulgaria, Holland; Texas Institute of Science, USA; Vi TECHNOLOGY, France; Future Inc.; SPARKY ELTOS AD and many others,

the collaborative projects that gave me the experience and the confidence in the applicability of the Virtual Technologies;

To all my Colleagues from dep. PT&MT, FIT, Technical University of Sofia and the professional community,

and especially to my Relatives and my Friends who inspired me, supported and encouraged me to develop and finish this Dissertation Thesis.

I. GENERAL CHARACTERISTICS OF THE WORK

State of the art

The overall increase of the complexity of the products in mechatronic, technological and information aspects, as well as the variation of the products, their creation based on customer's demands, all in the face of the continuous market pressure for development time cutting and reaching the market faster and even bigger pressure for cost reduction, require new technologies for creating the conception, design, detailed design and especially for validation of innovations and technologies. As a result, design organization and methodology is an extremely topical issue, especially as a powerful tool for accelerating the development process, and especially as a tool for exploring through virtual and physical prototyping methods the improvement the product's quality and reducing its cost. The combination of virtual technologies and additive technologies (RP) have emerged as a promising approach for rapid creation and physical realization of medical implants, including implants' personalization.

Scientific actuality

Today's Industrial and Engineering processes are determined by the overall Digital Transformation. This New World of connectivity and Digitization also requires new Engineering and Technological solutions for the New Reality of the Digital Economy, Innovation, Digital markets, and changes in business models. This includes creating a strategy for Digital Transformation, new skills and the expertise of people involved in the field. Technological solutions for data exchange, Knowledge Management, Big Data analysis, robotics, 3D virtual Prototyping and Additive Manufacturing Methods, Product personalization, Virtual process simulations, products and systems are increasingly used, digital twins and cyber-physical systems, especially systems with elements of artificial intelligence. All these new Technologies require new Knowledge and Expertize about the processes of defining, developing, validating, industrializing, production, maintaining and recycling the products in their life cycle management.

Practical applicability

The most effective approach to reducing the investment and market risks of innovations created is the process of prototyping at the earliest possible stages, using the methods and tools of virtual engineering. In The Thesis has developed a methodological sequence in conceiving and designing complex systems, including medical implantation. A new Fractal Method is proposed as well as an innovative "LL" Method for Virtual and Physical prototyping. A new "white/black box" Method is proposed to validate virtual prototypes. Industrial Success Cases have shown that simulations based approach provide very effective optimization of the Design, combined with physical tests and feedback to the Virtual Prototype evolving into a "digital twin" approach. The proposed methods and approaches are of direct practical applicable, appraised in a number of industrial and research projects, some of which are presented in the Thesis.

Thesis work release

Dissertation research was carried out at the "CAD / CAM / CAE in Industry" laboratory at the Technical University of Sofia, part of the Research was carried out in SPARKY ELTOS AD, Liebherr Hausgerete Bulgaria, TermaTech, France, NEXEN Forklift, UK and many others. Research results have been implemented and used in the development of new products in a large number of companies in Bulgaria, France, Italy, Germany, the United Kingdom and others.

Thesis work conformation

The dissertation work has been reported to the Department of Manufacturing Technology and Machine Tools, FIT, TU-Sofia.

Publication of thesis results

The substantive results of the Dissertation Thesis have been published in 8 papers, referenced in SCOPUS and Web of Science, in 22 papers published in conferences and journals, in more than 10 international patents and a number of international projects under the supervising of the author.

II. CONTENT OF DISSERTATION

1. Introduction in the field of research

1.1. Object of the study

The object of the study is the means, methods and approaches of virtual and physical prototyping in the new products development, enabling early testing of conceptual solutions, identification of functionality, detection of potential engineering problems, rapid and adequate personalization of solutions, dramatically reducing the number of constructive changes and the number of prototypes produced by the associated new strategies.

1.2. Scope of the study and focus

The research covers the processes of development, identification and validation in the innovative products and solutions creation process, as well as the processes allowing a high degree of personalization in pursuit of the need to reduce the time from the idea to the product as much as possible and to achieve maximum economic efficiency.

The focus of the research is on developing the strategies, methods and approaches for the implementation of CAD/CAM/CAE technologies, in particular in the development and testing of effective implementation of virtual and physical prototypes for time compressing, improving quality and environmental protective products, design and personalization as well as the sustainability of organizational and process methods and tools to minimize risk and improve the quality and efficiency of innovations.

1.3. Level of technologies and solutions

The industrial world is remarkably moving away from the times of large orders and serial production, and narrow specialization shifts from new innovative methods and processes to a new generation of flexible equipment, including 3D printing. The design toolbox develops very dynamically and is increasingly focused on "virtual prototyping". The "digital connectivity and structure" of virtual technologies is the highest level of abstraction with many advantages in terms of reach and flexibility and shows technological peaks in the field.

1.4. Research challenges and objectives

Despite the rapid development of technology, there is a significant lag behind in strategies, methods, and approaches to their effective implementation.

The engineering practice in this context sets the following scientific objectives:

- Development of strategies and methods to simulate the behavior of the products at the earliest possible stage as well as to develop new, improved variants based on the original construction (optimization) by virtual prototyping;
- Development of methods and approaches to reduce the time for development and validation of the products, finding the most effective balance between virtual and physical prototypes;
- Creating methods and approaches for identifying and evaluating specific physical quantities and/or process parameters (often these values can hardly be directly identified on the basis of physical modeling);
- Creating methods and approaches for fine-tuning of the virtual prototypes by physically prototyping of the specific aspects and the behavior by identifying specific physical properties (these properties can hardly be directly determined by virtual modeling);
- Developing methods for implementing virtual prototyping technology and rapid physical prototyping for personalization of products, including in the field of healthcare and implantology.

1.5. Research methodology

This study is based on the accumulation of empirical knowledge of basic methods and principles for the use of prototyping in exploring the objects and their elements to functional links between these elements and the behavior of objects in their virtual modeling, simulation and optimization.

The scientific study here reveals the main aspects of the scientific theory of explaining the essence of the phenomena through a unique language of their description through complex and related models, allowing to predict the behavior of objects by exploring virtual objects of created products, defining the limits of applicability in practice and opportunities for their further development.

The Thesis Work is structured in ten Chapters. **Chapter 1** presents state of the art together with a description of the research objectives, subject, focus and methodology of the study.

Chapter 2 provide a review of the literature and a theoretical basis of the study that includes critical analysis of virtual engineering technology, product development, virtual prototypes, physical prototypes and integration of virtual/physical prototyping in the design process.

On the basis of the systematic review of the state of the field and the analysis carried out at the end of Chapter 2, the main conclusions are drawn, defining the direction and scope of the study. At the end of the chapter is defined the general and specific objectives (tasks) solved in the work.

Chapter 3 is dedicated to the development of innovative design methods and approaches for organization and implementation of the process of creating new products. An innovative approach to concept, architectural composition and development of complex products in a distributed virtual environment, approach to clustering (module based development) and conceptual structuring based on functions distribution between mechanical system solutions, electronics, sensorics and system integration are considered through software applications.

Chapter 4 carried out the feasibility of simulation models and analyzes as the main element of virtual prototyping technology. Specific features are defined in the definition of engineering analysis, feasibility of specific structural analyzes, multiphysics analyses as well as the reverse integration of optimized by virtual prototyping geometric models back into the product development process and the application of virtual prototyping for "design for manufacturing".

Chapter 5 analyzes the additive technologies and high-speed machining for rapid prototyping, the applicability, the advantages and disadvantages of the common applicable technologies for the rapid development of physical prototypes.

Chapter 6 develops a strategy for implementing both virtual and physical prototyping to the effective development of sophisticated systems and the place of virtual and physical prototypes in the product lifecycle. A new Fractal Approach to design methodology is proposed as well.

The development of a hybrid method for predicting the "level of confidence" of the virtual prototyping (VP) results of the multiphysics processes through physical particular testing - "black box/white box" is developed in **Chapter 7** and three approaches are proposed for its practical implementation.

Chapter 8 explores the virtual prototype as the basis for a "Digital Twins". The concept of a Digital Twins has been analyzed and a new method for integrated virtual design of complex products is proposed through a new "LL" method for Industry 4.0 platform environment application.

Chapter 9 presents an appraisal of the applicability of virtual and physical prototyping to design practice showing 4 successful finished projects from the author's practice.

The **tenth chapter** is dedicated to the applicability of virtual technologies and physical materialization for implants development process in medical field. Technological methods for implant production have been analyzed, 3D reconstruction and modeling based on Computer Tomography Data for the creation of personalized implants and several methods for custom implants have been developed and practically demonstrated.

2. State of the research field

The virtual (digital) product model is an integration of 3D models that represent a completely accurate of the object being developed, i.e., its shape, geometry, kinematics, surfaces, material characteristics of the elements and many other properties and parameters of the product. These three-dimensional computer models are called a virtual model of the physical product and are stored in a graphical database composite or structured as part of the design, organizational or production structure. Behavioral simulations and testing using these models is defined as Virtual Prototyping (VP).

2.1.1. Virtual prototyping

Here is the terminology that is used in virtual environments and virtual prototype research, and in the process framework of prototyping.

The definition used in this work is closest to the definition of (Wang, 2002): "A virtual prototype is a computer simulation of a physical product that can be presented, analyzed and tested for various aspects of the life cycle such as design / engineering, production, service and recycling as close as possible to a real physical object. If conventional simulation is used to analyze a specific aspect of

the product (Thompson, 2000), the VP has a wider scope as it examines various, related aspects of product behavior to reduce or replace Physical Prototypes(PP). Consequently, VP is a technically new area of related tasks, rather than individual simulation. Various approaches are used to validate the VP, most often testing using PP.

2.1.2. Physical prototyping

The physical prototype is the object of the physical (real) world (Ulrich & Eppinger, 2005) and can be created from the same or different materials, functionally to a certain extent the geometry, properties and behavior of the future real object. Physical prototypes (PPs) are used for different purposes - both for validation of VP and for product tests or certifications closest to their final type. Classifications of physical prototypes can be in several directions:

- building a physical prototype with a completely different technology, most often additive (3D printing) and different material due to different technology;
- building the physical prototype with a different technology, most often additive, but from identical materials - used in components that require shaping tools and allows functional tests and analysis of behavior;
- building a physical prototype similar to the ultimate technology and identical material, but with universal methods and no specialized equipment.

2.13. DEVELOPMENT OF NEW PRODUCTS WITH THE NEW METHODS OF VIRTUAL ENGINEERING

As virtual build and validation processes can be performed in parallel, the number of iterations to improve the parameters is greater, but the time to perform one iteration is considerably shorter. As a result, the product development pathway is reduced, the time for troubleshooting is reduced, and there is the potential to save significantly on the volume of development costs and cost of the final result (Figure 2-32).

Although there is a clear tendency towards a widespread penetration of virtual engineering and virtual prototyping, there is some conservatism in the industry due to the lack of strategies, methods and approaches to build technical concepts, product structuring and the next from these interface definitions how to choose a technological solution for a specific set of tasks for virtual and physical prototyping in a given product and technological context.

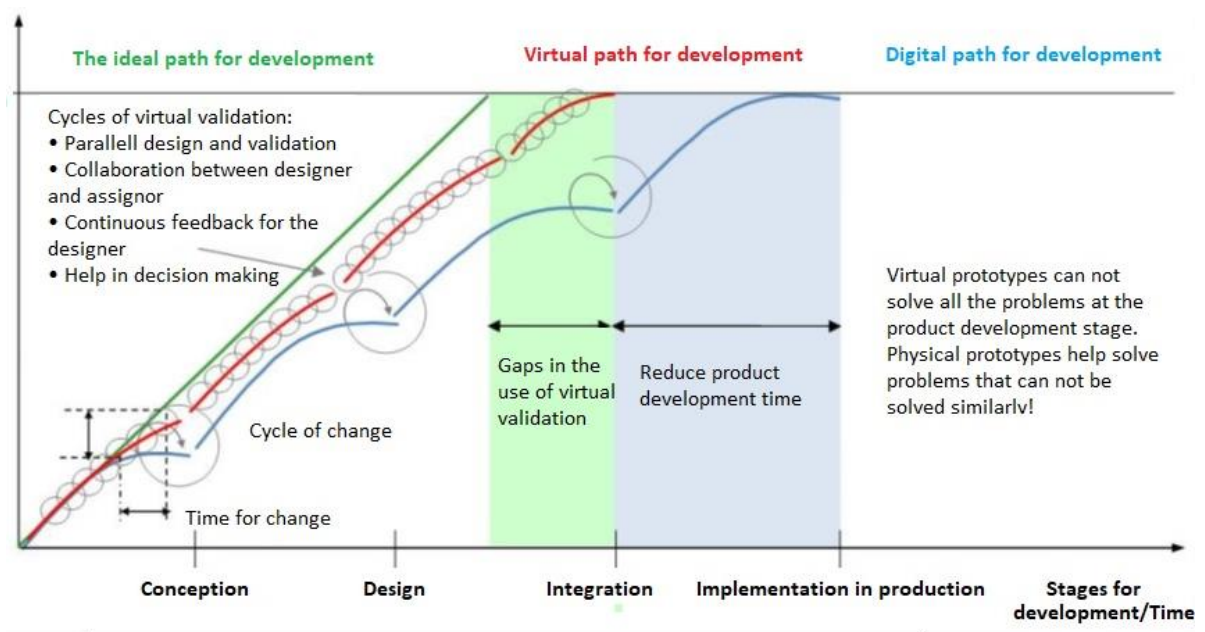


Figure 2-32: "Design-test" using virtual engineering (according to automotive engineering), (Ovtcharova, 2010)

2.16. CONCLUSIONS FROM CHAPTER 2

- The strategies and design methods discussed clearly show the iterative nature of the process;
- One of the most responsible stages in the design process is the creation of the product structure, and the adjustment at a later stage is associated with significant costs;
- In today's dynamic market, complex products are available, which should take account of ever-increasing consumer requirements. Here is no systematic methodological basis for effective evaluation;
- The logical structure of product development methodology and existing design methods are predominantly consistent and less effective;
- The advantages and disadvantages of virtual and physical prototypes and the need for a more detailed analysis of their technological capabilities, as well as the need to develop methods and approaches for their effective application are outlined.

One of the main tools for the development of new products is the application of virtual prototyping, but from the analysis it can be concluded that there are no adequate methods and approaches for its use in the solving of important tasks for research, validation and optimization of:

- Objects with complex structure and complex composition that do not allow effective physical prototyping;
- objects with multiphysical effects that severely hamper modeling and research;
- Objects loaded under specific dynamic conditions, such as impact tests, dropouts, etc. not allowing real tests, even in the presence of physical prototypes;
- Adapting the design of the designed product to the best of the production processes by simulation, to achieve a technological design.

The application of a physical prototype (PP) is an essential tool for testing and validating technical and functional solutions for developing new products:

- Additive manufacturing technologies, known as Rapid Prototyping (RP), are often used, and the applicability of different technologies has not been sufficiently studied in the literature;
- There are no effective approaches to assessing the location and extent of RP implementation throughout the development cycle;
- It is necessary to develop methods and approaches for reverse integration of optimized geometry as a result of simulations back into the CAD environment;
- The combination of virtual technologies and additive technology (RP) technologies is emerging as a promising tool for creating and building medical implants, including personalization;
- There is a lack of well-tuned and validated methods for complete implant building in a virtual environment with rapid materialization in literature and practice.

Design tools are developing faster than methods, organizational strategies, and engineering expertise. The following features of the environment and the conditions of development of new products are observed:

- More and more important for companies is the ownership of product rights rather than internal production capabilities at a component level;
- Product designers are transformed into system integrators, and subcontractors specialize at the technological and process level and move away from the end product;
- The consequence of this development is the need to develop, validate and implement new, innovative, effective and efficient methods for designing new products.

The new realities in the Connected World define a new paradigm of the design process and in general pose new challenges for finding effective ways, tools for an effective balance between market requirements and technological development, and lagging methods and tools for managing innovation processes, compared to the resources mobilized in this process.

2.17. THE THESIS GOAL

The goal of the Dissertation Thesis is to create, explore and appraise new strategies, methods and approaches for virtual and physical prototyping in the process of creating the conception, variant and personalized design and construction of innovative products to reduce technical, technological and investment risks, costs and time for industrialization.

RESEARCH TASKS

The following main tasks are defined to fulfill the goal of the dissertation thesis:

1. **Develop innovative strategies, methods and approaches to quickly specify and conceive complex architectures of innovative products with reduced readability, including on a modular basis, balancing customer requirements versus functionality and variance;**
2. **Creating an approach for effective distribution of functions between mechanical, electronic, sensor and software systems to achieve optimal reliability and, above all, low cost of composite use of available commercial components;**
3. **Develop innovative strategies, methods and approaches for virtual prototyping that allow the most accurate and adequate modeling, simulation and research of the behavior of the object at the earliest possible stage of complex variational and modular structures, as well as the development of improved variants (optimization);**
4. **Develop, validate and approve methods and approaches to reduce development and testing time in the process by finding the most effective balance with virtual and physical prototyping, taking into account the complexity and different levels of technological readiness of the individual systems and elements of the general architecture;**
5. **Exploring the possibilities of evolution of the virtual prototype to a digital twin, allowing the most accurate and adequate modeling, simulation and study of the behavior in the working conditions of the product being developed and subsequently during its exploitation period to build a cyber-physical system for throughout the life cycle;**
6. **To offer and test new methods and approaches for adaptation and fine tuning of virtual prototypes by physical prototyping and testing of specific aspects of behavior, by identifying and adapting specific physical properties or dimensions, increasing their accuracy and effectiveness;**
7. **Apply and test the developed methods and approaches in industrial projects for the applicability of the theoretical and methodological basis and the evaluation of the efficiency and effectiveness in the changed paradigm of the design process;**
8. **To offer and implement innovative methods for the implementation of virtual technologies and rapid physical prototyping in personalization in the field of healthcare and implantology.**

3. DEVELOPMENT OF INNOVATIVE PROJECT METHODS AND APPROACHES IN VIRTUALIZATION OF THE PROCESS OF CREATION OF NEW PRODUCTS

The engineering, technology and organizational challenge (competency) to organize the planning, implementation and control of complex projects for the development of new products must also definitely include tools for integrated product development, project management, cost management and the necessary organizational strategy. Only in this way is it possible to realize a well-synchronized, efficient and simultaneous work of the individual teams in the overall product development process.

3.1. OPPORTUNITIES FOR IMPLEMENTING NEW VIRTUAL INSTRUMENTS IN PROCESSES FOR DEVELOPING INNOVATIVE PRODUCTS

Many of the products and machines available today did not exist until recently, so previous designer experience for these tasks can be applied in limited volume. Therefore, new, more systematically-oriented approaches are needed to ensure rapid and error-free design of increasingly sophisticated products.

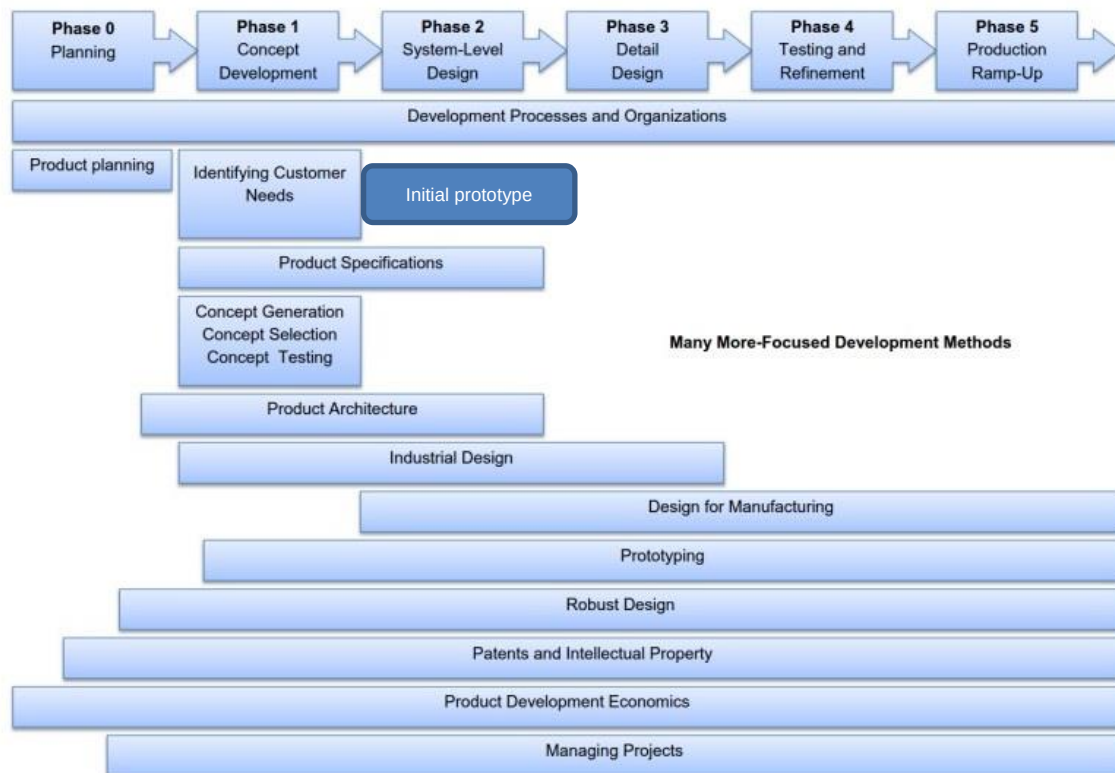


Figure 3-4: Main product development activities and possible development methods

One of the most important aspects of improving the design process is the development of new design methods that meet the new requirements and new technologies and opportunities for their use.

Technologies, methods and approaches to innovation development in most industries undergo changes. Iterative multi-step approaches have clear consecutive steps that are typical of today's design methods (including standards from the level and scale of VDI). More work is being done on this, that much of the process is developing in parallel. Figure 3-4 depicts the main activities of the product development process. (Ulrich & Eppinger, 2008)

Prototypes are used to support the communication and integration of designers and stakeholders, including when specifying products as a customer relationship (Figure 3-4). They are also used as training tools during the product development process. From an integration point of view, prototypes enable different design team members to coordinate with each other and integrate the solutions adopted to everyone in order to work in sync with up-to-date levels of readiness.

3.2. CONCEPT BUILDING. TECHNICAL SPECIFICATIONS

The model of the process of creating the conception (see Figure 3-5) is a concise approach to describing the process of concept building, describing and reporting the whole process of developing, producing and distributing a new product. The aim is to make a systematic analysis based on the interrelationships and the relationships between the different elements that make up the product model and the environment for its development. Generating ideas is a key component

of the conceptual model. In general, the conceptual model builds a framework that focuses on the various important aspects of the individual elements of the product.

An attempt to seek synergy between the requirements of today's users and the dynamic development of the technological environment in the development of new products through virtual engineering and prototyping can be presented as a matrix structure in terms of adequacy and relevance as a further development of the interactive a matrix for developing new products (Figure 3-6).

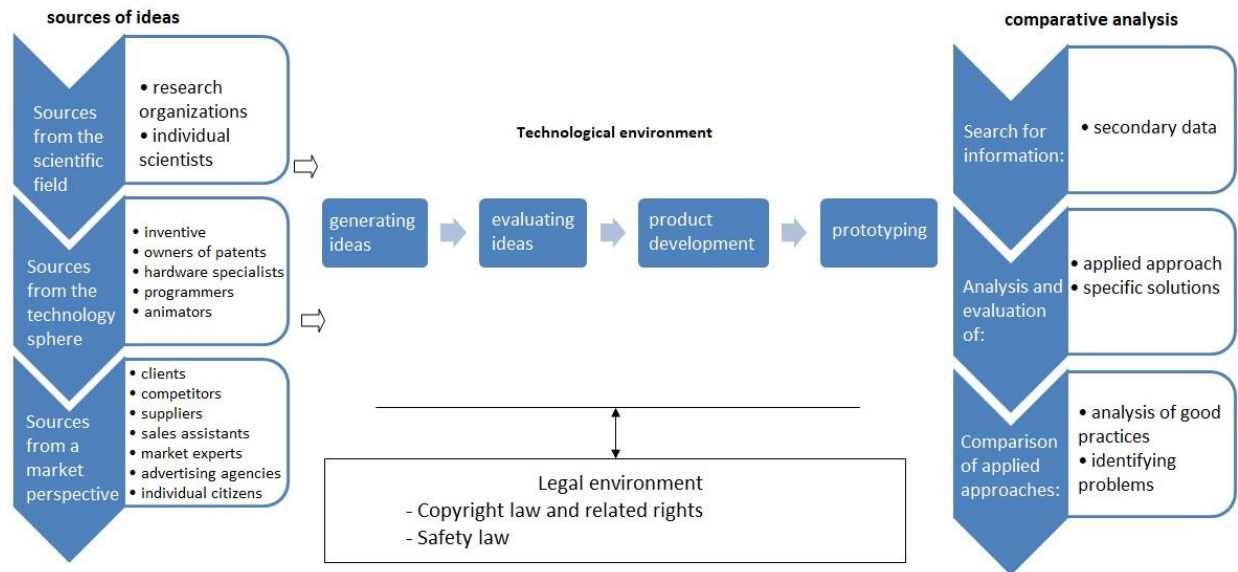


Figure 3-5: Model of the process of creating the conception

User requirements	Technological means of development							
	High reliability	Variance	Low cost/Low ownership cost	Innovation / Functionality	Safety / Security	Small series	Personalization	Fast Deployment / Short Life
1. Virtual prototyping of the product	VV	VVV	VVV	VV	V	VV	VVV	VVV
2. Virtual and expanded reality		VV		VV			VV	
3. Cloud technologies			V					V
4. Multiphysical FEM simulations	VV		VVV	V	VV		VV	VV
5. Additive technologies (3D print) and Rapid Prototyping		V		VV		VVV	VVV	VV
6. Large volumes of data and analysis		VV	VV	V	V		VVV	V
7. Digital twins and cyber physical systems	VV	VV	VV	V	VV		V	
8. Expert Systems and AI	VV		VV	VV	VV		VV	VV

Figure 3-6: Matrix of adequacy of the technological environment and its instruments to the requirements of the market in the development of new products

The analysis of the technological environment in the development of new products through the tools of virtual engineering and prototyping unambiguously shows that prototyping becomes a decisive factor for the success of a project. Particularly important here is virtual prototyping as a tool for validating conceptual, architectural, functional and technical solutions as early as possible, see Figure 3-7. In contrast to other authors (Wang, 2002), referring to three or more elementary structures of VP, an additional element of differentiation of functional study with VP (requiring solid models) from behavioral simulation (e.g. external loads, temperatures, etc.), requiring modeling through susceptible models and FEM simulations. According to this author's view, VP has a connection of its individual elements with the possibility of elementary evaluation.

VP plays an extremely important role in studying the "human-product" relationship. Every aspect of human involvement in the operation and / or maintenance of an item can be "verified" by dedicated VP technologies. Quite often, it is these analyzes that lead to the emergence of new requirements to the design, ergonomics and functionality of the product: there is a kind of feedback from user to product.

CONCLUSIONS

- Based on the analysis of the technological environment in the development of new products, it is clearly justified that prototyping is a decisive factor for the success of a project;
- It is particularly important to implement the HR as early as possible in the process of validating conceptual, architectural, functional and technical solutions;
- Unlike the conventional VP structure, the author introduces an additional element of functional modeling with HR (requiring solid models) of behavioral simulation (e.g. external loads, temperatures, etc.) requiring modeling through complex (multiphysical) models for FEM simulations, which defines the VP as having an additional level of connectivity of its individual elements while preserving the possibility and for elementary evaluation.

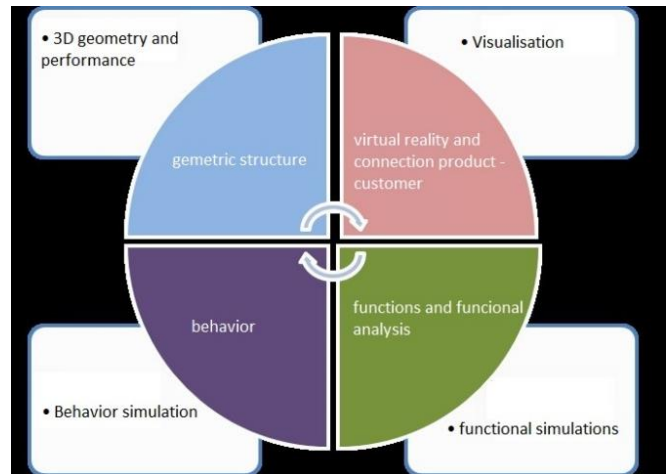


Figure 3-7: Virtual prototyping for new product development

3.3. INNOVATIVE METHODS AND APPROACHES FOR DEVELOPING PRODUCTS. PROJECT STAGES

In recent years, it has been noticed that the growing variety of products, reducing the volume produced by each particular model, has led to the emergence of modular platforms and variant systems, different client configurations, specific performances for different markets, and many others, making products multivariate and branched structures.

On the other hand, the life of the products over time is getting shorter and this requires them to be upgraded at least partially after a short period due to market requirements or normative-legal reasons. In this respect, the iterative methods and development approaches discussed in Chapter 2 are adequate to highly integrated and accelerated development processes, especially when creating innovative products.

3.3.1. EXAMPLE: Define a family table of hand-held hammer drills

The project aims to create an innovative family of high-performance impact drilling hand-held power tools (IDHHPT) with an innovative impact system based on the principle of controlled resonance. The IDHHPT family, also called perforators, is designed for drilling, grinding and shredding of concrete, stone, etc., walls, slabs, columns, etc., using drills, sharpeners, scissors, chisels, etc.

The family table takes into account as much as possible the specifics of the different types of processes (drilling, drilling, breaking, uncovering ...) and customer needs profile for different climatic and geographic areas, as well as application, productivity, ergonomics, requirements and more. special requirements.

PRODUCT DEFINITION: HAND-HELD HAMMER DRILLS (PERFORATORS)

Product description: Manual hammer drill tools for impact boring. Hand-held hammer drills are widespread in construction and repair activities.

IDENTIFICATION AND SYSTEMATIZATION OF CLIENTS 'NEEDS

In order to conduct a survey of customer attitudes and assessments, it is necessary to create a systematization of objectives and tasks for the product of its development strategy. The following steps are suggested to identify customer needs:

- Determining the functional range of the product
- Collecting raw data from different stakeholder groups
- Interpreting raw data
- Organization and structure of customer needs by interested groups
- Evaluating the importance of each need
- Reflection of the knowledge gained in the product development process
- Continuous improvement of the product specification.

3.3.2. Development of indicators for customer needs

In order to conduct a customer needs and assessment study on the above mentioned methodology, it is necessary to create a system of product indicators (IDHHPT) in the context of its market strategy to consumers. On the basis of a large number of analyzed sales data for IDHHPT, 49 indicators of customer needs are highlighted. The following table outlines these systematized needs.

Table 3-2: Consumer Needs Table

No	System	Name of the need	Significance
1.	IDHHPT	Provides good energy for impact and puncture drilling.	1
2.	IDHHPT	It has low vibrations and does not get tired after many hours of work.	1
3.	IDHHPT	It lasts several hours of heavy use.	2
4.	IDHHPT	May pierce holes in solid materials.	2
47	IDHHPT	It remains comfortable when it is in the sun for a long time.	2
48	IDHHPT	It's easy to handle when drilling.	1
49	IDHHPT	It's easy to handle at break.	1
50	IDHHPT	With nice sound is when it is used.	2

The next important step in the development process is to transform client needs into technical requirements, and these are themselves to be defined by the technical specifications of the product in measurable parameters. Here is the basic idea of QFD, which allows to transform internal and external needs into product specifications. QFD can be used to prioritize requirements, find correlations, assess solutions, and compare the concept with competitors (Valtasaari, 2000). In the first phase of the definition of the family are analyzed the most commonly used percussion mechanisms, patent solutions for this type of mechanisms, as well as used in this class of machines quick grip tools.

Familial architecture is designed with the utmost coverage of customer needs and at the same time reaching the maximum level of unification of drives, according to the order of the company's electric motors. The approach proposed by and further developed by the author with the addition of non-quantifiable indicators is used. (Sharman & Yassine, 2004)

Table 3-3: Transforming needs into a technical specification

Name of the need	Parameter/function		weight	power	Spindle speeds	Number of strokes	Torque	Power of impact	Attack: or the drill	Drilling	Drilling in concrete. Range	Drilling in concrete. Productivity	Dulling	Electronics	Brushes	Construction	Vibration protection	Functions	Priority
	Dimension																		
1.	provides good energy for impact and punching action			X		X		X	X		X	X	X	X	X		X	X	1
2.	has low vibrations and does not get tired after many hours of work	X						X					X	X			X		1
47.	is easy to handle when drilling													X			X		1
48.	is easy to handle when churning													X			X		1
49.	has a nice sound when used	X										X	X		X				2

DEFINITION OF FAMILY TABLE ARCHITECTURE AND MAIN TECHNICAL SPECIFICATIONS

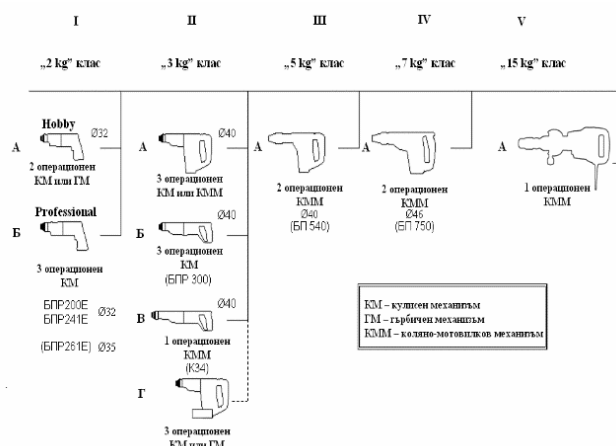


Figure 3-10: Developed range of impact and impact drilling machines with pneumatic vacuum impact mechanisms



Figure 3-11: Family table of impact and impact drilling machines with pneumatic and vacuum impact mechanisms - final structure and architecture

The structure is matrix and horizontally develops in weight classes 2, 3, 5, 7 and 15 kilograms. This structuring is determined by the market traditions. On a vertical axis is structured in terms of functionality, conceptual features (positioning of the drive) and by source of the drive - cable or accumulator.

The main advantages of the family table developed that way are:

- Innovative Resonance Impact Pneumatic Vacuum System - New in the World Market(patented by Author);
- Optimal range of the family as an area and a dimensional order allowing for flexibility, maximum satisfaction of consumer needs and efficient production;
- The main differences here are the use of virtual prototypes at the earliest possible stage. This applies to a very high degree to the development of an innovative resonance shock system. This is a new concept based on a well-known physical effect, which however is generally considered harmful in the technique, and here it is proposed to use resonance to increase the efficiency of the impact system. The lack of sufficient information and experimental research necessitates the use of VP as the main tool for the research and conceptual development of a resonance shock system as well as for the creation of family architecture as a function of this system and its associated electronic drive management system of resonance mode. These steps will be shown with in detail as an approximation of the approach with the maximum early and large application of VP in Chapter 9.

CONCLUSIONS

- Due to the need for a high degree of integration and close interaction between the elements of the individual systems in the specification and conception of mechatronic products, the necessity of applying the methods of virtual engineering from the earliest stage of development;
- Based on Quality Features (QFD), an approach to identifying user needs (using prototypes) and transforming customer requirements into technical specifications;
- On the example of a developed concept of a hammer-drill family, the efficiency of the above approach has been proven by achieving good family structure, members being defined in such a way that the functional-value overlap between members is minimal, such as the level of unification all members to be as high as possible;
- An original principle of a specific quasi-resonance mode of operation of a pneumatic vacuum mechanism with increased impact energy efficiency and a design, patent protected by a worldwide patent is developed.

3.4. INNOVATIVE APPROACH FOR CONSTRUCTION, ARCHITECTURAL BUILDING AND DEVELOPMENT OF COMPLETE PRODUCTS IN A DISTRIBUTED VIRTUAL ENVIRONMENT

The main trend for the development of complex products is the transition from system design to functional and subject level to modular construction of complex systems with minimal investments in new elements. At the same time, with the introduction of electronic sensor systems in these products it is necessary to include in the process of development and new participants - specialists in electronics and software.

Conceptual development

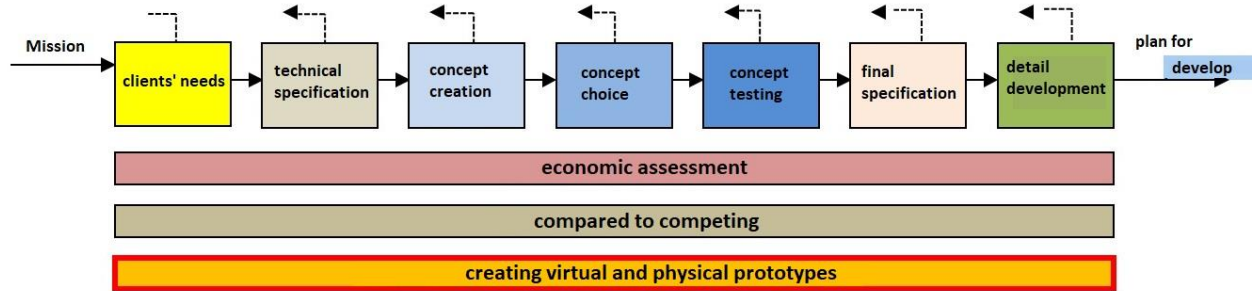


Figure 3-14: Conceptual development. A sequential iterative method for product development

These challenges call for a new methodology and approaches in conception, architectural construction and especially in the validation of complex products in the new information, technological, organizational and distributed work environment.

In this respect, the above-mentioned iterative-iterative methods and development approaches are not fully adequate to highly structured and accelerated development processes, especially when creating more complex products. (Figure 3-14)

One of the approaches to designing complex systems is the so-called "V" approach for decomposing and subsequent integration into the design process. (Didier, et al., 2017) (VDI2206, 2004). However, it does not take into account the interconnectedness of the individual nodes in the multivariate construction and in the modular systems to the extent necessary and is thus not sufficiently effective as far as it does not investigate variant build and validation in connectivity.

DESIGN STRUCTURAL MATRIX (DSM)

DSM is a common method for presenting and analyzing system models in different application areas. DSM is a square matrix (i.e. has an equal number of rows and columns) that shows the links between the elements in the system. There are three basic building blocks for describing the relationship between system elements: parallel (or concurrent), sequential (or dependent) and related (or interdependent).

Compared to other system modeling methods, DSM has two main advantages:

- Provides a simple and compact way to present complex structures.
- DSM allows a number of analyzes such as clustering (to facilitate modulation) and consistency (to minimize cost and time risk in processes) of the construction.

3.5. CLUSTERING (MODULE BUILDING) BASED ON DSM

When DSM elements are the product design components (i.e., component-based DSM), the purpose of manipulating the matrix changes significantly from that of the sequence algorithms. The new goal is determined by finding subsets of DSM elements (i.e., clusters or modules) that are mutually exclusive or minimally interacting subsets, i.e. clusters as groups of elements that are interconnected to a considerable extent while they are little connected to the rest of the system. This process is called "Grouping" or modulation. (Sharman & Yassine, 2004)

3.5.1. EXAMPLE: DSM for conceptual and structural construction of a forklift truck

CONCEPT. MAIN COMPONENTS OF THE PRODUCT

An important stage in the development of a product is the unification of its core nodes. It is also directly related to the concept of the construction itself. The main components of the product for the example under consideration are made by developing 21 functional constructive groups and systems. The clustering cluster of DSM in this project makes it possible to build optimal structural configurations based on the degree of interaction between the elements of the entire machine. Because of the specificity of connectivity in a complex product, such as, for example, the lifting equipment, it is proposed to specifically define the connections as bonding elements in the DSF matrix, the links being described as follows:

S - relationship of subordination from row to column and from column to line. In the case of a link of this type, the change in one element would result in a mandatory change in the subordinate element;

O - Optional link from row to column (over diagonal) and from column to row (under diagonal). In a connection of this type, changing into one element would NOT cause a mandatory change in the linked element;

X - Interconnected link type from row to column (over diagonal) and from column to row (under diagonal). In the case of a link of this type, the change in one element would result in a forced counterpart to the interconnected element.

These three definitions of connectivity add a new element to the DSF matrix building and allow for more modular and modular structuring.

Table 3-4: DSM of connectivity

	1. Chassis	2. Oil reservoir	3. Tank fuel	4. Counterweight	5. Rear axle	6. Wheels and tires	7. Front bridge	8. Braking system	9. Clutch	10. Transmission	11. Hydraulic system	12. Engine	13. Intake system	14. Exhaust system	15. Cooling system	16. Lifting device	17. Boxes and gadgets	18. Electric management	19. Cabin and seat	20. Steering system	21. Lighting and signal
1. Chassis		S	S		S			O		S	O			S	S	X					
2. Oil reservoir					O					O						X					
3. Tank fuel	O			S			X	O								O		S			
4. Counterweight			O									O							O		
5. Rear axle	O											X	O					S			
6. Wheels and tires																					
7. Front bridge			X	X				X		S		O									
8. Braking system			O			X	X		O	O	O		O		O			O			
9. Clutch								O											O		
10. Transmission	O	O																	O		
11. Hydraulic system	O	O						X											O		
12. Engine				X															X		
13. Intake system							O							S		S					
14. Exhaust system	O											O	O								
15. Cooling system	O																				
16. Lifting device	O		X										X				X	S			
17. Boxes and gadgets																X		S			
18. Electric management system	O		O	O	O																
19. Cabin and seat								O				O	O							O	
20. Steering system	X			O								O								O	
21. Lighting and signal																			O		

The key element of this development approach is by moving from nodes to module building, subject to the rules proposed above. The DSF matrix defines the interconnection of individual groups and systems. They are grouped in the neighborhood according to their functional connectivity and autonomy in the 7 basic modules (clusters) shown in Figure 3-19.

THE DESIGNATION OF MODULES IN STRUCTURAL GROUPS MUST FOLLOW THE FOLLOWING BASIC PRINCIPLES (AUTHORIZED BY THE AUTHOR ON THE BASIS OF PRACTICAL SOLUTIONS): DEFINITION OF INTERFACE BETWEEN MODULES

The conceptual construction of the forklift example, it can be argued that such a developed concept enjoys a high level of modularity of the construction while preserving the unification of nodes and elements in the respective separate module of the system as well as between them. The novelty of this design strategy lies in the fact that from system design, as the nodes in the connectivity table, are transformed into a new architecture - namely clustering or modular design. Composing modules into larger units allows descriptions to move upward with the same level of abstraction.

EXAMPLE

For illustration, an example of NEXEN Liftruck's work from the author's practice is used. Figure 3-20 shows the architecture of the NEXEN FD25 systems listed in Figure 3-19 as a DSM matrix of connectivity, shown by indices M1 to M7.

Some of the systems are physically distributed in different parts of the forklift, connected to interfaces such as hydraulic hoses, electrical wires, drive couplings, etc.

Figure 3-19: DMS of connectivity

	1. Chassis	14. Oil reservoir	15. Tank fuel	2. Counterweight	5. Rear axle	18. Wheels and tires	3. Front bridge	4. Braking system	6. Clutch	7. Transmission	13. Hydraulic system	8. Engine	9. Intake system	10. Exhaust system	11. Cooling system	16. Lifting device	17. Boxes and	19. Electric	20. Cabin and seat	12. Steering system	21. Lighting and signal	MODULES	
1.Chassis	1																						M1
14. Oil reservoir		1																					
15. Tank fuel			1																				
2. Counterweight				1																			M2
5. Rear axle					1																		
18. Wheels and tires						1																	
3. Front bridge							1																M3
4. Braking system								1															
6. Clutch									1														M4
7. Transmission										1													
13. Hydraulic system											1												
8. Engine												1											
9. Intake system													1										
10. Exhaust system														1									
11. Cooling system															1								
16. Lifting device																1							6
17. Boxes and gadgets																	1						
19.Electric management system																		1					
20. Cabin and seat																			1				
12. Steering system																				1			
21. Lighting and signal																					1		M7

In this methodology, we have a significant difference from system design based on the separation of individual systems - for example, hydraulic system, steering system, transmission, etc.

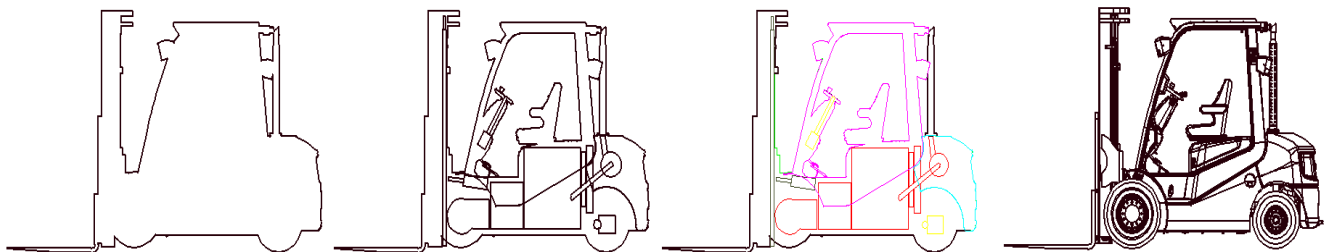


Figure 3-20: System architecture of NEXEN FD25

Left; system structure at a system level showing the different systems of the machine and the relationship between them. Right; structure structured on modules of the machine represented by modules and relationships between systems and modules

3.6. MATRIX APPROACH TO DEFINING THE FUNCTIONAL ARCHITECTURE OF THE PRODUCT TO DISTRIBUTE THE NEEDED FUNCTIONS BETWEEN THE DIFFERENT BASIC SYSTEMS

Development processes are increasingly complex and architecturally they are looking for increasingly fragmented and structured concepts and architectures, and very often fragmentation takes place on a functional level - elements, nodes or modules with clearly defined interfaces or the individual stages and levels of technological readiness in the development process.

			Mech. structure	Kinem. movem.	Electr. system	Electron syst.	Sensors and comunic.	Software system and apps	Hydraul. and fluid systems	Optics
Power	Nominal	[W]								
	Output	[W]								
Rotational speed	Idle	[min ⁻¹]								
	Nominal power	[min ⁻¹]								
Number of strokes	Reverse	R, LR								
	Idle	[min ⁻¹]								
Torque	Nominal power	[min ⁻¹]								
		[Nm]								
Energy of impact	Normal	[J]								
Assemble		-								
Drilling	sds plus/sds max	[mm]								
	Steel ϕ	[mm]								
Drilling in concrete. Range.	Wood ϕ	[mm]								
	Drill ϕ	[mm]								
Drilling in concrete	Boring ϕ	[mm]								
	Drills ϕ	[mm/min]								
Shaking	Drill ϕ	[cm/min]								
	Performance	[kg/h]								
Electronics	Constant									
	Adjustable									
	Smooth start									
	Indication of modes									
Construction	Overload protection									
	Motor									
Vibration protection	Monoblock in shell									
	Monoblock elastically suspended									
Functions	Vibrating grip									
	Drilling									
	Impact drilling									

Figure 3-22: Matrix approach to define the functional architecture of the product

Below is a matrix approach to defining the functional architecture of the product in order to allocate the necessary functions between the different core systems (Figure 3-22, Figure 3-23)

CONCLUSIONS FROM 3

- An approach is developed to transform customer needs into technical specifications when designing complex products.
- The fulfillment of many and largely contradictory requirements to be met by the studied modular structures determines the urgency of using a new non-traditional interdisciplinary approach when designing them.
- An approach to the automated design of complex machine-building products on a modular basis through virtual engineering technologies has been developed through the appropriate separation of the main components of the system by applying the DSM modified method.
- A matrix approach is proposed to define the functional architecture of the product to allocate the necessary functions between the different basic systems in three steps in three sub-matrices:
 - Formation of the functional architecture of the product in order to allocate the necessary functions between the main systems - mechanical, electrical, electronic, etc.
 - The product interface architecture is built into a matrix based on the formed functional architecture by defining unmodified or "hard" interface definitions;

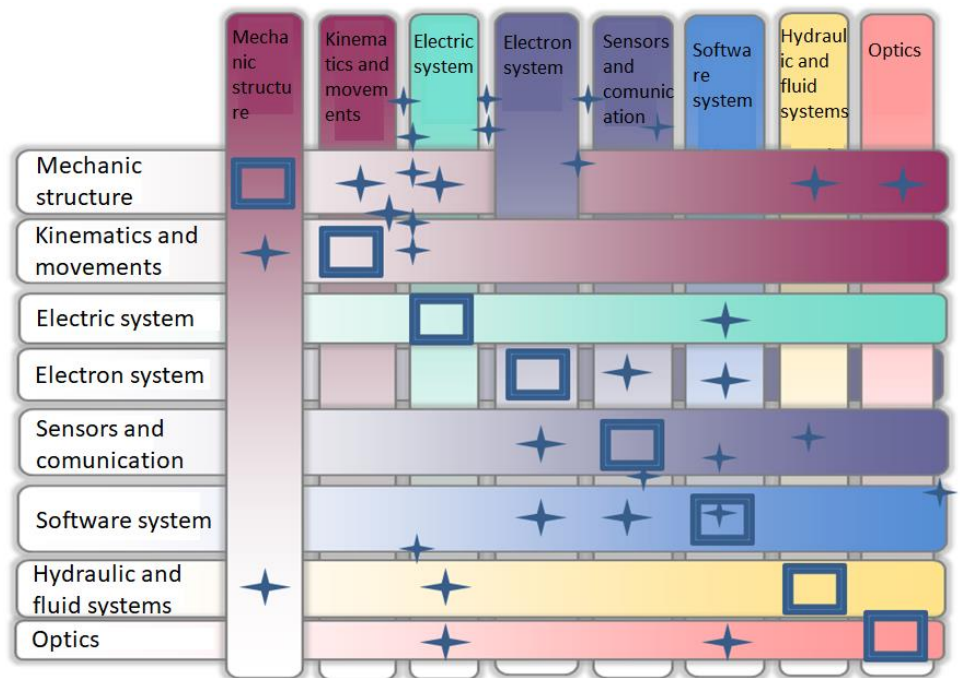


Figure 3-23: Matrix approach to define the interface architecture of the product

- A matrix type also defines the "technological readiness level" of each element of a functional architecture with firmly defined interface definitions.
- **This approach makes it possible to develop in parallel individual systems or elements with different levels of technological readiness based on unchangeable interface definitions.**

4. ANALYSIS OF THE APPLICABILITY OF SIMULATION MODELS AND ANALYZES AS A MAIN VIRTUAL PROTOTYPING ELEMENT

Engineering analysis is a scientific analytical method based on system decomposition to a function or mechanism level to analyze and evaluate components in accordance with basic physical principles and natural laws. Performing engineering analysis follows the main types of activities shown graphically in Figure 4-1.

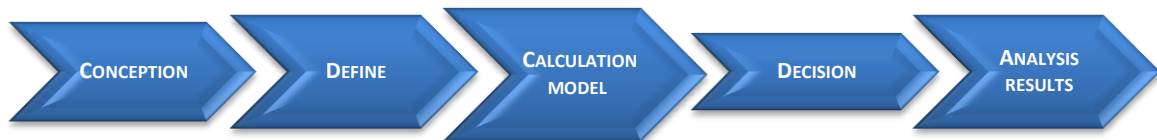


Figure 4-1: Main activities in engineering analysis - basis for virtual prototype

VP are interconnected simulation models based on common 3D boundary conditions and material models for performing sophisticated product studies in a "digital environment" simulating real operating conditions in interconnected physical processes. A definition of a calculation model, a simulation model / engineering analysis, and a virtual prototype is shown in Figure 4-2.

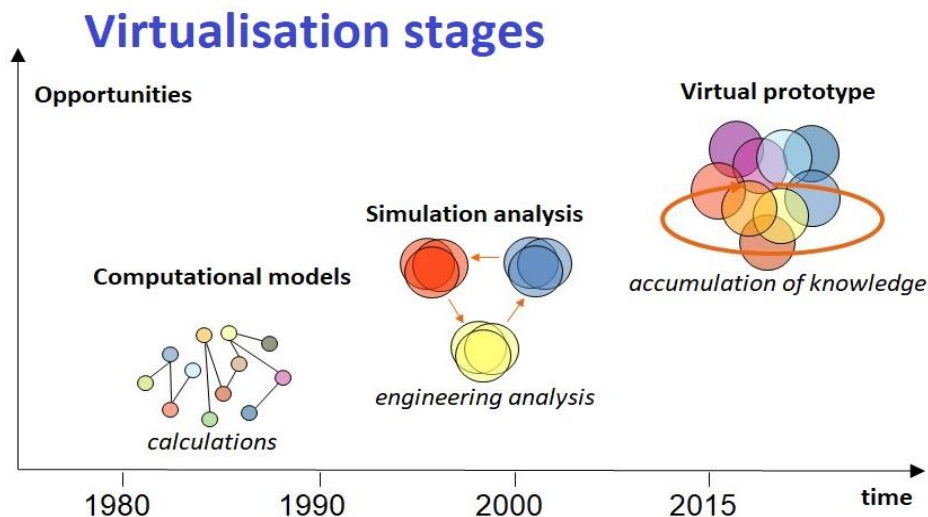


Figure 4-2: Virtualization levels over the years

4.3. APPLICABILITY TO SPECIFIC STRUCTURAL ANALYSIS

4.3.5. Structural Explicit Impact Analysis

The analyzes considered so far use mainly implicit approaches, mainly because of the duration of the simulated physical process (see Figure 4-13). Explicit approaches are more appropriate in the following cases:

- Fast-running processes, due to their specificity described above, significantly reducing the calculation time;
- highly non-linear nature of the research process;
- difficulty in bringing the task through an implicit approach.

The characteristic of the explicit approach is that the results that will be obtained will be accurate if the steps are small enough. The insufficient number of steps leads to a deviation from the right solution, but increasing them also increases the decision time. Thus, the maximum time interval between two steps is sought, which will achieve a sustainable solution. It is determined by the necessary condition of Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) for bringing in the differential equations, which in one-dimensional form is written as:

$$C = \frac{c * \Delta t_{max}}{\Delta x} \leq C_{max}, \text{ known as the Courant number.}$$

This condition means that for an interval $\Delta t_{\max}$, the distance traveled by the fastest propagation wave in the model ($c \cdot \Delta t_{\max}$) must be less $C_{\max}$ times than the smallest element size in the direction Δx . In the case of explicit assays, $C_{\max} = 1$.

For example, when analyzing a steel structure having a minimum characteristic element length of 5mm, the recommended maximum value for the time interval is 10-3 ms. (Roth, et al., 2002)

4.4 NON-DEFORMABLE SOLID MECHANICS

Engineering analyses, related to the mechanics of non-deformable bodies, investigate the dynamics of systems of solid bodies performing motion without taking into account their deformations. Typical applications are most often the movements of machine parts considered in terms of their parameters such as speed, acceleration, strokes, etc., in which kinematic or dynamic (including impact) physical processes are depicted.

EXAMPLE OF APPLICABILITY

This type of analysis has been demonstrated to optimize the operating parameters of a hand-held power tool. The goal of optimization is to increase the impact energy while maintaining or decreasing the vibrations in the handle (respectively the reaction). The built-in virtual computational model enables the system parameters to be varied to optimum performance, with a schematic diagram of the system

shown in Figure 4-18.

Components of the model are the main work pieces of the resonant pneumatic vacuum mechanism:

intermediate lighter

(indicated on the diagram with B); a fighter (indicated on the R scheme); a plunger (indicated on the diagram with P); piston axis (indicated on the diagram with PP); flywheel (indicated on the diagram with C); cv axis (indicated by PCR); crank (indicated on the CR scheme); spindle (indicated on the SP scheme); tool (indicated on the diagram with T); processed material (indicated on the T diagram).

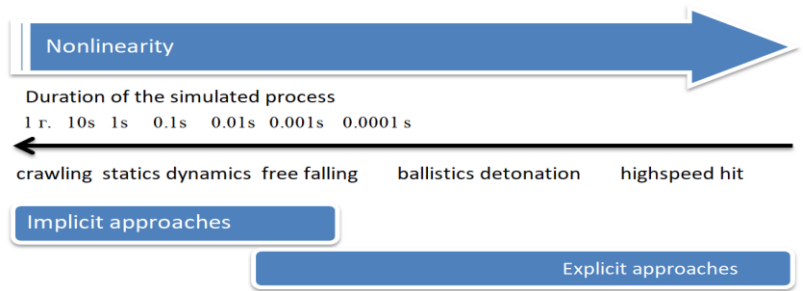


Figure 4-13: Structural Explicit Impact Analysis

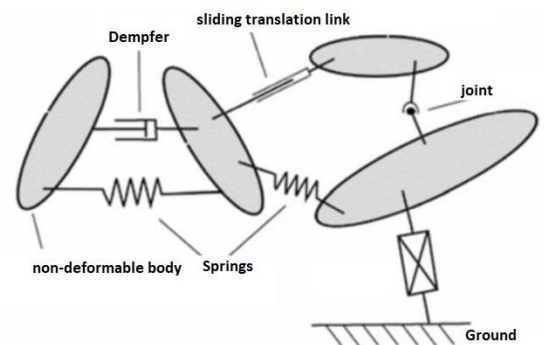


Figure 4-17: A system of non-deformable solids

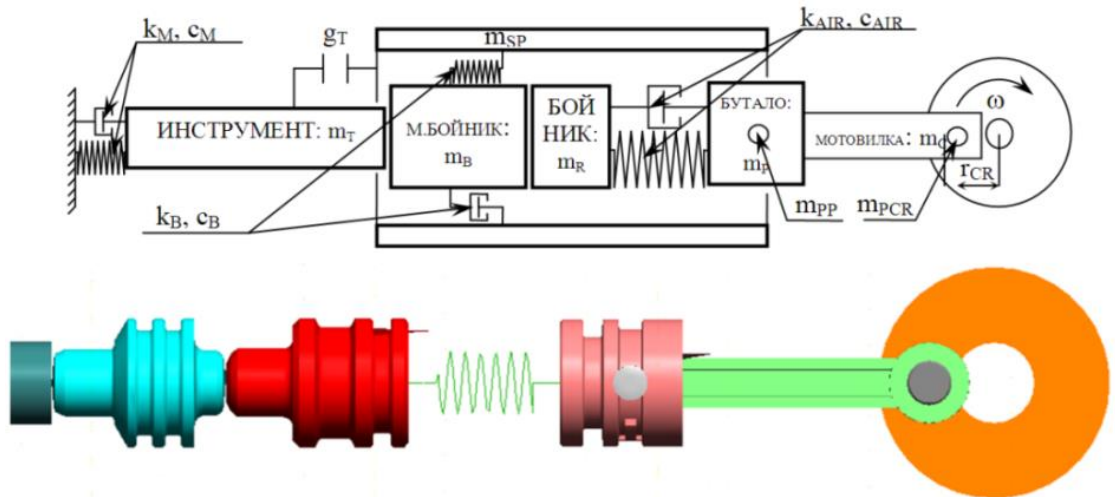


Figure 4-18: Mechanics of non-deformable bodies. Application

4.6. MULTIPHYSICS ANALYSES

EXAMPLE OF THERMOFLUID ANALYSIS WITH APPLICATION IN VP

It involves joint solutions to fluid mechanics and thermal processes in solids. The subject of the study is an automated system for thermal processing of microprocessors by convective heat exchange. The process is the welding of the contacts to the pad (Ball Grinded Area installation via reflow process).

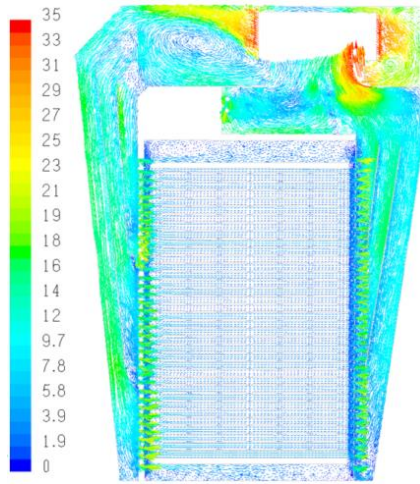


Figure 4-32: Multiphysical analyses. Application in thermofluid process. Flow rate in longitudinal section through the turbine axis (vector representation), m / s

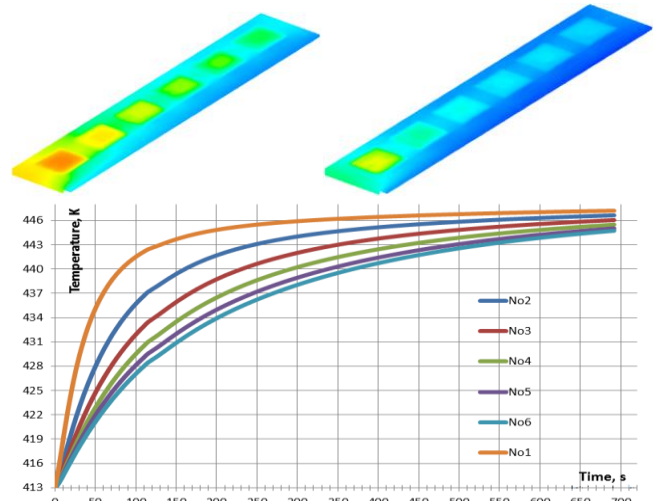


Figure 4-33: Multiphysical analyses. Application in thermofluid process. Temperature variation over time, K

The basic requirement is to observe the corresponding heating mode (see figure). The heat output to the products processed is recovered by heating the air with heaters located horizontally in the inlet zone of the fan (below the axis of rotation). The project involves optimizing the design to reduce time for placement and reaching a maximum temperature difference between the components below the required 3 °C.

CONCLUSIONS

- **Extended definition of VP is proposed** - the technology includes the creation and use of virtual simulation models in reporting interconnected processes and phenomena for Exploration and Validation of Functionality and Performance.
- **The capabilities of specific types of engineering analysis have been explored** in terms of their applicability in solving different engineering tasks, with emphasis on related interactions underlying the VP. In practice, the behavior of a particular piece, assembly or machine can only be adequately analyzed with the help of a VP.

4.7. REVERSE INTEGRATION OF THE OPTIMIZED GEOMETRY MODELS IN THE DEVELOPMENT PROCESS

Approaches for the exchange of information from the optimization work process (OWP) to the product development process (PDP). Three basic conceptual approaches based on the application of these existing tools have been developed. They are schematically shown in Figure 4-35. Each step is described below in detail. Two major approaches are possible, as shown in the scheme above, one of which has two varieties:

- **Generative approach:** The main specificity is that the final CAD model is new, different from the one available in the PDP.
- **Comparative approach:** The main specificity is that the CAD model originally in the PDP, which is integrated in the OWP.

4.8. APPLICATION OF VIRTUAL PROTOTYPE FOR TECHNOLOGY ORIENTED DESIGN AND CONSTRUCTION

Technological design means building forms and constructions tailored to the materials and production capabilities of the available technology base, defining tolerances and control processes compatible with materials and production volumes.

The verification of the technological requirements of the planned production processes has been carried out continuously since the earliest stages of the development.

These requirements depend on the materials and the design of each detail and are largely the result of empirical solutions of designers at different stages of development. Production technologies are very close to the materials used to produce the parts.

This is shown graphically in Figure 4-43. However, this is not always possible and the earliest possible stage for applying the technological requirements depends on the particular task being solved. The possible stages are summarized:

- When preparing the workspace
- After generating a test version before calculating it
- After obtaining the optimization result, at the end of the optimization cycle.

On Figure 4-47 a multi-step approach to solving optimization tasks is shown, taking account of production constraints.

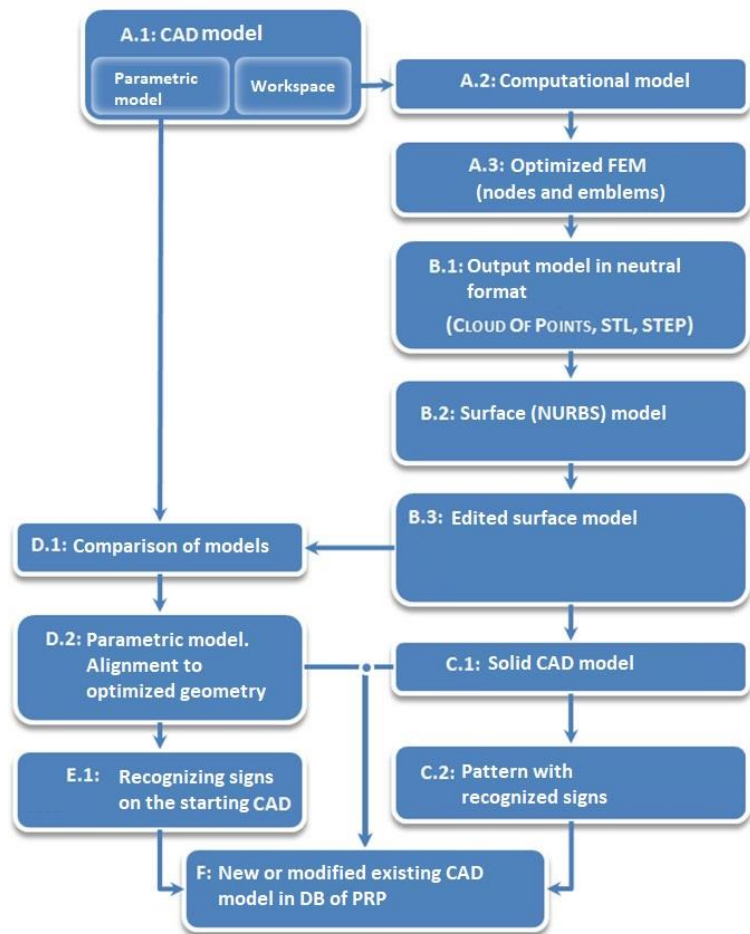


Figure 4-35: The process of optimization in the overall product development process

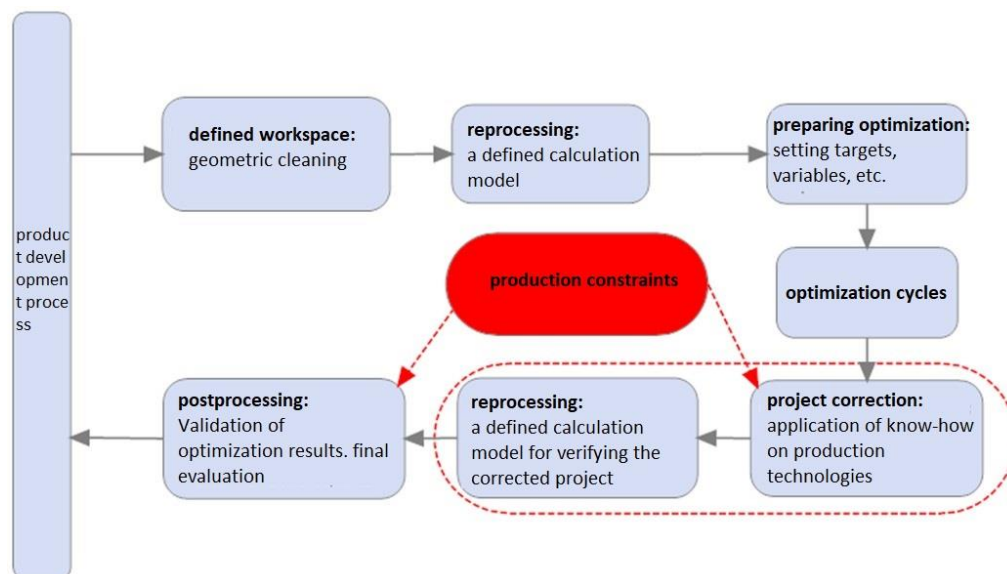


Figure 4-43: Process of Solving Numerical Optimization Tasks

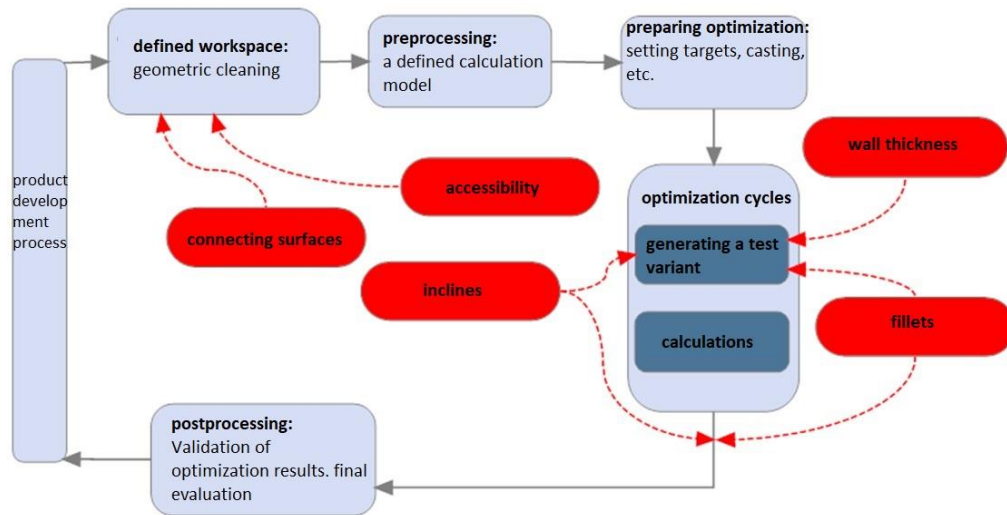


Figure 4-47: Process of Solving Numerical Optimization Tasks Taking into account the Technological Restrictions

CONCLUSIONS FROM CHAPTER 4

- Extended VP definition is proposed - the technology includes the creation and use of virtual simulation models, taking into account interconnected processes and phenomena for exploration and validation of functionality and performance.
- Two new approaches (generative and comparative) were proposed to successfully integrate an effective geometric model from form optimization into a common CAD model existing in the product development process.
- A methodology is proposed to include technological limitations by transforming them into geometric ones, presented as a limitation in the direction or magnitude of the respective displacements, and be defined vector by parametric tolerance data, defining collision surfaces, and defining interconnections.
- An engineering approach for assessing different structures from a technological point of view is proposed.

5. PHYSICAL PROTOTYPING. ANALYSIS OF ADVANTAGE TECHNOLOGIES AND HIGH-SPEED MECHANICAL PROCESSING FOR RAPID TOOLING

There are a large number of additive manufacturing methods and technologies, which for the most part are completely different from conventional methods for making physical objects (prototypes).

5.2. ADVANTAGE TECHNOLOGIES FOR METAL STRUCTURES BUILDING

Additive technologies have been extremely dynamic since the early 1980s. Initially, methods for 3D printing of plastic products were developed, but metal building technologies were further developed (Figure 5-8). The figure below provides a classification of technological methods for building metal components.

5.2.1. Selective Laser Melting – SLM

Selective Laser Melting, (Kruth, et al., 2005) (Pham & Dimov, 2003) is a method in which pulverizing material is used by laser beam to produce a metallic part with a practically unlimited complexity.

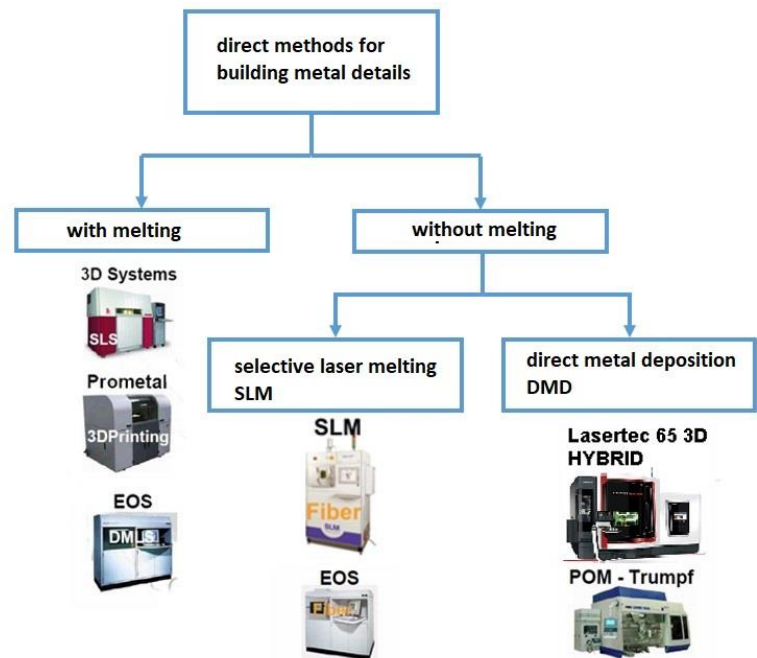


Figure 5-8: Some methods of additive building of metal components

PROS AND CONS

The advantages and disadvantages of the process are presented in Table 5-5. As the most accurate and applicable for medical purposes is the technology selective laser fusion.

Table 5-5: Advantages and disadvantages of selective laser melting

PROS	CONS
•Support structure of same material; •Work with a variety of materials - stainless steel, tool steel, cobalt, chrome, titanium, aluminum; •High accuracy - axes X and Y; •Ability to produce fully functional details; •No need to further model the model; •The technology allows for a very complex geometry; •The parts can be polished using conventional polishing methods.	•Errors due to thermal deformations; •Poor accuracy on Z; •High surface roughness of the model compared to stereolithography; •Removal of support structures is required.

5.2.2. Obtaining functional details by laser deposition of molten powder –Direct Metal Deposition (DMD)

Deposits of molten powder are laid over a movable platform as opposed to the powder bed as the technology discussed above. The working concept of a system of this type is presented in Figure 5-11.

Of particular interest are materials such as titanium. Most systems use raw materials, but it is also possible to feed the material as fine fibers.

In this case, the material is fed out of the axis of the beam.

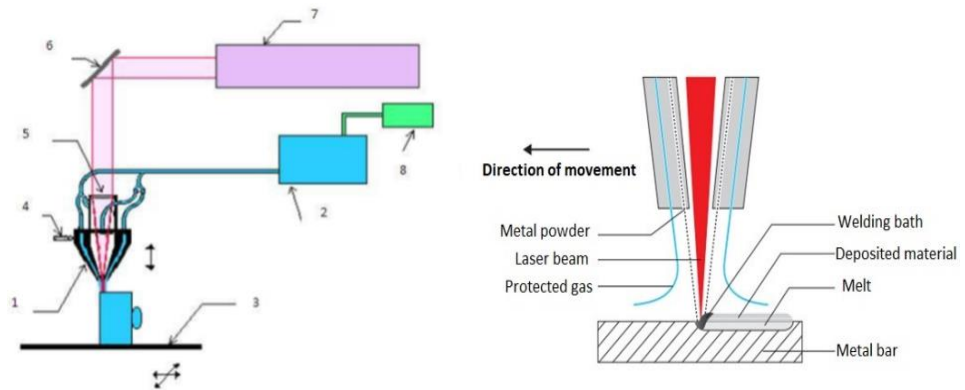


Figure 5-11: Diagram of DMD process: 1 - Extruder head; 2 - Powder material; 3 - Table; 4 - Protected gas inlet; 5 - lenses; 6 - Mirror; 7 - Laser; 8 - Transportable gas

Table 5-6: Advantages and disadvantages of the method of obtaining fully functional details by deposition of a laser engineered net shaping (L.E.N.S.)

PROS	CONS
Good use of material - with minimal losses (unlike SLM technology); They allow the construction of closed volumes of surfaces, leaving no powder material (as opposed to SLM technology); The finished details are close to the "net" shape and density of the same obtained by conventional methods; Ability to produce large-sized parts and / or finishing of additional elements.	The supporting structure is of the same material as the main one, which makes it difficult for removing; Necessity of postprocessing on the surface of the workpiece; Rough surfaces that require additional finishing.

One of the first such systems, implemented in the world practice, is located in Bulgaria – Sofia TechPark, delivered by a team of TU-Sofia (Figure 5-12).

5.3. STUDY OF APPLICABILITY OF HYBRID ADDITIVE TECHNOLOGY

In recent years, we have been working towards building turbine blades with additive technology. Both SLM and DMD technologies for 3D metal printing are tested. For DMD machines it is possible to implement milling and / or lathe operations - the so-called hybrid machines, which allows the finishing operations to be carried out on one unit. The lack of switching of units on its own makes it more accurate when making precise details.

For the purpose of this development, a unique hybrid machine from the highest grade Lasertec 65 3D (Figure 5-19) produced by DMG MORI is used.



Figure 5-12: Lasertec 65 3D Hybrid Machine

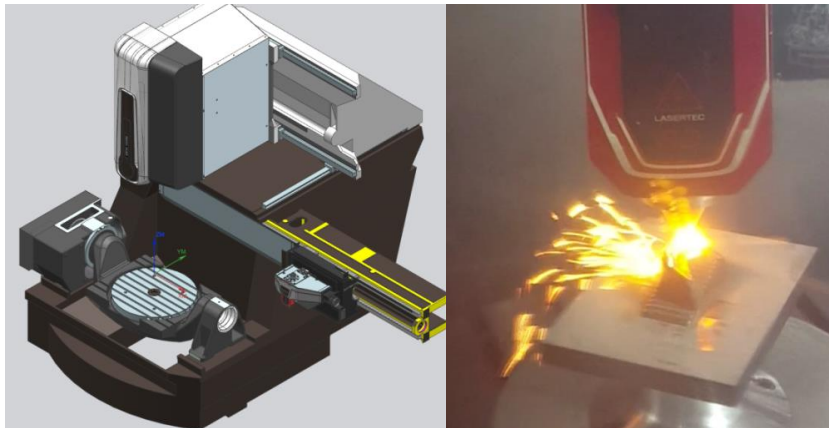


Figure 5-19: Lasertec 65 3D hybrid machine, located in the 3D Creativity and Fast Prototyping Lab - a virtual twin

Figure 5-28: Frame from the process of building a turbine blade detail

5.3.2. Examining the process of directly building metal structures by adding material with the Lasertec 65 3D hybrid system to identify key process parameters

A COAX 9 nozzle with a 3 mm diameter (Figure 5-28) is mounted for the purpose to the machine's laser head. Powder material of the type of tool steels with a grain size of 45-106 μm is used. The optimal parameters for working with a given material are determined by experiments, the process is iterative, and after each experiment, the obtained structure is examined. The main parameters to be studied are:

- Laser power [W];
- Feed rate [m/min];
- Powder flow (quantity of powder passing through the nozzle per unit of time) [g/min].

The ratio between feed rate and powder flow determines the shape and dimensions of the root (Figure 5-17) (Bax, et al., 2018). The power-to-flow ratio determines the adhesion between the layers (Figure 5-18)

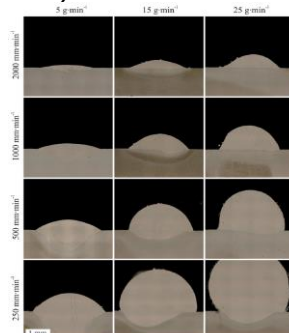


Figure 5-17: Examination of the ratio of feed speed to powder flow at constant power of the laser source

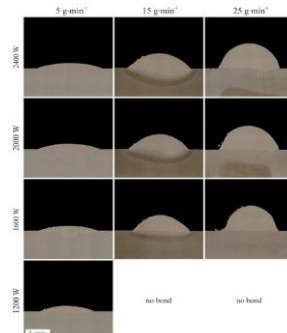


Figure 5-18: Examination of the ratio of power to powder flow at a constant feed rate

There are also so-called secondary parameters, which are usually not validated and adjusted when the process is first started. Such parameters are:

- Nozzle diameter (depends on the component) [mm];
 - Inert gas flow rate [l/min];
 - Focal length [mm];
 - Distance between the nozzle and the welded surface [mm].
- Second Stage - Virtual simulation and creation of control NC programs via DMG digital twin.

The digital twin is a precise copy of the physical machine. The DT of the machine is necessary not only for better visualization of the kinematics in the virtual simulation of the process, but also for post processing with the exact parameters of the used machine.

Figure 5-31 shows views of the produced part. Then another piece of the part is built to evaluate the internal structure. For this purpose, a thin section is made (Figure 5-32).



Figure 5-31: Detail view - III

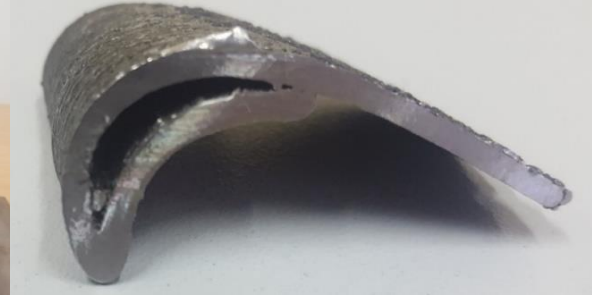


Figure 5-32: Cleaned up thin section for analyses

5.3.3. Evaluation of the geometric properties of the resulting 3D objects

Figure 5-34 and Figure 5-35 show the results of the comparison.

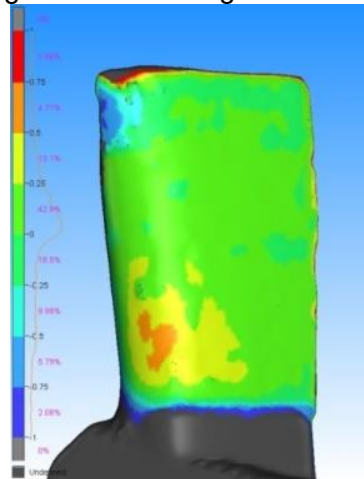


Figure 5-34: Normal distribution of geometry deviations - I

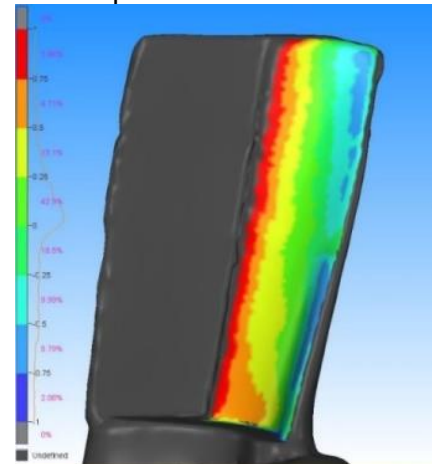


Figure 5-35: Normal distribution of geometry deviations - II

CONCLUSIONS

- When building metal structures using DMD, it is necessary to select appropriate parameters for the material.
- The produced part is usually not suitable for direct implementation in a given mechanism / system due to the rough surface.
- The internal structure of the workpiece is of exceptional quality (Figure 5-32). The details produced by DMD technology are characterized by high hardness (up to 67 HRC). The additional quenching is due to the extremely high temperature during the process (above 1500 °C).
- Evaluations of the geometric properties of the resulting object can be made by the values of Figure 5-34 and Figure 5-35. 61.4% of the geometric deviations are within ± 0.25 mm. The deviations are due to the rough surface of the workpiece (Figure 5-31).

5.5. MATERIAL CUTTING TECHNOLOGY - CNC HSM (HSM – HIGH SPEED MILLING) FOR RAPID PROTOTYPING

Additionally, production is not a universal solution for any case of rapid prototyping. CNC technology, as an alternative to material-adding methods, is economical, widely understood and widely distributed, offers a wide choice of materials and excellent accuracy.

The dynamics of the machine and axle drives are essential. This is also determined by the significant increase in HSM working axle feed rates. One such machine is in the acceleration or deceleration mode for much of the time it is running.

Particularly high requirements for the persistence of a number of momentary process parameters such as beating (requiring a special type of instrument holder with increased precision), high speeds, including over 40,000 rpm, adaptive feed control.



- Compact 5-axis-portal machine with linear drives in X/Y/Z max. acceleration > 5 g
- ULTRASONIC hard machining & HSC milling
- Water-cooled USB 42 spindle for High Speed Cutting with max. 42000 1/min. and ULTRASONIC machining with max. 40000 1/min

CONCLUSIONS

On the basis of the experience gained in recent

years in the country leading and the Balkan laboratory in FIT at Technical University of Sofia, as well as on the basis of a number of projects, the following more important areas of effective application of the additive and hybrid technologies can be identified:

- For geometric verification of the 3D CAD model;
- For validation of ergonomic characteristics, convenience and aesthetic perception;
- To meet specific consumer needs (e.g. design details for the space industry, implants in medicine);
- Creation of new optimized constructions without restrictions from the different technological processes and their constraints on the formation - this direction finds a whole new universe for forming and optimizing structures of metals, non-metals and multi-material compositions only by adding material;
- Due to the fact that the constructed object can be in practice with geometrically random surfaces, including cavities, completely new areas of applicability are found in the sense of integrating a traditional set of elements into more integrated components;
- The fact that no special pre-fabricated tool is required, demonstrates the immense advantage of additive methods with regard to the time required for site preparation versus conventional production methods.
- Some methods for creating physical prototypes by removing material, such as high speed milling (HSM), have a well-grounded place in creating PPs. This applies very much to PPs in a simpler form but with high accuracy and robustness as well as ultrasonic materials.
- The application of a combination of additive methods with material abstraction or so-called "hybrid" technologies opens up new horizons to the creation of PPs as well as direct production technologies.

Figure 5-40: High-speed machining system delivered in FIT, TU Sofia

6. STRATEGY FOR THE APPLICATION OF VIRTUAL AND PHYSICAL PROTOTYPING

One of the methods to solve these problems quickly and efficiently is to produce prototypes of the article. Very often there is a question of developing a partial or complete prototype. The balance is very substantial and there is no general rule of discretion - in each case, well-justified use of one or the other approach is applied. Below is an analysis of the advantages and disadvantages of the two types of prototypes.

6.1.1 Applicability of virtual and physical prototypes

Table 6-3: Comparison of VP and PP to evaluate common aspects of project evaluation.

Appreciated aspects	VIRTUAL PROTOTYPING (VP)		PHYSICAL PROTOTYPING (PP)	
	VP	Integrated VP	Hybrid VP+PP	PP
Aesthetic qualities				
Color	3	3	3	3
Form	0	1	2	3
Material	0	1	2	3
Ergonomics / Usability				
Mnemonic	3	3	3	3
Aesthetics	3	3	3	3
Easy to use	0	2	3	3
Convenience of use	0	2	3	3
Accessibility	0	1	3	3
Perception through the senses	0	1	3	3
LEGEND:	3	2	1	0
	Very good	Good	Neutral	Bad

Table 6-4: Assessment of the strengths and weaknesses of VP and PP prototypes in relation to important factors in PDP.

Appreciated aspects	VIRTUAL PROTOTYPING (VP)		PHYSICAL PROTOTYPING (PP)	
	VP	Integrated VP	Hybrid VP+PP	PP
Complexity of the product	3	2	1	0
Cost of change	3	2	1	0
Development time	3	2	1	0
Iterative development approach	3	3	2	0
Assessment of aesthetic qualities	3	3	3	0
Dynamic testing	3	3	3	0
Tactility	0	1	3	3
Functional testing	0	1	2	3
Interaction with users	0	1	2	3
Assessment of ergonomics	0	1	2	3
Develop a simplified structure	0	0	1	3
LEGEND:	3	2	1	0
	Very good	Good	Neutral	Bad

6.2. NEW OPPORTUNITIES AND REQUIREMENTS FOR PP

The VP and PP analysis clearly shows that the role of PP and testing is far from over, especially for virtual development of products.

Contrary to the belief that the VP will reduce physical testing requirements, there is more to the discovery of new applications, new challenges and opportunities to the PP.

In practice, a number of approaches are known to effectively implement VP and PP in a suitable combination to achieve the required outcome at the lowest cost. The well-known "V" virtual design approach gives very good results in the evolution of products with a high degree of interconnection in the behavior of the elements. Another aspect of combining virtual technologies with rapid physical materialization is applied at an accelerated pace in medicine, particularly in the

field of implantology. If a VP and PP are combined to apply a "W" prototyping approach, significant cost savings and prototyping time can be achieved with minimal risk of hidden deficiencies occurring in serial production.

6.5. FRACTAL DESIGN APPROACH

In order to avoid the deficiencies of V, as well as for more complex cases and the W approach, a new Fractal Approach has been developed and proposed in the process of product development (RIP). One of the main concepts in fractal systems is the scale of the system. In fractal approaches, the characteristic is identical to the structure of the fragmentation levels, whether in terms of complexity or variance, where the highest level refers to the whole product and the lowest to the smallest building element / node using fractal properties of the general approach. From the point of view of processes, self-worth can be seen in at least three different dimensions, namely:

- Structuring elements - for example, a separate node or a "Module" (separate product elements);
- Functionality - functionally differentiated systems (drives, sensors);
- Information architecture.

The characteristic properties of the fractal organization principle can be summarized as follows (Peraltaa & Marcosb, 2015):

- The fractal method is based on self-organization of functions or activities based on similitude;
- Self-perfection - Fractals self-indulge, that is, optimize their form and behavior (geometric, energy, informational, superficial, etc.) that allow them to adapt to any change in the environment to exist (contextual situation of response to external pressure);
- Sustainability: their interaction with the environment (time and spatial evolution) is achieved by generating and integrating the necessary diversity to achieve the goal - proper placement in the structure;
- Fractal-based systems are open: they exchange information with the environment;
- Fractals behave non-linear systems: their interaction with the environment and their sustainability is based on radical adaptation and gradual innovation. (Peraltaa & Marcosb, 2015):

The basic idea of this approach is to apply similar "fractal" elements to the development process in the presence of a large number of variants or families made up of unified elements or even more modulated on a modular basis. In this sense, the principle of modular building can be based on the fractal approach. Applicability is in two basic forms:

- When designing structures from "bottom up"

When generating variants or family lines of nodes and elements, it is necessary to apply identical "fractal" approaches and steps in their design - for example, in familial dimensioning of products, use identical or "Fractal" design approaches and steps to develop structurally similar elements with similar parameters.

- Prototyping and validating behavior

In variant or modular construction, a large number of variants or client configurations can be created. The main question of validating the specific variant or personalized solution in this case is how to be able to prototype and validate each option to reduce the risk of effects from the mutual influence of untested compositions.

For this activity, two approaches are widely used in practice:

- By analogy with the closest such composition with some behavior;
- Based on the known behavior of the individual elements / modules, assume the behavior of the whole composition.

In complex systems with strong interdependence and mutual influence of the elements, both approaches are risky and do not allow for the evaluation of the compositional effects.

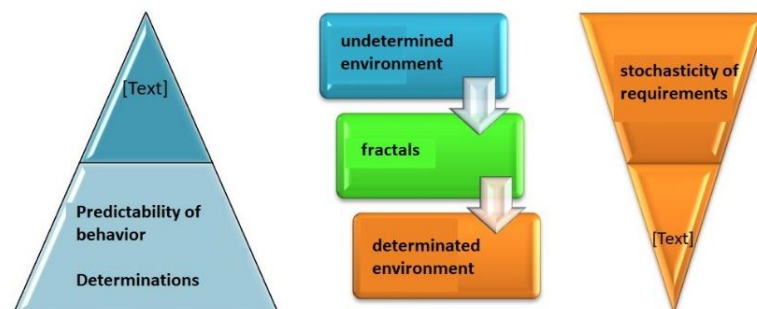


Figure 6-11: Determinism and openness. Fractal approach to design

Taking into account the shortcomings of the existing prototyping approaches of the composite variants described above, a new approach to sustainable fractal design is proposed and defined which is applicable in the design of complex type systems, in particular by means of family or personalization of the product best suited to customer requirements through the compositional application of the fractal approach.

There are several basic principles of fractal theory:

- Principle of fractal connectivity and organization:
- The principle of fractalisation of the design of a sustainable product:

This principle includes integrating the social, economic and environmental perspectives into fractal lifecycle approaches in terms of the required adaptation behavior (minimal complexity of induced upgrading or recycling costs). The fractal design approach must be organized and configured in recursive forms to minimize the complexity of the system and ensure its stability (Figure 6-12).

The level division provides the design system with a "three dimensional" self-leveling and dynamic management at each level or depth scaling (recursive insertion) when needed. This structure reduces complexity, guarantees system sustainability and allows for self-organization, self-regulation and self-control without the need for corrective action and efficiency of use (without interference, unnecessary spending of resources or duplication of information).

From here it can be seen that the area of applicability of the Fractal Approach is manifested in complex variant or modular based architectures of products with a high level of variation or personalization.



Figure 6-12: Principles of Fractal Design Approach

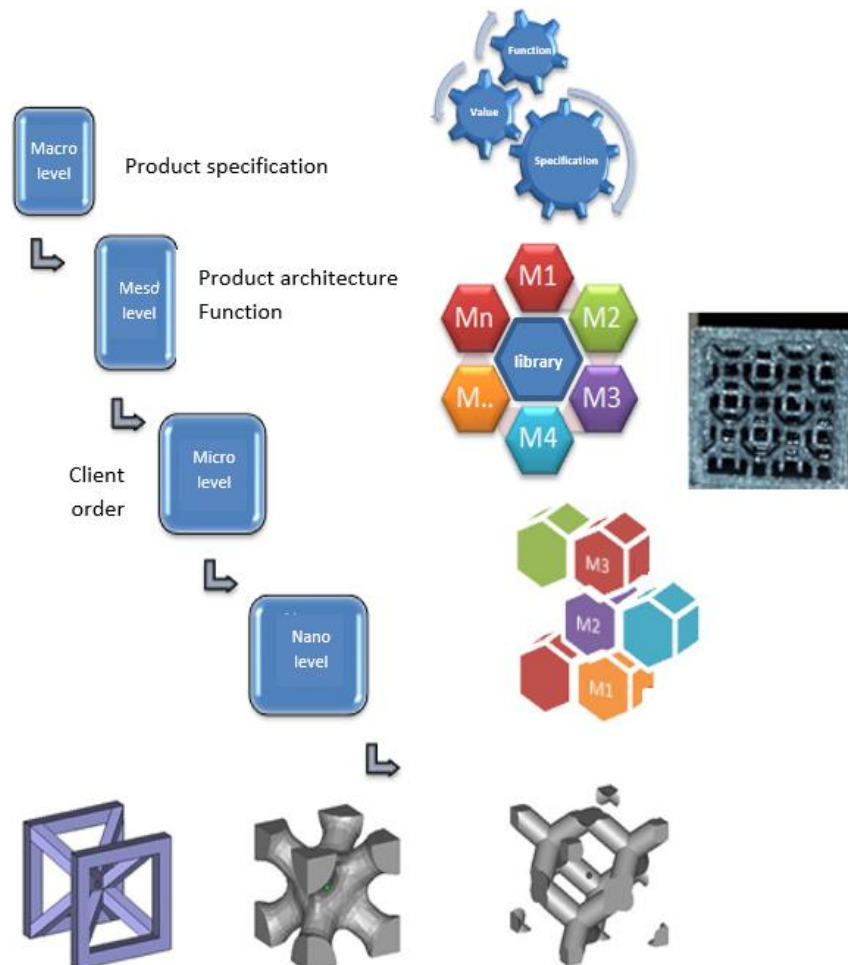


Figure 6-14: Fractal levels during the design stage

		Complexity >		
		Typical	Variance	Modularity
Degree of Individualization	Configurations	"V"	"W"	"W"
	Variation	"W"	"W"	"W"/"Fractal"
	Personalization		"Fractal"	"Fractal"
			"Fractal"	"Fractal"

Figure 6-15: Applicability of Fractal Design Approach

CONCLUSIONS FROM 6

- An innovative, fractal method of composing complex systems for rapid implementation of variants, modular re-use of components for high flexibility and efficiency of product and process organization and management throughout the life cycle of the product is proposed.
- The level of structuring is not limited and each level that is incorporated in the previous one has a fractal matrix relative to the system level.
- The main advantage of the fractal method, unlike previously considered, is the possibility that the process of development is not considered and managed as iterative as iterative, but as having many input points and with many possible outputs, depending on the project stage, the level of technological readiness and level of structuring of individual systems and fragmentation at a component level, with simplistic self-similar structural solutions.
- The developed Fractal Method allows rapid development, modular building, reusability of components, efficient change management, self-development in VP dimensioning and many other constructive and technological advantages on the one hand, as well as the openness of the development process with the possibility to attract additional design and engineering resources to the different stages or levels of readiness of the project.

7. DEVELOPMENT OF HYBRID METHOD FOR PRELIMINARY EVALUATION OF THE TRUST LEVEL IN RESULTS OF VIRTUAL PROTOTYPING (VP) OF MULTIPHYSICS PROCESSES BY PHYSICAL TESTING - "BLACK BOX / WHITE BOX "

A critical component in the application of the Product Development Process (PDP) for virtual prototyping technology is the level of reliability of the results of engineering analyzes and simulations with VP.

7.1. POSSIBLE APPROACHES

The possible approaches for the application of physical prototyping for verification and validation of virtual prototyping are discussed. The following figure (Figure 7-2) shows the different stages of conducting the engineering analysis and the location of the physical tests.

As can be seen from the figure, there are three approaches for applying physical tests to help virtual prototyping - according to the stage of their use:

- **Pre-Validation Approach to VP**
- **An approach for interim validation of VP**
- **Final approach for Validation of VP through PP results.**

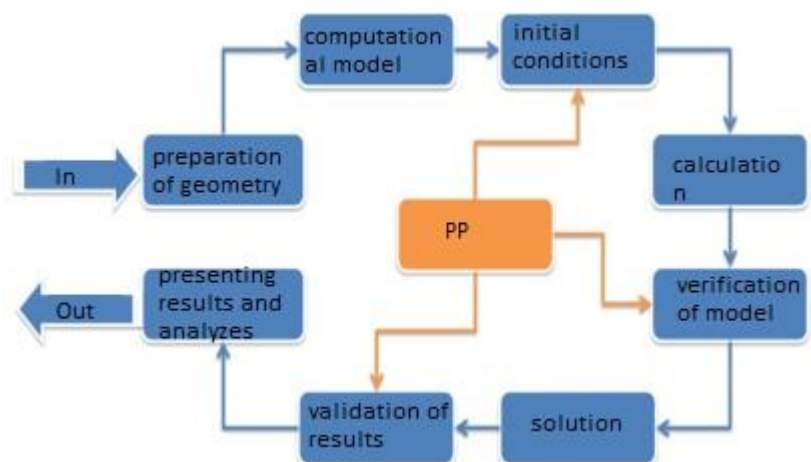


Figure 7-2: Stages of building a model of conducting an engineering analysis and a place of physical prototyping

7.5. NEW METHOD FOR APPLICATION OF "WHITE BOX" USING VP AND BLACK BOX TESTING USING PP

From the point of view of the information that is introduced and received from the prototype tests, they can be divided into two main categories: a "white box" when using a VP and testing a "black box" using PP.

The "White Box" implies that we have full visibility of the system's internal work, in particular the logic and structure of processes. Using white box testing techniques, the engineer can design test cases that are well-tested at the structural level but cannot obtain very accurate quantitative results due to the simulation-type virtual calculation.

Testing in a white box (also known as an "intelligible box" or "transparent box") suggests that the design analyst knows and understands how the VP works - they can "see inside" the simulation models,

Figure 7-14. Here, the author

offers a new method for exploring complex objects by combining the application of VP as a "white box" and the PP as a "black box" in iterative connectivity.

After the initial appearance of the VP has been constructed, test simulations are carried out at points of the space of the parameters, which can be adequately reproduced and tested with a physical prototype designed as a "black box" created for this purpose. The test results obtained from the FS are usually more accurate than the simulations. The resulting quantitative results of physical tests are appropriately interpreted in coefficients of VP models that are not well theoretically defined (e.g. friction coefficients, energy dissipation coefficients, contact effects, etc.).

This process is repeated iteratively until a good level of correspondence between VP simulation results and measurements from PP tests.

The novelty of the method lies in the iterative connectivity of VP and PP and, in particular, RB calibration by feedback from PP data through an internal micro iteration cycle. This task is essentially "inverse" to the exact results of the output and identical input effects to determine the parameters of the VP models. In order to solve this reversal task, the problem solving is repeated many times - set values of the respective coefficient in VP and follow the results of the simulations, thus applying micro iterations inside the VP to achieve good correspondence of the obtained results from the simulations compared to the measured PP tests at equal input parameters.

Figure 7-15 shows the combination of the application of VP as a "white box" and the PP as a "black box".

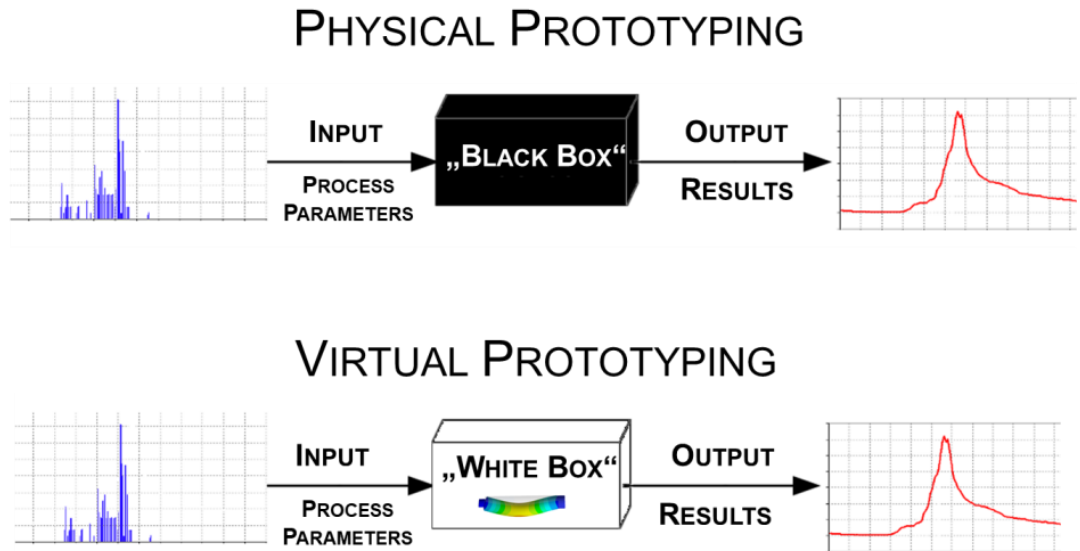


Figure 7-14: The method of combining the "WHITE BOX" using the VP and testing of the "BLACK BOX" using the PP

CONCLUSIONS

- A hybrid method has been developed to predict the level of confidence in the results of multiphysical behavioral simulations of the object by virtue of virtual prototyping (VP) together with physical PP testing based on the stage of the virtual prototyping process and feedback from physical parameters tests.
- Three approaches to assessing the reliability of the results of virtual prototypes - initial - for verification of boundary conditions, intermediate - to improve the accuracy of the results obtained and final - to validate the obtained results.
- A new method has been proposed to improve the efficiency and effectiveness of Virtual Prototyping called "WHITE BOX / BLACK BOX" for the study of complex objects by applying VP as a "white box" and VP as a "black box" in iterative connectivity to achieve fine calibration of VP. The novelty of the method lies in the iterative connectivity of the VP and the PP, and in particular the calibration of the VP by feedback from PP data via a micro-cycle.
- The "WHITE BOX / BLACK BOX" method and the three approaches to verifying and validating VP have been demonstrated in three successfully completed projects with international industrial partners used as demonstration test cases.

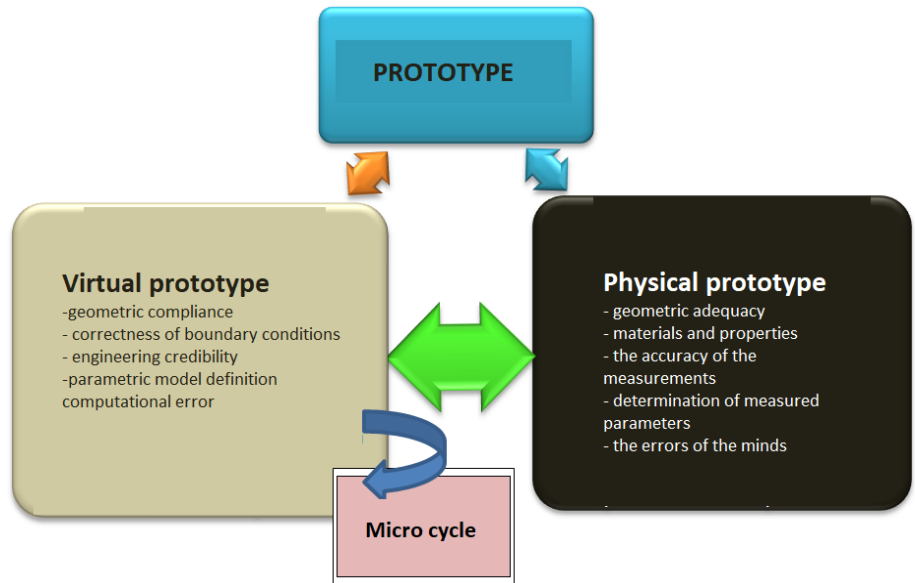


Figure 7-15: Combining the application of the VP as a "white box" and the PP as a "black box"

8. VIRTUAL PROTOTYPE AS A BASIS FOR DIGITAL TWINS. LL METHOD.

With the growth and industrialization of the Internet of Things (IoT) and the emergence of millions of intelligent, connected systems, the digital twin concept quickly became important in many industrial segments and promised to revolutionize the way companies design, build and maintain their products and processes.

8.1. DIGITAL TWIN CONCEPT

The concept of digital twin is mainly applied in the case where more information is obtained from a physically working product and the Internet of Things (IoT) platform as a communication environment. (LC-Insights LLC, 2016)

Here is an author's definition of the demarcation of the concepts of virtual prototype (VP) and digital twin (DT). The main things that distinguishes the virtual prototype from the digital twin are the following:

- VP is an abstract information and simulation "duplicator" of a nominal physical object and does not take into account the specific features of each physical object and uses abstract time and not the real time to simulate the processes;
- DT is not an abstract information and simulation "duplicate" of a real physical object but is individualized for each such object, taking into account the specific features of each physical object, therefore the digital twin (DT) is specific to each particular physical object.
- The DT includes within itself the real time coordinate – i.e. the digital twin collects data (in an information database, its integral part) about the behavior of the physical (or virtual) object as parameters received from the sensors, not only under certain conditions but also as a function of time.

In the case of Virtual Prototyping (VP), the Digital Twin concept can also be considered as an evolutionary transformation of VP in the course of its development and thus the VP is transformed from a validation tool during the design of one product (site) to digital twin and to apply the twin to the known practice in the field of complex products. The realization of upgrading the VP with associated databases to collect information about individual parameters from virtual tests, from

the physical prototype behavior, or even a functioning product, allows transformation from virtual prototype to digital twin.

8.2. INTEGRATED VIRTUAL DESIGN OF COMPONENTS THROUGH A NEW "LL" METHOD

In order to avoid the deficiencies of the "V" / "W" methods and also when more complex cases are needed in conjunction with the newly proposed "Fractal Approach", a new method is proposed here, based on the parallel development of the virtual and physical prototypes (physical prototype if necessary) in the process of developing a new product (PDP), as opposed to "V" / "W" methods, the process of development does not go from "general to specific and vice versa" the defined architecture develops the virtual prototype and the physical prototype in parallel, allowing separate elements of the system being designed to be in a different stage of readiness and to reconcile in the process without interface conflicts.

The second very important difference in the method is that in the proposed developmental ideology of VP. The virtual prototype is not built up of separate fragments for individual simulations of certain aspects of behavior, and from the very beginning the full architecture of the virtual prototype is started. The virtual prototype is not reconfigured or upgraded during the process of its creation.

Thus, to a much greater extent, it is easier to build interconnected models for the integration of process elements to achieve a complex and fully functional physical prototypes. Conversely, in the proposed method, the physical prototype can also be completely fragmented, serving separate aspects of product behavior and are mainly used to validate the virtual prototype. Here, the key idea is that physical prototypes create difficulties when having a lot of variance and modifications, and also that the mutual influence of the individual elements of the system and the connectivity of the processes will be ensured mostly by the consistency of the virtual prototype built on a fractal principle rather than an eventually symmetrically developed and growing physical prototype. Thus, the "LL" method allows to develop with upgrades in the individual fractal structures and the individual stages of the VP, saving time and resources, when a product has a growing complexity and volume of the physical analogue of VP.

In fractal structuring, each node (level) is developed, tested and implemented fractally (autonomously, self-similarly, in an identical algorithm), and the product is evaluated at the system level - in the common matrix. The "LL" method coupled with a fractal approach gives great flexibility to the organization of the process, great opportunities for varied design as well as reusing of nodes and elements in other solutions.

The second major idea of the proposed method is that in the process of building and after validating the virtual prototype, the VP is transformed from an abstract twin into an "individual twin" of the physical object or into a digital twin for each produced physical product. A graphical interpretation of this parallel flow of processes and subsequent transformation of VP into DT and its "cloning" for each produced product is shown in Figure 8-1.

CONCLUSIONS

- A definition is suggested for the demarcation of the concepts of VP and DT is proposed;
- A new "LL" method is proposed, based on the evolutionary construction of the virtual prototype and fragmentation of the physical prototypes in the process of product development (PDP) and the process of development is executed in hybrid and in parallel - the concept and architecture "Top to Bottom, the virtual prototype from bottom to top, and the physical prototype - fragmented by levels;
- In the proposed "LL" method, the VP is built from the very beginning on the basis of its overall architecture and is not being "built-in", but is "upgraded" throughout the process of its evolution. Thus, the "LL" method allows the VP to be developed with upgrades in the individual fractal structures and the individual stages, saving a great deal of time and resources for an analogous growing complexity and volume of a physical prototype;
- The proposed innovative "LL" method allows individual elements of the system being designed to be in a different stage of readiness and to develop at different speeds;
- The novelty of the proposed method is the principle of transformation - in the process of construction the VP is "trained" from the tests carried out with physical prototype and after its final validation the VP is transformed from an abstract "double" of the nominal product into an "individualized twin" of a particular physical object or "digital twin" of each individual product produced;
- The proposed methods of fractal design, modular construction and "WHITE / BLACK BOX" have been implemented in the context of industrial projects and have shown good results in terms of efficiency;
- The Industry 4.0 platform is an effective response to the changes in modern technologies at a new quality and functional level, combining the real world of production with the virtual world of information and communication technologies, where traditional industrial processes are complemented, developed and optimized by digitization and built-in intelligence.

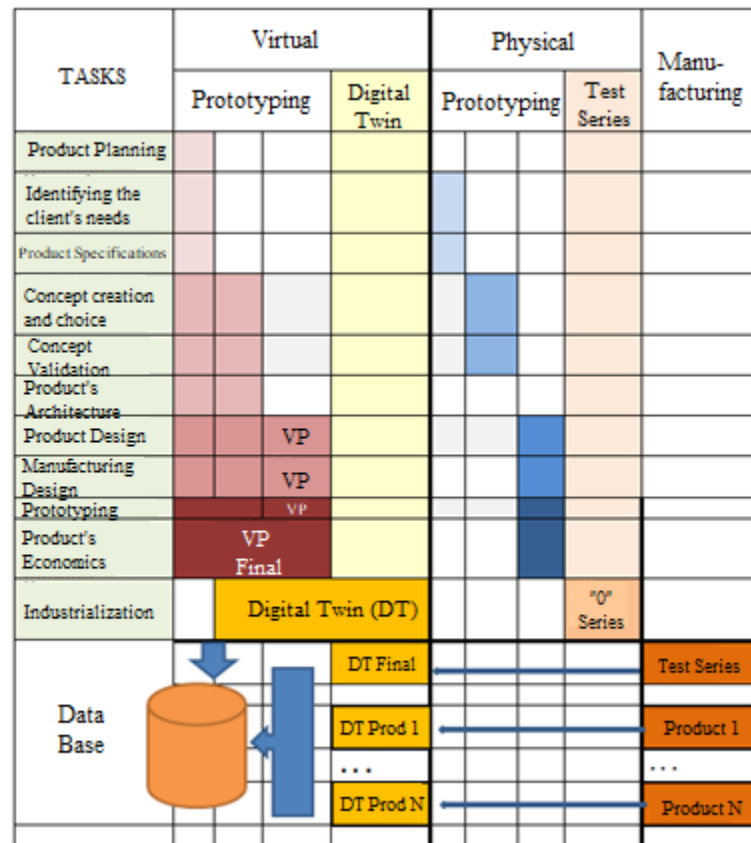


Figure 8-1: Combining the application of the VP as a "white box" and the PP as a "black box".

A new "LL" method for developing a new product with fragmentary FPs and upgrading RP to transform into DB and multiplying it for each particular physical product is worked out.

9. APPROBATION OF THE APPLICABILITY OF VIRTUAL AND PHYSICAL PROTOTYPING IN DEVELOPMENT OF NEW PRODUCTS.

9.3. DEVELOPMENT OF FAMILY IMPACT DRILLING HAND-HELD ELECTRIC INSTRUMENTS WITH AN INNOVATIVE SHOCK SYSTEM WITH CONTROLLED RESONANCE THROUGH VIRTUAL AND PHYSICAL PROTOTYPING

The project for the construction of the "Family of impact drilling hand-held electric instruments with a controlled resonance impact system", with the working name *SparkHAMMER*, aims to create an innovative family of high-performance hammer drills (also called punches) with an innovative impact system based on the principle of controlled resonance.

Creating a virtual model of a pneumatic-vacuum resonance system

The pneumatic-vacuum mechanism provides the drive for the operation of the instruments when operating in an impact mode. The new principle that is trying to find a method for maintaining the work in a near-resonance area. This enables resonance to significantly increase its performance.

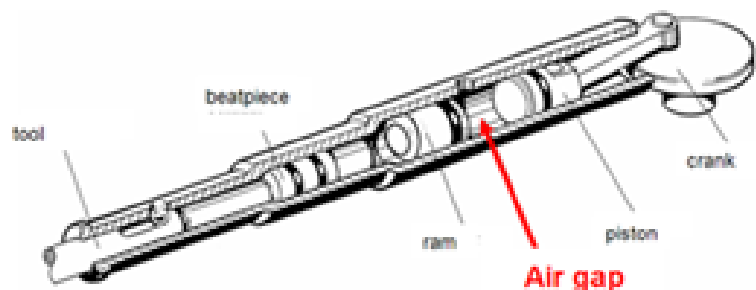


Figure 9-22: Generation of Impact

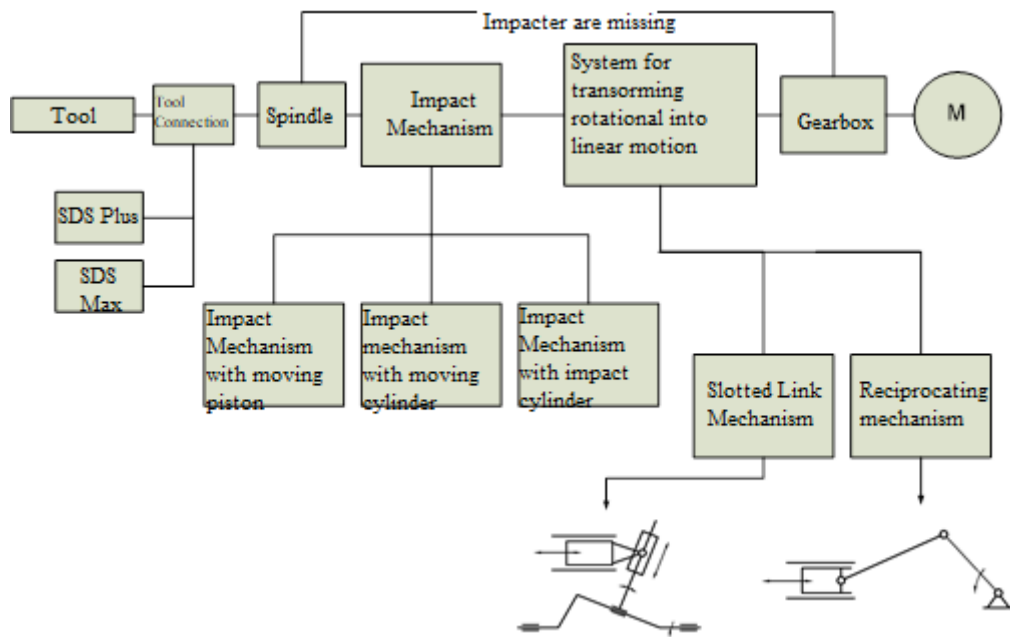


Figure 9-24: Structural construction of impact drilling machines

In order to create a virtual prototype, a three-dimensional output model of the system was created. On its basis, a virtual computational model (Figure 3.1) was built by defining the necessary data, some of which are iteratively tuned, which can be used to study the behavior of the system. The principle scheme of the system is shown in Figure 9-30.

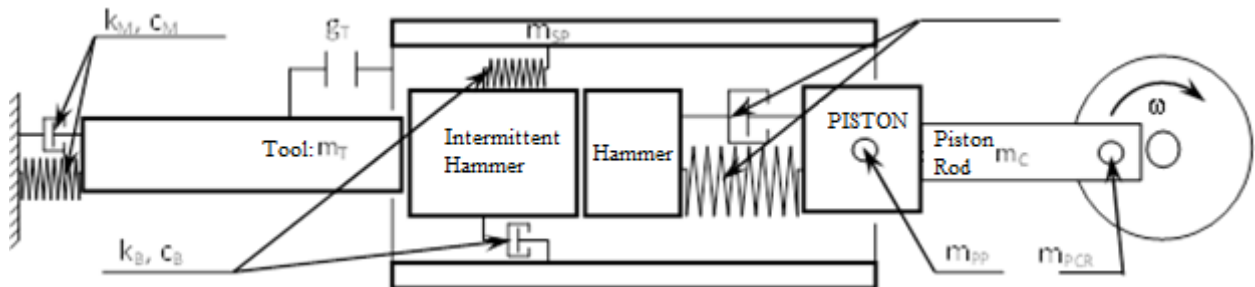


Figure 9-30: Principal scheme of pneumatic vacuum mechanism

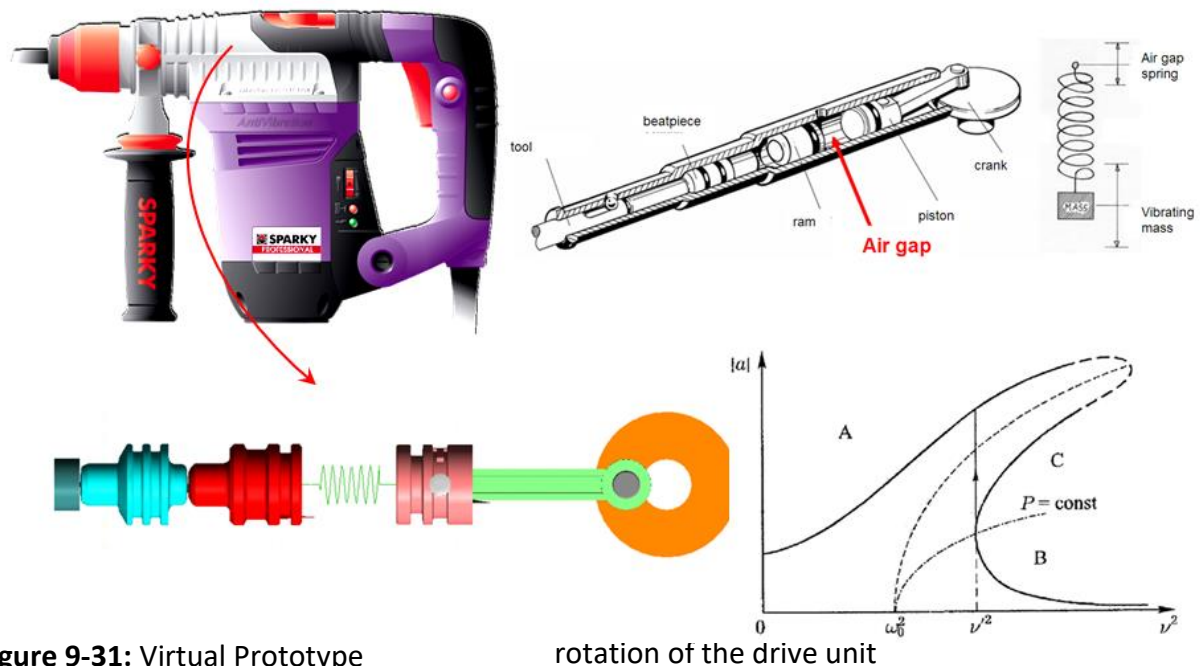


Figure 9-31: Virtual Prototype

rotation of the drive unit

On the basis of the defined schematic diagram of the mechanism, a virtual model is constructed, shown in Figure 9-31. This model is used to simulate the movement of solid objects, without taking into account their own deformations, to determine the energy of impact.

9.3.6. Results of the performed simulations using the virtual model

Also required is the frequency reduction due to the unsustainable mode close to the optimal revolutions for the resonance, due to the danger of crossing into the under resonance area where there is a sharp drop in energy, see Figure 9-34.

The performed tests and the comparative results based on the prototypes of the respective constructions show a good match with the simulations.

Virtual models can be a good basis for subsequent optimizations of both the designs of the designed family of machines and the selection of the appropriate parameters for obtaining optimal results.

9.3.13. Verification of the Virtual Prototype

The examined virtual prototype has also been extensively validated through partial physical prototypes to determine additional values of some of the model parameters (friction, heat load) from the working mode of the prototype. The physical prototype has been tested in real-life conditions and the vibratory acceleration values in the handle have been measured in order to be compared with the values determined by the computational model.

The other power tool of the middle class of the range is represented by the size of BP 540. The stylistic design project and the realized functional physical prototype in an earlier (uncolored) stage are shown on Figure 9-70. High performance is achieved (best worldwide performance) compared to the leading global manufacturers such as Bosch, Hilti, Makita, see. Figure 9-71.

RESULTS:

- Innovative resonance shock mechanical/pneumatic vacuum system has been developed through the VP methodology - a novelty on the global market;
- The optimal range of the family is defined as an area and is based on the different sizes allowing for flexibility, maximum satisfaction of consumer needs and efficient production;
- High performance is achieved (best global performance) as well as improved work comfort (through reduced weight) and improved ergonomics for the operator and overall worker's fatigue reduction;
- Improved work comfort (through reduced weight) and improved ergonomics have been achieved.



Figure 9-69: A stylistic and design project for a BP540CE mid-level impact drilling machine.



Figure 9-70: Functional physical prototype of a mid-level impact drilling machine BP540CE

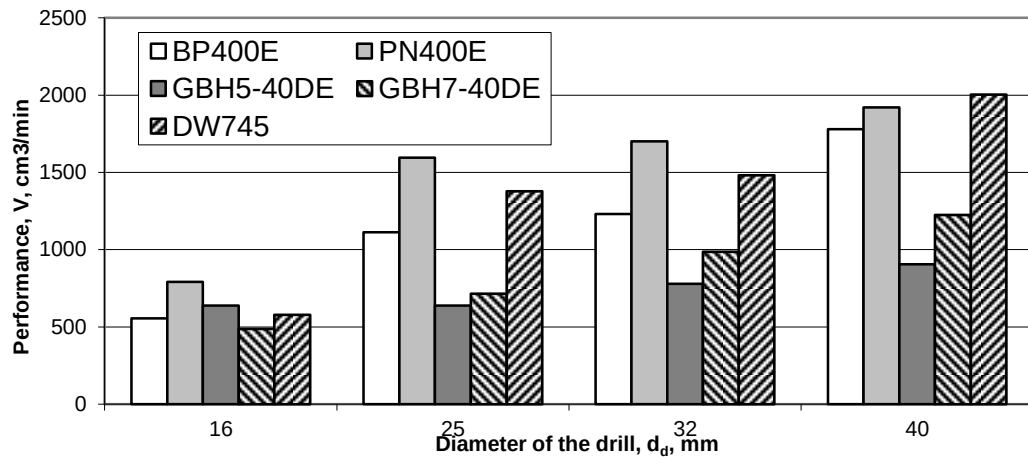


Figure 9-71: Comparison of the BP400E machine with competing examples

9.5. APPROBATION OF A VIRTUAL PROTOTYPE FOR EXAMINING MULTIPHYSICS PROCESSES: IMPROVEMENT OF THE OPERATING PARAMETERS OF A DESKTOP REFRIGERATOR'S EVAPORATOR

Refrigerators for household use have been an important everyday appliance for more than 100 years. The evaporator is an important component and very often it is a determining factor for the efficiency of the whole system. The evaporator is a device for absorbing heat from the refrigeration space in the refrigeration system by evaporating the refrigerant.

The geometry is based on the evaporator module for a desktop refrigerator (Liebherr KT1730 sample). The evaporator coil is glued to a thin aluminum plate. The coil is produced from an aluminum tube deformed to an "elongated" cross-section. Its curve is tailored to the characteristics of the refrigerator (inlet and outlet positions). The coil is connected to a thin aluminum plate with a high-quality contact adhesive for good thermal conductivity.

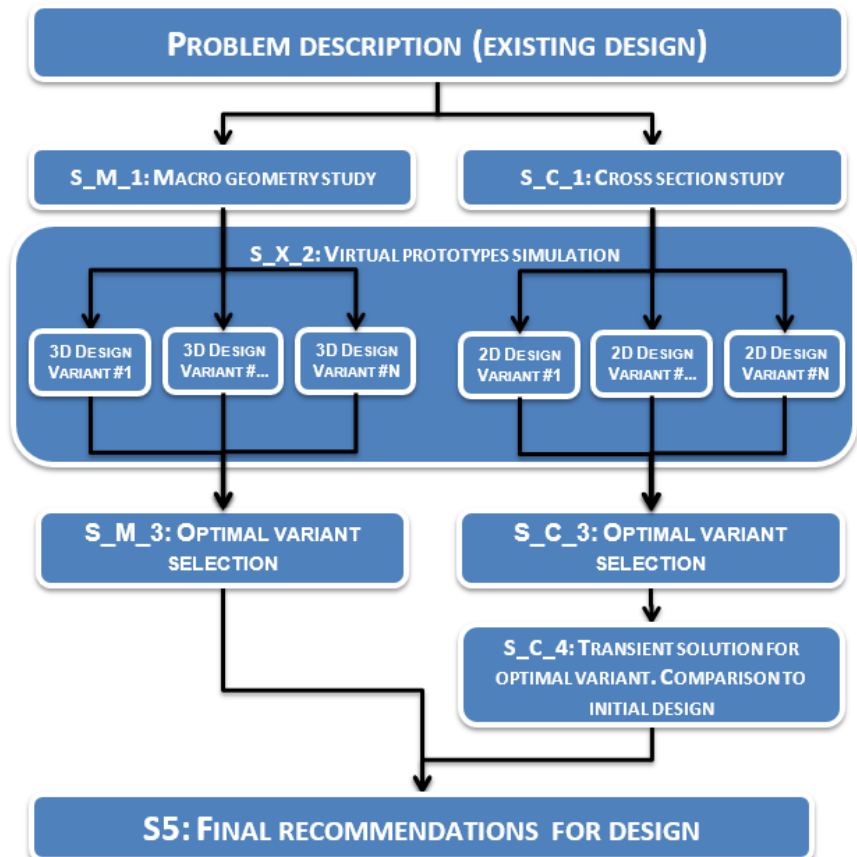


Figure 9-82: Methodology for assessing variants

CONCLUSIONS

A new design for desktop refrigerators has been developed based on virtual prototypes. The main results of the performed analysis are:

- An opportunity is demonstrated to evaluate the design in the early design phase. This allows to reduce the costs of product development and time to market while avoiding constructive design errors;
- Reduction and even removal of physical tests and significant reduction in time and cost are achieved;
- Ability to evaluate the internal parameters of the studied design and clear understanding of the ongoing processes. This is the specific advantage of the virtual prototyping over the physical one.

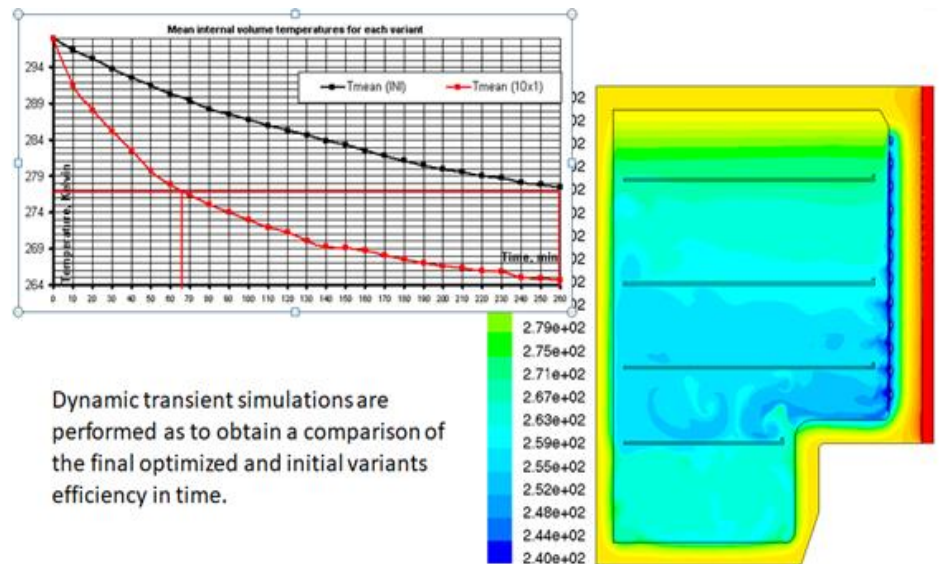


Figure 9-87: Final design of the construction

9.6. APPLICATION OF AN INNOVATIVE METHOD FOR THE TESTING OF MULTIPHYSICS PROCESSES BY VIRTUAL PROTOTYPING - TESTING AND VALIDATION OF THE ACOUSTIC PARAMETERS OF A RAILWAY WHEEL

9.6.1. Examining the acoustics of railway components

The evaluation of the acoustic parameters of the railway components are a mandatory stage in the process of certification of a newly developed product and in particular of railway wheels. The conventional assessment approach includes measurements and experiments on a physical prototype. An alternative based on computer simulations is offered, which allows to evaluate the construction at an early stage of product development and to check different variants. Nevertheless, this approach does not give complete "inside" information about the noise generation mechanism and requires a specialized tool.

9.6.4. Method for acoustic evaluation of railway wheels through virtual prototypes

A new methodology was developed based on the assessment of acoustic behavior of the tested railway wheel compared to a reference railway wheel using virtual prototyping technologies. A basic parameter for this comparison is the sound pressure level (SPL) as defined in (EN 13979-1: 2003 + A1: 2009 2009). The methodology is shown as a whole in Figure 9-88.

The methodology consists of the following stages:

- **S1: Final element analysis results:** Determination of SPL at characteristic points for the range 100Hz ÷ 5000Hz, analyzed by 1/3 octave. Three separate load cases are considered, according to the requirements of the standard and shown in Figure 9-90. They are labeled $L_{P_{cpi}}$ where:
 $c = 1, 2, 3$ - designation of the examined load case (Figure 9-89);
 $p = A, B, C$ - microphone designation according to the diagram in Figure 9-90 (reference number (EN 13979-1: 2003 + A1: 2009 2009));
 i - is the group of 1/3 octave;

- S2: Filtering the results:** Each sound pressure level (calculated for roughness per unit) in i -th 1/3 octave is weighted according to the following relationship:

$$C_i + R_i + H_i$$

where:
 $L_{Pwcp_i} = L_{Pcp_i} + C_i + R_i + H_i$
 L_{Pcp_i} - sound pressure level calculated for 1/3 octave i ;
 C_i is a value of A filter in dB;
 R_i is the reflectivity of the roughness expressed in sound pressure, dB (1m);
 H_i is the contact filter in dB.

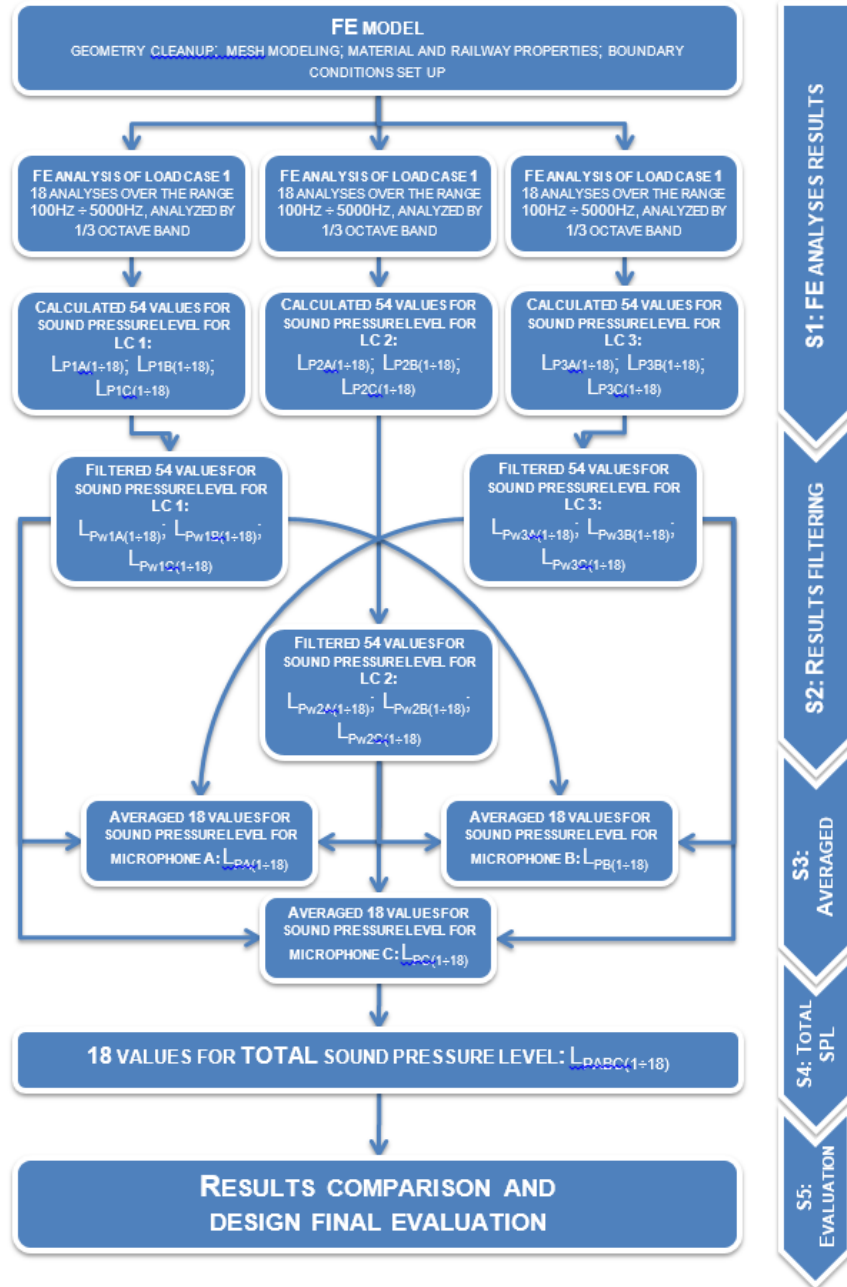


Figure 9-88: Block diagram of the used methodology.

Contact filtration is calculated according to the REMINGTON formula:

$$H_i = 20 * \log \left[\frac{1}{1 + \frac{\pi}{4} * \left(\frac{2 * \pi * a * f_i}{V} \right)^3} \right]^{\frac{1}{2}}$$

where:

a - the half of the contact area in the direction of rolling (in m) as defined for the test wheel; V – rolling speed of the railway wheel (m/s); f_i is the octave frequency of the 1/3 octave.

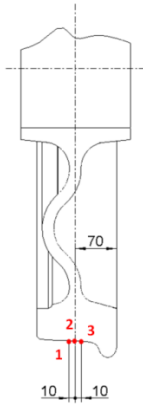


Figure 9-89: Location of investigated cases of contact between the rail and the wheel.

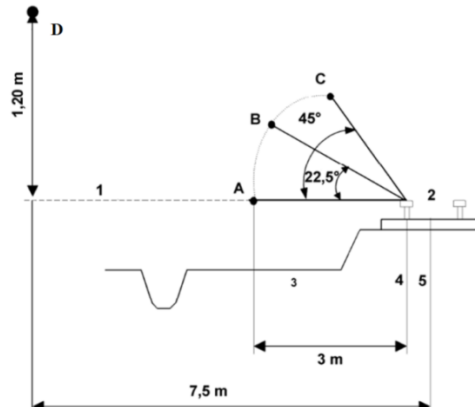


Figure 9-90: Typical point locations for the acoustic parameters of interest (microphones in Physical Prototype experiment).

- **S3: Average SPL for each microphone:** Calculation of mean SPL value for the three positions of the contact points of the wheel:

$$L_{Ppi} = 10 * \log \left(\frac{1}{3} * \left(10^{\frac{L_{Pw1pi}}{10}} + 10^{\frac{L_{Pw2pi}}{10}} + 10^{\frac{L_{Pw3pi}}{10}} \right) \right)$$

Where:

L_{Pw1pi} , L_{Pw2pi} , L_{Pw3pi} are the weighted average pressure levels (over microphones $p = A, B, C$) calculated for the contact positions 60 (load 1), 70 (load 2) and 80 (load 3) mm from the inner surface of the flange.

- **S4: Total SPL:** The resulting LPABC sound pressure level corresponds to the weighted average of these three sound pressure levels given by the following formula:

$$L_{PABCi} = 10 * \log \left(0,4 * 10^{\frac{L_{PAi}}{10}} + 0,2 * 10^{\frac{L_{PBi}}{10}} + 0,4 * 10^{\frac{L_{PCi}}{10}} \right)$$

- **S5: Results Comparison and Final Project Assessment:** The defined SPL over the frequency range is compared to the reference values.

9.6.5. Practical application

The main part of the analysis is formed by FEA simulations (step 1 of the proposed methodology). Multiple analyses are required (3 load cases, each with 18 octaves or a total of 54 analyses) and the results are summarized. This first step is described in detail below.

- **S2: Virtual Prototype**

A finite element model based on the geometry presented above is constructed. The simulation model contains about 731,000 nodes and 842,000 elements and is shown in Figure 9-93 below.

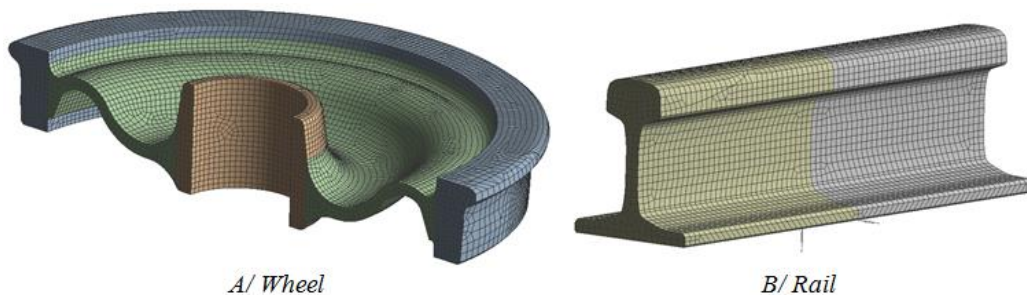


Figure 9-93: A finite elements model used to conduct engineering analyses.

The wheel/rail system can be represented by two dynamic systems connected at a point and under the influence of the relative displacement between them. This is a typical model for vertical load. In this model, the wheel movement along the rail is ignored and replaced by a "moving load", whereby a roughness strip acts upon both the wheel and the rail. Besides the vertical direction, it is also very important to include the side load.

The simulation results of the 54 analyses are represented by SPL distributions for an example frequency in load cases (100Hz). These distributions are represented in the plane of symmetry, which is sufficiently representative for the current development stage.

- **S2&S3: Filtered results. Mean SPL**

The next stage is related to the presentation of the further processed results. The values listed above are filtered through the contact filter (REMINGTON), the roughness level and the A-average filter. These values are then averaged (using the values for each load case as described in the Stage 3 methodology) for each microphone.

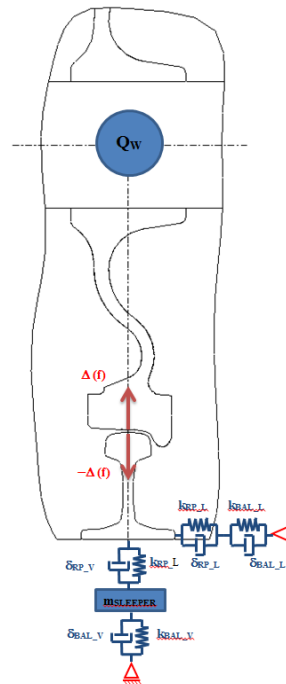
- **S4: Total determination of SPL**

Total octave SPL values are calculated as described above.

- **S5: Comparison of results and construction evaluation**

The analyzes carried out and the review of the results lead to the following important conclusions:

- The wheel in question shows good correspondence with the reference data reported in (ACOUTRAIN 2012);
- The maximum total sound pressure level (SPL) is 86.5dB at 315Hz;
- The construction complies with the criteria described in EN 13979-1-2003 + A1-2009;
- The analyzed construction is compared to the available results in (ACOUTRAIN 2012). The results for the sound pressure level for point D are used (see Figure 9-99 B). The referent and new D-point SPL designs are shown in Figure 9-99.
- The study demonstrates the possibility for assessing the influence of the roughness of the contact surfaces on the acoustic behavior of a monoblock railway wheel using virtual prototyping. A new methodology for digital acoustic certification has been developed. The methodology is approbated by a real industrial project where the results of the virtual prototyping are compared with the experimental results and on this basis the requirements of the European standard EN 13979-1 "Wheels and bogies - monoblock wheels" for the certification of the newly designed railway system are sought for the railway wheel.



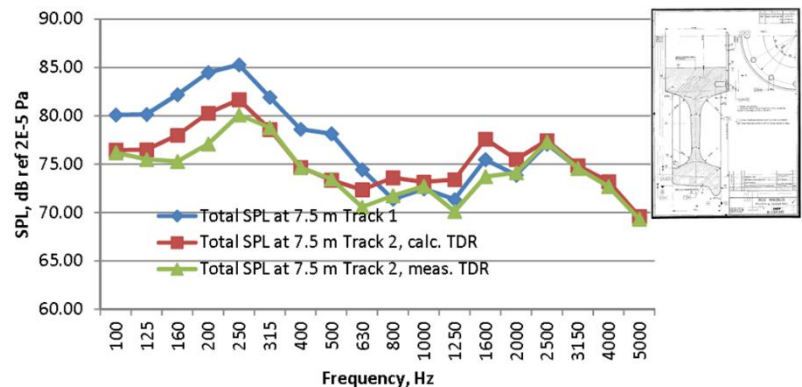
A / Boundary Conditions

Table 7-4: TSI+ roughness

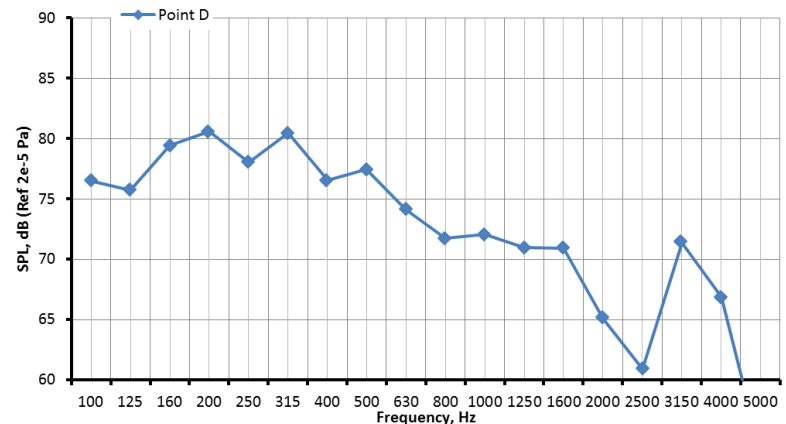
Wavelength (cm)	Roughness dB(ref 1 μm)
63.4	21.1
50.4	19.1
40.0	17.1
31.8	15.0
25.2	13.0
20.0	11.0
15.9	9.0
12.6	7.0
10.0	4.9
8.0	2.9
6.3	0.9
5.0	-1.1
4.0	-3.2
3.2	-5.0
2.5	-5.6
2.0	-6.2
1.6	-6.8
1.3	-7.4
1.0	-8.0
0.8	-8.6
0.6	-9.2
0.5	-9.8
0.4	-10.4
0.3	-11.0

B / TSI + „bandwidth“ of the roughness

Figure 9-94: Applied boundary conditions: boundaries common to all cases and loads.



A / Referent Values



B / Values from the examined design

Figure 9-99: SPL for point D, dB.

CONCLUSIONS

- An approach for using a virtual prototype to assess the impact of design parameters on acoustic performance has been proposed, and the effectiveness of this assessment and review of ongoing physical processes using a virtual prototype in the early design stage has been demonstrated.
- Practically proven through a TUV certification research approach based on virtual prototyping technology and the requirements of industry standards for certification of the acoustic behavior of railway wheels through a reference physical test sample.
- The methodology is approbated by a real industrial project where the results of the virtual prototyping are compared with the experimental results and on this basis it is sought to comply with the requirements of the European standard EN 13979-1.
- The presented research is an essential step in the development of a new common methodology based on virtual prototyping technologies and the requirements of industrial standards for certifying the acoustic behavior of the railway wheels.

9.7. DEVELOPMENT OF COMPLEX PRODUCT - FAMILY OF FORKLIFTS THROUGH THE TECHNOLOGIES OF VIRTUAL PROTOTYPING

The purpose of the example is to demonstrate the application of the various components of virtual engineering, particularly the virtual and physical prototypes in the individual stages illustrated by an example of the industrial practice of the authors - the development of a complex product - a range of forklifts – electric and ICE forklifts.

This applicability is illustrated in Figure 9-101. The overall design of the product was accomplished using virtual prototypes by conceiving and structuring the product family. Based on a concept created by a virtual prototype, a modular architecture has been developed to build various configurations of the range of forklifts. The presence of the virtual prototype allows not only the visualization of different product variants (different combinations of lifting capacity, drive type, different types of masts) but also their validation in the early stages of design.

10 groups of forklift masts (lifting capacity and versions with pneumatic or bandage tires) and 5 groups of masts for the forklifts - a grand total of 15 mast groups were developed. Each group consists of three sub-groups - a three-tiered mast, two-tier with a driven carriage and a two-tiered carriage-free, where the variants become 45. Each subset of the above is executed in 6 variants depending on the presence of additional attachments or the presence of lateral carriage and forks, which increases the final number of mast versions of 270.

Having a built-in engineering network allows you to work in a team that includes groups located in remote geographic areas. For example, conceptual and constructive development has been carried out by a team within the European Union (Bulgaria and the United Kingdom) while production is organized in a Far East country.

The purpose of the development is to build and validate a concept based on a modular principle, using a grouping of its components into modules that can be treated as logical units. This concept allows for further shaping of the family order in which the different members have the same modules.

An important division which determines the amount of variance is the machine's capacity. This division determines the total number of machines projected to a total of 43. This variation is also increased with the inclusion of various component options on the machine itself, as shown below, with machine variants are exceeding 1000. This large number of variants (product portfolio) is not a goal in itself but a real necessity dictated by the market.

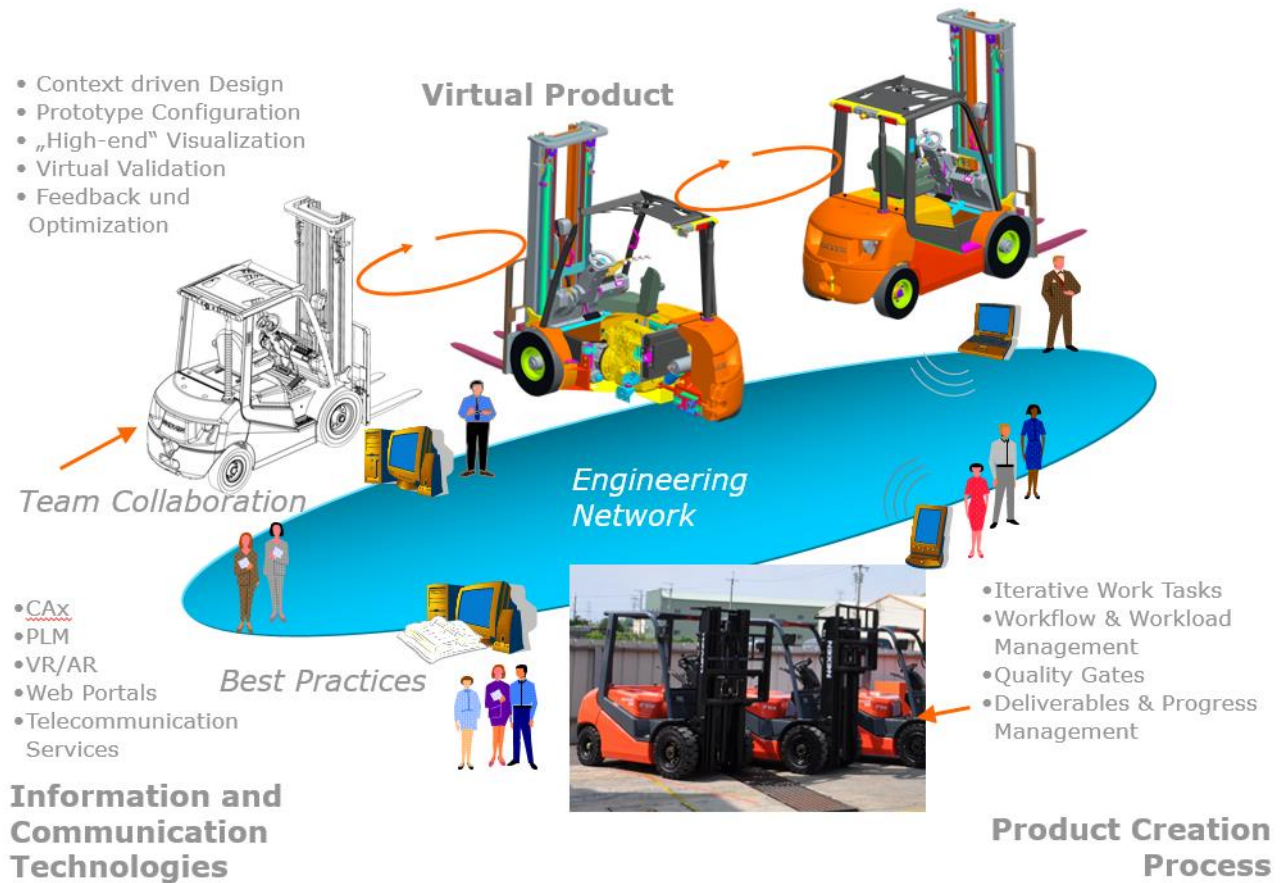


Figure 9-101: Product Lifecycle of a family of forklift trucks using virtual engineering approaches.

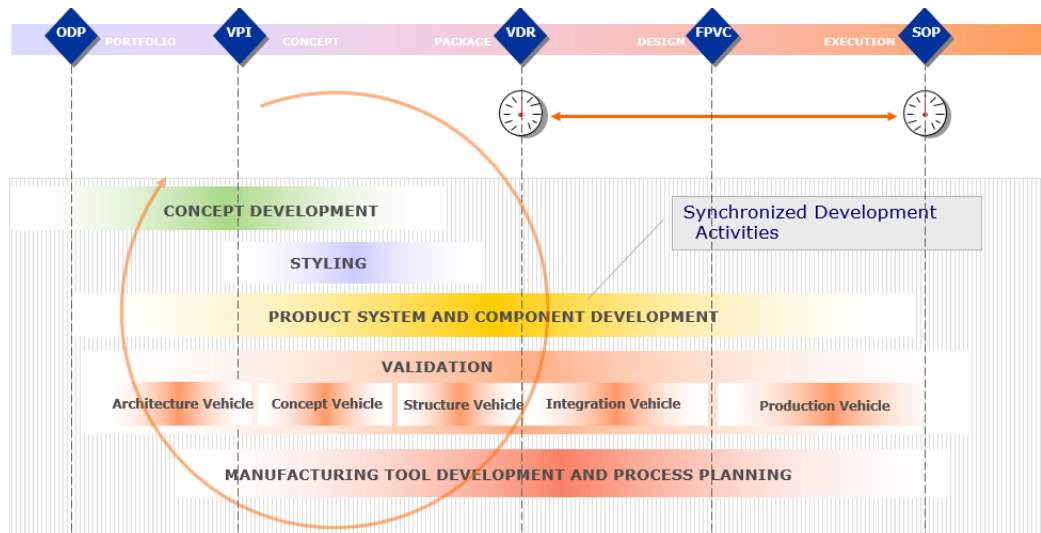
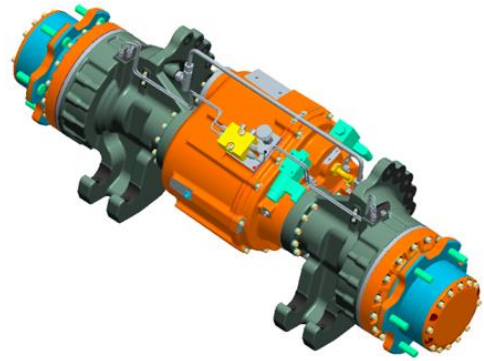
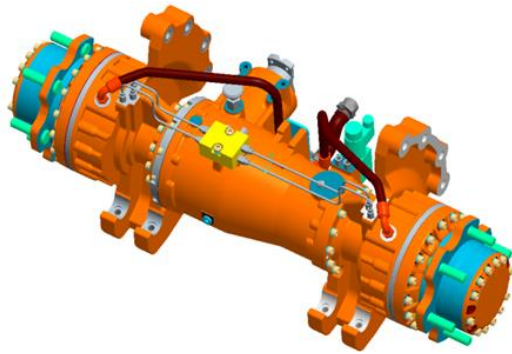


Figure 9-102: Application in the development of family of forklift trucks

9.7.1. Variant design of the product's architecture

Information management of such a number of variants would be very difficult if virtual engineering technologies are not used. On the one hand, the need for high cost-effectiveness of the products requires a high degree of unification and modular design between the different options, on the other hand, service and logistics related to a large number of variants would require a considerable resource if this is not the case. In any situation, the validation of the development without the use of a virtual prototype will be associated with a large expense of time and money without direct returns.

9.7.3. Structuring. Example “Front Axle”



A/ Single speed variant, 55kW

B/ Two speed variant, 75kW

Figure 9-104: Structure of a subassembly “Front Axle”

Structuring a product is inherently a transient process between the developed concept and the creation of the particular assembly. Virtual prototypes of this transmission component are shown in Figure 9-104.

The division into two groups is structured in several separate versions according to the capacity and type of the machine in which the component is incorporated.

CONCLUSIONS

- The proposed modular approach to building a family of forklift trucks is approbated by demonstrating the composition and maintenance of a significant variation covering over 200 individual machine variants to better meet customer needs and to achieve practically personalization through compositions of available modules.
- For each composition a 3D individual VP is generated – a base for digital twin.
- An innovative architecture for the world market has been developed - for all sizes in the family of 1.6 to 5.5 tons the same modular cab is used (unlike machines with different sizes, the driver is similar).
- Maintaining a large number of variants (hundreds of variants and implementations) is possible with the use of PLM systems, etc., which are basic elements of the INDUSTRY 4.0 concept given that the large number of client compositions requires the application of a “digital twin”
- Another aspect of the demonstrated development is the relatively short term of its creation (under 3 years) with few directly involved with these specialists (5-7 experts). For comparison, the leading company TOYOTA FORKLIFTS has used a team of more than 50 specialists for a similar project over 3 years (according to an interview conducted by the author at CeMAT 2010, Hannover, DE).

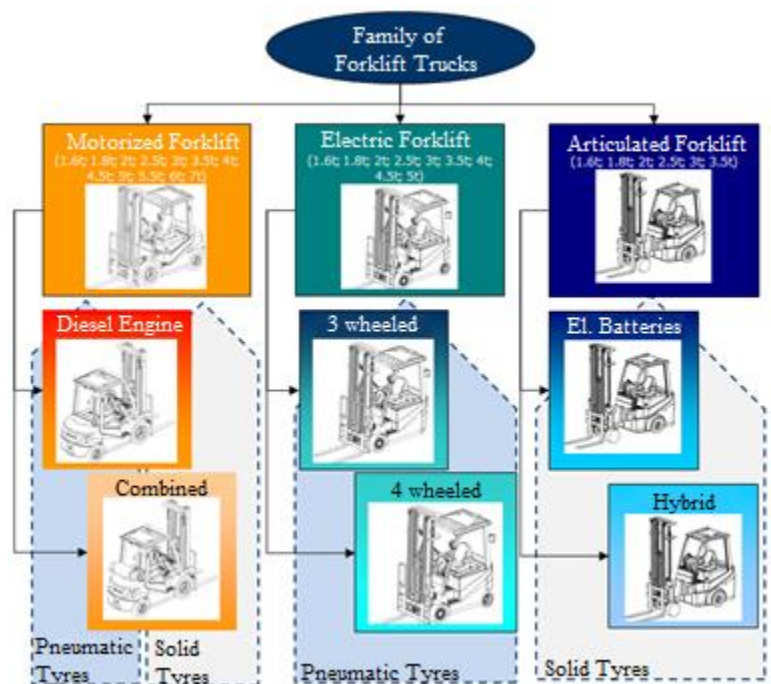


Figure 9-103: Structure of a family of forklift trucks



- Last but not least, the physical distance between the engineering development team (Bulgaria, Lab CAD / CAM / CAE in the industry, TU-Sofia), marketing and management team (UK) and production team (Taiwan) has to be mentioned. This is only possible with the use of modern technologies from the virtual prototyping methodology. This technology and the approaches to modular building lead to a greatly reduced time to market and individualization of the product on the one hand, and on the other - lowers the total cost of developing it.



Figure 9-109: Physical prototypes of the product and serial production

10. ANALYSIS OF THE APPLICABILITY OF VIRTUAL TECHNOLOGIES AND PHYSICAL MATERIALIZATION OF IMPLANTS IN THE FIELD OF MEDICINE

10.1. STUDY OF METHODS FOR CREATING OF PERSONALIZED IMPLANTS BY USING THE MEANS OF VIRTUAL AND PHYSICAL PROTOTYPING

10.1.1. Taking of imprint / Direct Scanning

These processes are known under the generic name Reverse engineering RE - Figure 10-2. This technology has many applications, including documenting or restoring artifacts, verifying the shape and geometry of RP parts, creating medical applications, and more.

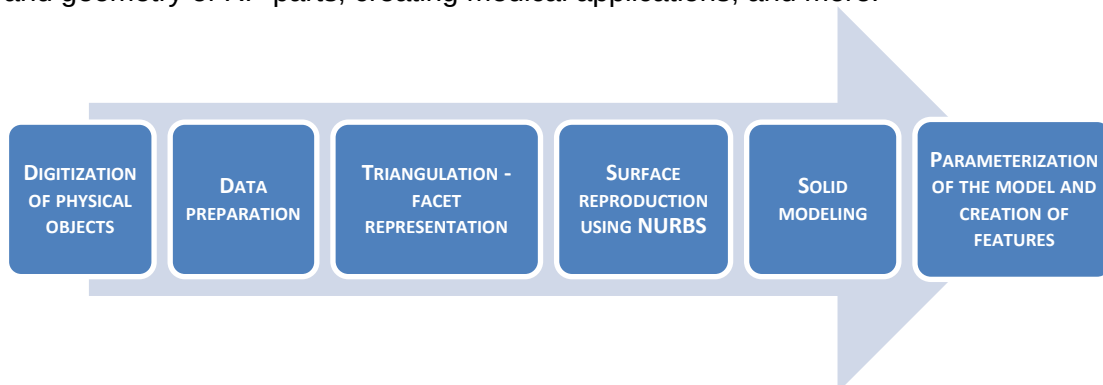


Figure 10-2: Reverse engineering process

During the process of RE, a Point Cloud is collected using contact or non-contact scanning of the surface of the physical model, which after filtration and processing is reduced to a network of triangles. Unfortunately, they are not directly usable in the CAD environment. It is necessary to perform a process in which this set of points merged into a network becomes NURBS surfaces and features which are usable in CAD systems. This process is called reconstruction and follows the sequence shown in Figure 10-2, which resembles to that used to return the geometry from FEM optimization back to the CAD environment, see above.

10.1.3. Modeling of the implants

In the thus obtained by the import solid model of the scanned element, a solid 3D model of the respective tooth (for crown), bridge, etc. is constructed as a reverse impression. Conversion from surface to solid model can also be done directly in CAD software.

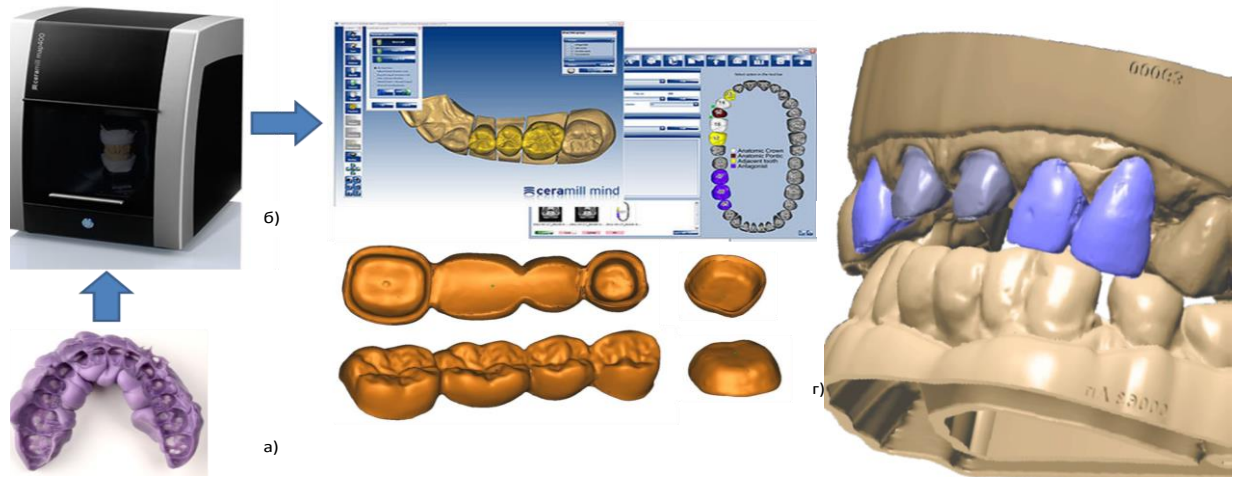


Figure 10-9: Processed objects

In this step the final result is achieved (bridge, jaw, crown, facet, etc.).

10.2. TECHNOLOGY METHODS FOR MANUFACTURING OF IMPLANTS

The fully finished detail has to be produced. The following 4 production methods are known:

- Through direct metal manufacturing.
- Through removing material.
- Through building a molding tool using AM technologies and with subsequent casting.
- Through Investment Casting using AM technologies for the model.

10.2.1. Computer Aided Manufacturing

The virtual 3D shape of the implant (crown, bridge, jaw, facet, ...), has to be produced in a physical form and to be placed in the patient's body.



Figure 10-11: Manufacturing of an implant.



Figure 10-12: Multifunctional machining center for producing implants of hard and ultra-hard materials.

CAM software, starting from the geometry of the 3D model, creates an output blank (workpiece) - automatically or manually, and then sets:

- Tools, parameters, feeds and speeds;

- The type of processing (Figure 10-11), depending on the technological capabilities of the software and the CNC machining center (Figure 10-12) – 3- or 5-axis one;
- Appropriate manufacturing strategies are selected depending on the options available in the software and according to the geometric elements of the workpiece;
- The instrument path is created with the corresponding feeds and speeds;
- Precise virtual analysis of the cutting process to avoid losses due to problems with the CAM programs, collision detection and post-processing are carried out. The post-processing transforms the outgoing code from the software to CNC G-code for 3- or 5-axis machining center.

Thus, new technologies, strongly influenced by the world of machine building, are increasingly entering dental production, leading to higher quality, time saved, and satisfied patients.

10.2.2. Casting

INVESTMENT CASTING

Process outputs are based on models made using special plastics using Rapid Prototyping, for example jet fusion. The processes are used to make highly accurate models of wax-like polymer. The casting process on fused models is developed in a conventional approach: The model is put into the casting form as core. After burning, the set pattern melts and releases a cavity of the same shape. The melt is then poured into the mold wherein the material fills the cavity and the required implant form is obtained.

BUILDING A MOLDING TOOL USING AM TECHNOLOGIES AND SUBSEQUENT CASTING

With this method, a negative for the desired implant is created, so that it can subsequently be molded in this negative shape, the shrinkage of materials should be considered. The negative image of the desired implant is divided into two main parts so that it can be opened after molding. For forming of the implant a special tool called a mold is used. The mold consists of two major half-shapes. The obtained castings can have very thin walls - from 0.3 to 0.5 mm. The allowances for machining are minimal - 0.2-0.7 mm, and often the castings have a very smooth surface, which does not require machining.

DIRECT METAL MANUFACTURING OF THE IMPLANT (SLM – SELECTIVE LASER MELTING)

This is one of the latest technologies and is the first rapid prototyping method in which metal powder between 10 and 45 μm is used as raw material and the final result is solid detail. An important advantage is the lack of organic components. This is a test example for producing a number of dental crowns through additive manufacturing. The machine is SLM 125HL model shown in Figure 10-17. The equipment is housed in the laboratory "CAD / CAM / CAE in Industry" at the Faculty of Industrial Technology of Technical University of Sofia.

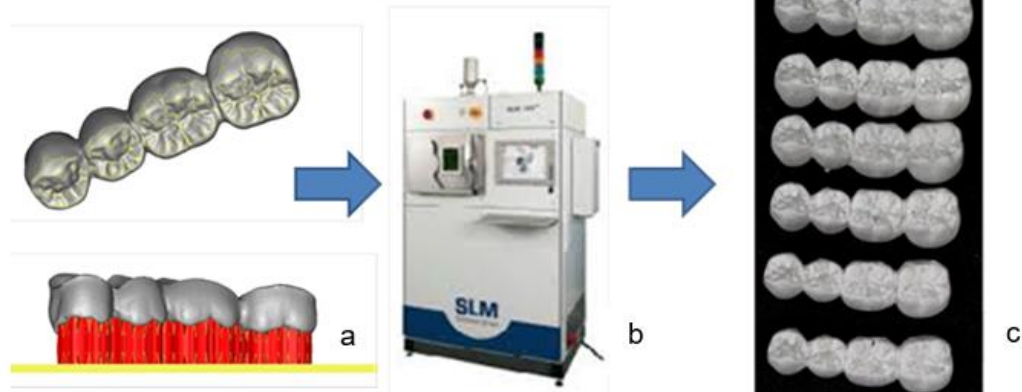


Figure 10-17: General view of the machine

SLM definitely exceeds the familiar work methods, because:

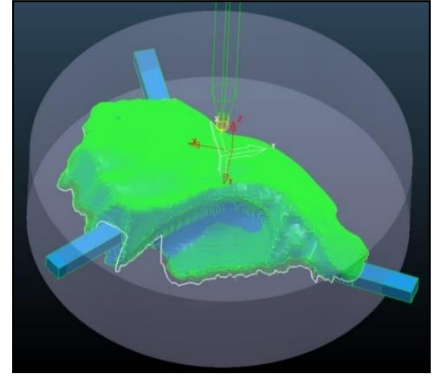


Figure 10-13: Virtual appearance of the implant after "virtual" manufacturing (process simulation).

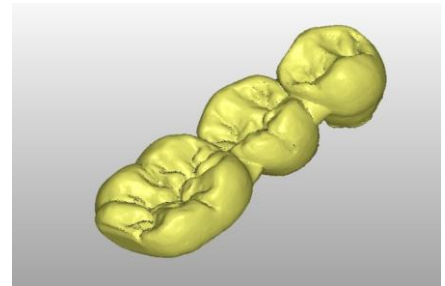


Figure 10-14: CAD model of an implant

- No tools are used;
- Achieved production quality is good;
- Many different metals and alloys, such as alloy steels, cobalt-chromium alloys, Inconel 625 and 718 and titanium alloys Ti6AlV4, can be used as raw material;
- The final metal product is also the final product ready for direct use;
- A complex assembled unit can be built with impressive accuracy.

The technology, due to the listed properties, is a progressive choice for building metal implants.

CONCLUSIONS

- The capabilities of the most common bone and dental implantation technologies have been analyzed. All of them have advantages and disadvantages, depending on the geometry and structure of the implant. For example, personalized spinal implants are preferably structured in fractal grids, which could be produced only using the SLM technique.
- The main drawbacks of 3D printing technology are related to the difficult and time-consuming engineering and manufacturing process, the variety of bio-printing materials is limited, the cost of implants and some limitations of the currently available 3D printers. We are currently seeing a continuous improvement in all the above-mentioned aspects.
- The use of SLM production technology is relatively expensive and has limited material strength. It is recommended to use the technology to produce implants with optimal geometry so as to reduce the percentage of powder used. The technology has its advantages in personalized implantation when geometry is very complex and cannot be produced by other methods or when lattice fractal structures are required.
- AM molds being a good solution, considering the cost and time of production of the casting mold. They require manual post processing.
- HSM has superiority over SLM technology and AM shapes in terms of material accuracy and strength due to the lack of thermal processes. This method also provides shortest overall time for implant production in relatively simple forms and when high strength of the product is required. The low efficiency of the material (less than 30%) can be noted as a flaw in the process.

10.4. RECONSTRUCTION FROM TOMOGRAPHIC IMAGES AND MANUFACTURING OF SUBPERIOSTEAL IMPLANTS USING ADDITIVE TECHNOLOGY

10.4.1. Introduction

In our time, the restoration of partially or completely lost teeth is done massively by placing dental implants and subsequent semi-rigid or fixed prosthesis.

Structure of Subperiosteal implants

Subperiosteal implants are one of the first implants in the new history of implantology. (Figure 10-28).



Figure 10-28: Three-area subperiosteal implant of Linkow. (Linkow & Chercheve, 1970)

10.4.3. Technological stages in the creation of Subperiosteal implants

CREATION OF TOMOGRAPHIC IMAGES

Based on the experiments conducted at Faculty of Industrial Technology in Technical University of Sofia, with the help of a tomograph, a precise 3D computer model of the jaw was created and it was produced as a physical prototype of polymer (ABS) using a prototyping machine available in the faculty, as shown in Figure 10-17.

The technology also allows at virtual level, based on the geometry of the jaw that comes from the tomography scanner, to accurately model a virtual Subperiosteal implant in CAD software, the model of which is visualized in Figure 10-48.

10.4.6. Research for optimizing the load on the chewing process on the bone using VP

For a more even distribution of the load in the chewing process (about 600 N), it is advisable to set a gap between the head-bearing rib and the bone. The strength and susceptibility of the implant has been investigated by a VP that allows optimization of the implant structure and geometry as well as the contact distribution of the bone surface load. Below is a virtual prototype of the implant in order to find an optimal shape of the implant to load the bone evenly.

The obtained results show that the load is more favorably distributed over a larger area in the presence of such minimal clearance. It should be borne in mind that when pressure increases with the gap between the SI and the bone, dissolution of the implant bracket is obtained, which is undesirable.

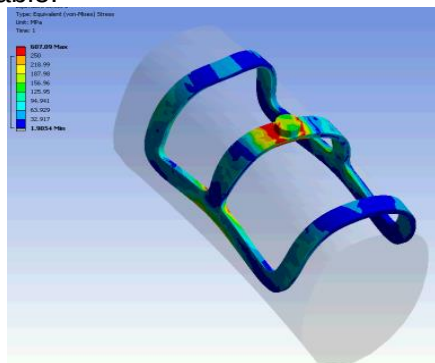


Figure 10-40: Stress distribution field of SI, MPa

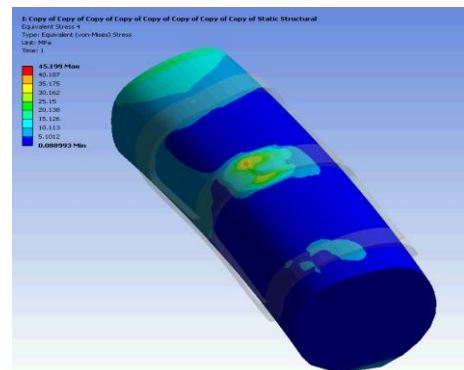


Figure 10-41: Stress distribution field of the bone, MPa

It is clear that the load is exerted to the head and that the pressure is transmitted directly to the bone. The rest of the SI is barely stressed.

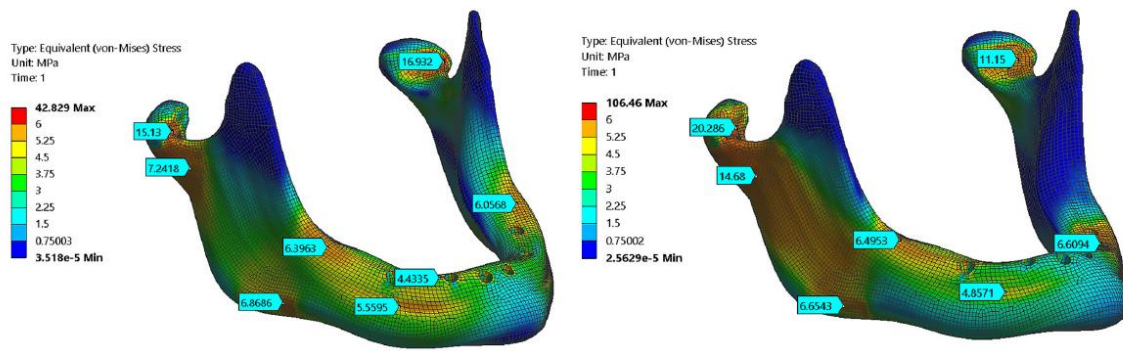


Figure 10-45: Stress distribution field of the bone, MPa

A manufactured Subperiosteal implant can be seen in the picture below, Figure 10-46.



Figure 10-46: Picture of a physically manufactured subperiosteal implant located on a prototype of the mandibular jaw also created by additive FDM technology - ABS material.

Figure 10-46 also shows the final result of a demonstration of the entire structure, together with the teeth attached to the implant, and as a whole with the prototyped mandibular bone. Thus, with the help of the prototyped mandibular jaw, the surgeon can be assured that the elements, including the fastening screws and their placement in the bone, are positioned so that the surgery can be very accurately planned before the actual surgical intervention is started.

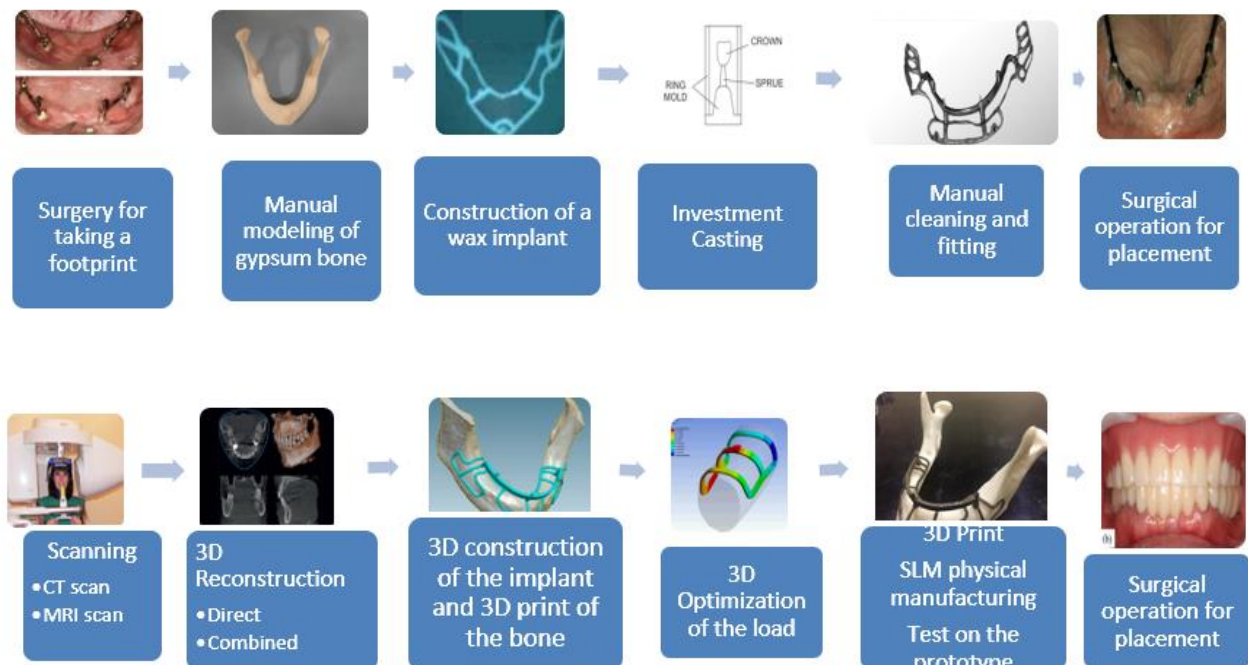


Figure 10-48: Implant prepared using the classic method (above) and with digital technology (below) – The number of surgeon interventions is decreased through the new approach

CONCLUSIONS

- A new method for manufacturing of implants based on computer tomography, 3D reconstruction, is proposed and validated. For the creation of 3D model of the studied jaw area, the Subperiosteal implant is modeled virtually, and a personal Subperiosteal implant is produced using additive manufacturing.
- The Subperiosteal implant is structurally optimized with the aid of a VP for optimal distribution of the chewing load on the jaw and to provide optimal implant stiffness.
- Using a 3D print prototype mandibular jaw allows the surgeon to perform a very precise planning of the surgery before starting the actual surgical intervention.
- The proposed innovative method creates patient comfort and saves health care resources because only one surgical intervention associated with implant placement (rather than two with the conventional technology) is performed with this method, which saves considerable time for the patient.

10.5. STUDY OF METHODS FOR 3D RECONSTRUCTION AND MODELING ON THE BASIS OF TOMOGRAPHIC DATA FOR THE DEVELOPMENT OF PERSONALIZED CRANIUM IMPLANTS BY USING VIRTUAL AND PHYSICAL PROTOTYPES

Reconstruction of the facial-cranial part is an extraordinary challenge even for the most experienced surgeons. Some of the most important factors contributing to the complexity are the anatomy and the presence of vital structures near the affected part, the uniqueness of each defect and the chances of infection. The proposed innovative workflow process for CAD / CAM manufactured implants is shown in Figure 10-49 and is briefly described below.

The specific task is that besides the virtual preparation - reconstruction of the cranial area of CT scan images, two-step prototyping is applied.

The following sections highlight the advantages of 3D modeling and manufacturing of cranioplasty implants.

For the design of personalized facial-cranial implants, it is necessary to integrate the adjacent anatomical structures.

The software saves a lot of time because it eliminates the first step of reverse engineering, i.e. converting patient data into a 3D model in CAD format (Figure 10-50).

The first step in the preparation of the 3D model involves creating the contour of the cranial plane around the traumatized region.

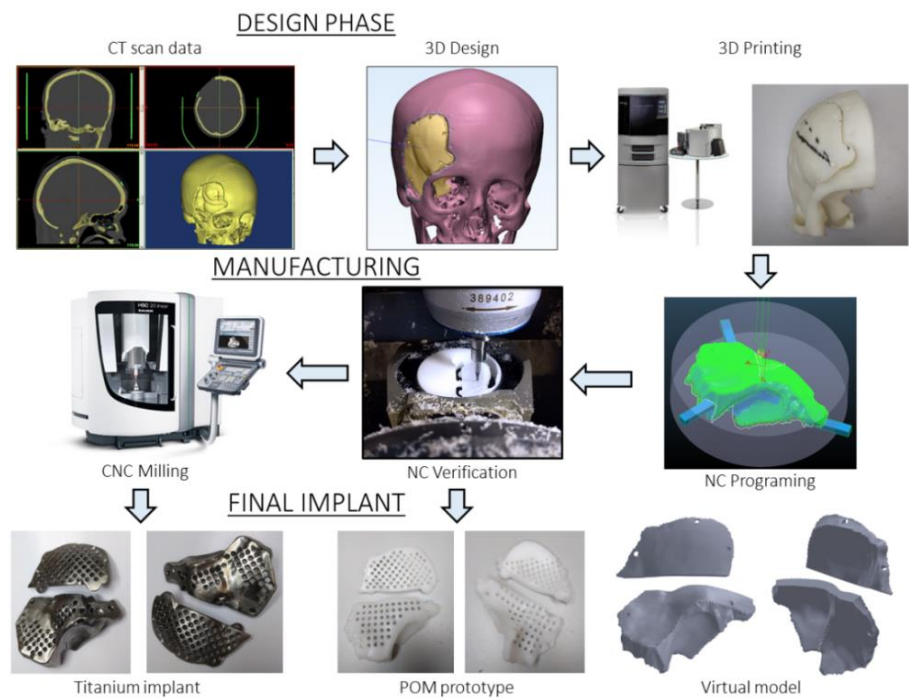


Figure 10-49: Innovative method for designing and manufacturing CAD / CAM manufactured implants.

The next step in creating the implant is to use a healthy skull geometry by building a mirror image. After the actual mirror model is manually aligned, the implant is created with the help of the already created curvature around the trauma. This ensures a similar geometry between the healthy and damaged part of the skull and good transition around the implant (Figure 10-51). With the creation of a prototype using 3D printing the implant can be physically examined and discussed with the doctors responsible for the surgery. The shape and dimensions, as well as the fit of the implant, are considered.

The implant shown in Figure 10-52 is manufactured using Stratasys FDM Dimension Elite, available in lab. "CAD / CAM / CAE in the Industry". The DMG Ultrasonic 20 5-axis machining center is used for the physical manufacturing by removing material. This machine is also available in lab. "CAD / CAM / CAE in the Industry" in the Technical University of Sofia.

Special tools are selected for upcoming implant manufacturing. After selecting the workpiece, the material and the tools needed to process it, the next step in creating the CNC program can be started.

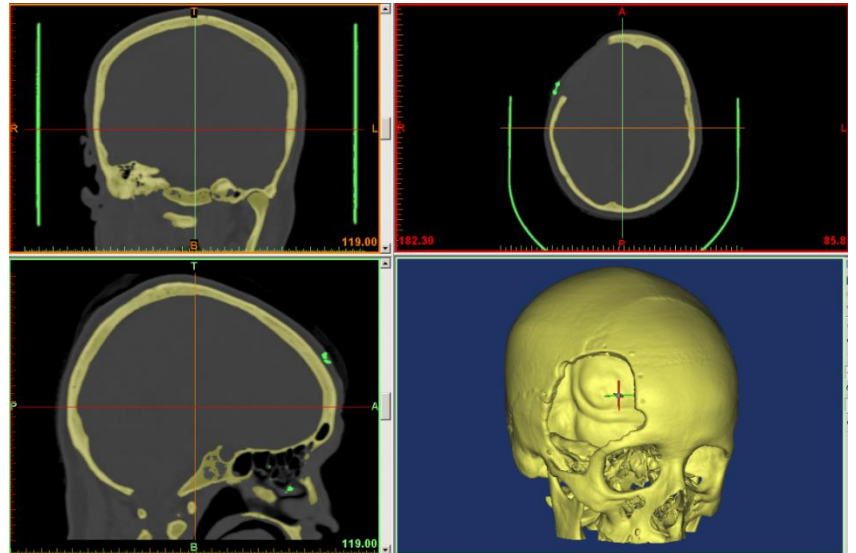


Figure 10-50: Importing tomographic data into the Mimics software

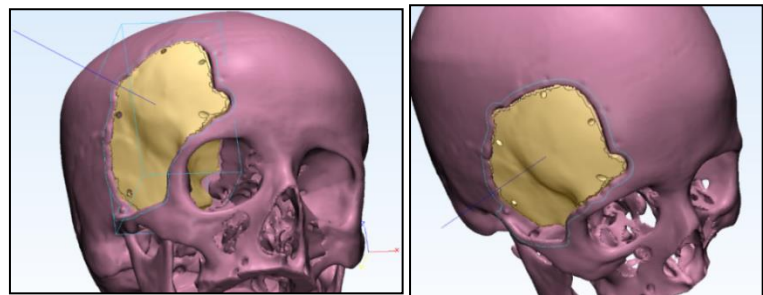


Figure 10-51: Final 3D view of the implant



Figure 10-52: 3D printed implant with a part of the skull



Figure 10-57: The two parts of the implant in its final form

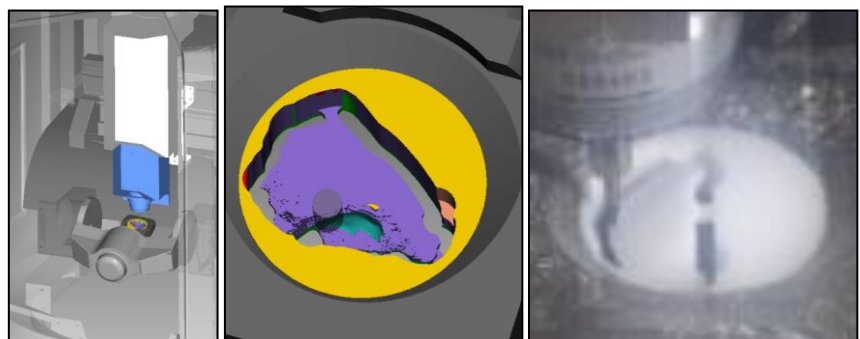


Figure 10-55: Digital twin of DMG Ultrasonic 20 Machining center Work environment and simulation of the machining process

One of the features of the software is that it allows the implementation of the work environment for the particular machine and in particular its digital twin (DT). In this case, this is the DMG Ultrasonic 20 machining center, its work environment and the simulation process shown in Figure 10-55.

The results of the surgery are shown in Figure 10-58. They demonstrate how advances in medicine and engineering have enabled the creation of spare parts for the human body with increased accuracy despite complex geometric shapes. The images show the coincidence of contours of the implant and skull surfaces. The patient shows rapid recovery after surgery and good adoption of the implant.

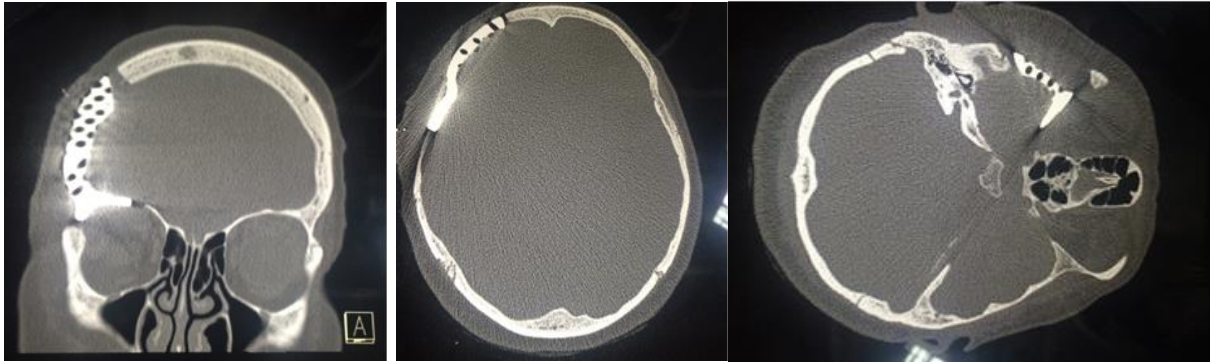


Figure 10-58: CT scan of the patient two weeks after the surgery

CONCLUSIONS

- **An innovative methodology for manufacturing of personalized facial-cranial implants is developed and tested in clinical conditions. It is based on tomography imaging and bone reconstruction with three-dimensional modeling of the missing part (using a mirror transformation from the existing bone section on the other half), prototyping of a "sample for testing" and effective planning of the operation.**
- **The results of the implant operation demonstrate good coincidence between the contour of the implant and skull surfaces. The patient shows rapid recovery after surgery and good adoption of the implant.**

10.6. METHODOLOGY FOR MANUFACTURING OF PERSONALIZED IMPLANTS FOR CRANIOPLASTY BASED RAPID TOOLING

With the experience gained in cranial implants, we have been given the opportunity to work on the hardest case for the neurosurgery in hospital for active treatment and emergency medicine "N. I. Pirogov". The patient was diagnosed with fibrous dysplasia (FD). To rescue the optic nerve, neurosurgeons remove much of the affected bones. Cranioplasty is required in the treatment of the patient.

To achieve the goal, the most advanced technologies based on 3D bio-modeling will be used. In the first phase the patient's tomography data is used for 3D reconstruction of the affected area. After a number of steps, only the important skeletal bone structures shown in the following figure are isolated (Figure 10-59). Figure 10-59 also shows the condition of the skull after surgery. One of the main problems in reconstruction of the bone is the lack of any model of the defect which would guide the engineer. The only option is to make a mirror image of the left part of the skull, which, as explained above in the text, is not completely symmetrical with the right. The overall forming process also includes the use of tools for the so called direct modeling of complex surfaces. A mirror image of the skull is created (characteristic anatomical points are used).

Implant modeling is then proceeded. The process is in agreement with the physician's team, who defines the surrounding contour requirements so as to be able to manipulate the implant during the operation and to prevent it from affecting the nerves when it is inserted. The final shape of the implant is presented in Figure 10-63.

Due to the above-mentioned limitations regarding the choice of implant material Rapid Tooling technologies are most suitable for manufacturing of the part.

The final step in the process of manufacturing of the implant is to inject the PMMA material into the pre-coated instrument produced by additive technology. The shape of the implant is complicated because it has been designed for aesthetic and functional considerations rather than technological ones, so that the mold should be elastic or partially destroyed to remove the finished piece.

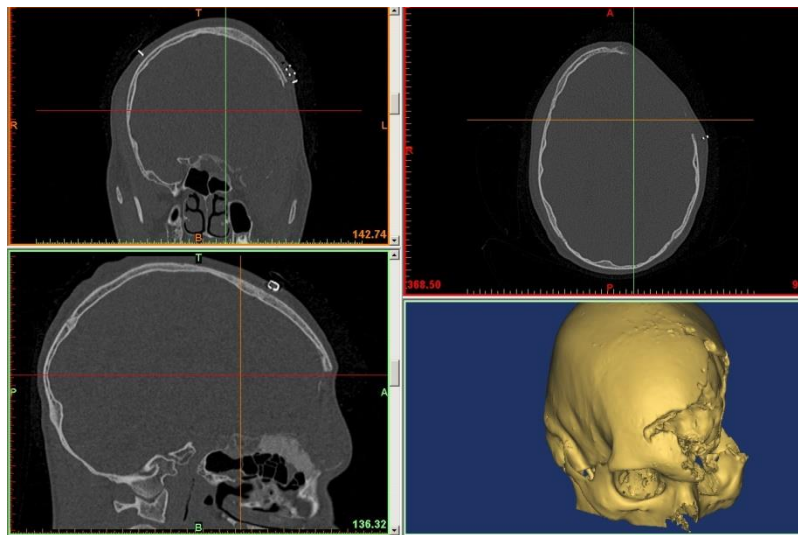


Figure 10-59: Isolated bone structures of the skull

CONCLUSIONS

- A special method for implementing a hybrid approach for implant manufacturing has been developed. Rapid tooling techniques with additive technology (negative image materialization) are used. The implant is molded into the tool until the polymer is solidified. The proposed method for rapid physical and virtual prototyping allows to design and manufacture life-saving implants that enable more successful transplantations.

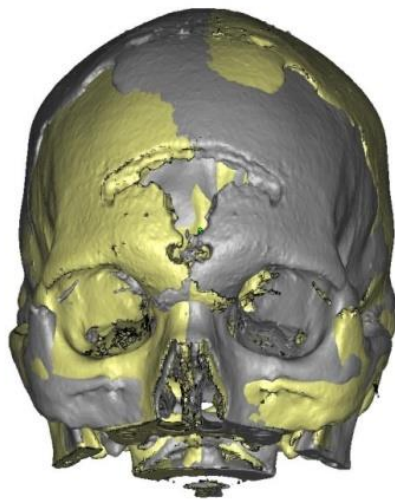


Figure 10-62: Iterative recovery

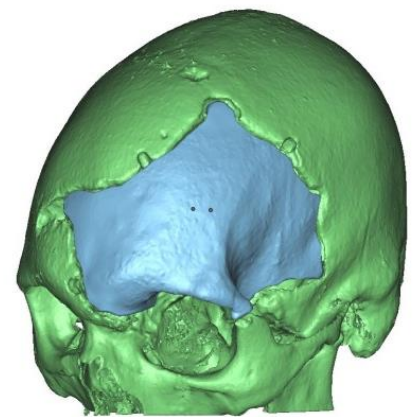
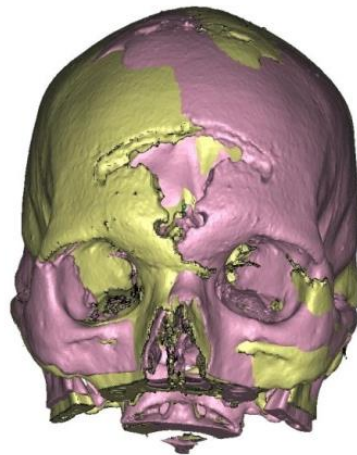


Figure 10-63: Final shape of the implant

With modern 3D modeling techniques, it is possible to create complex, personalized products, following the unique developed methodology shown in Figure 10-68.

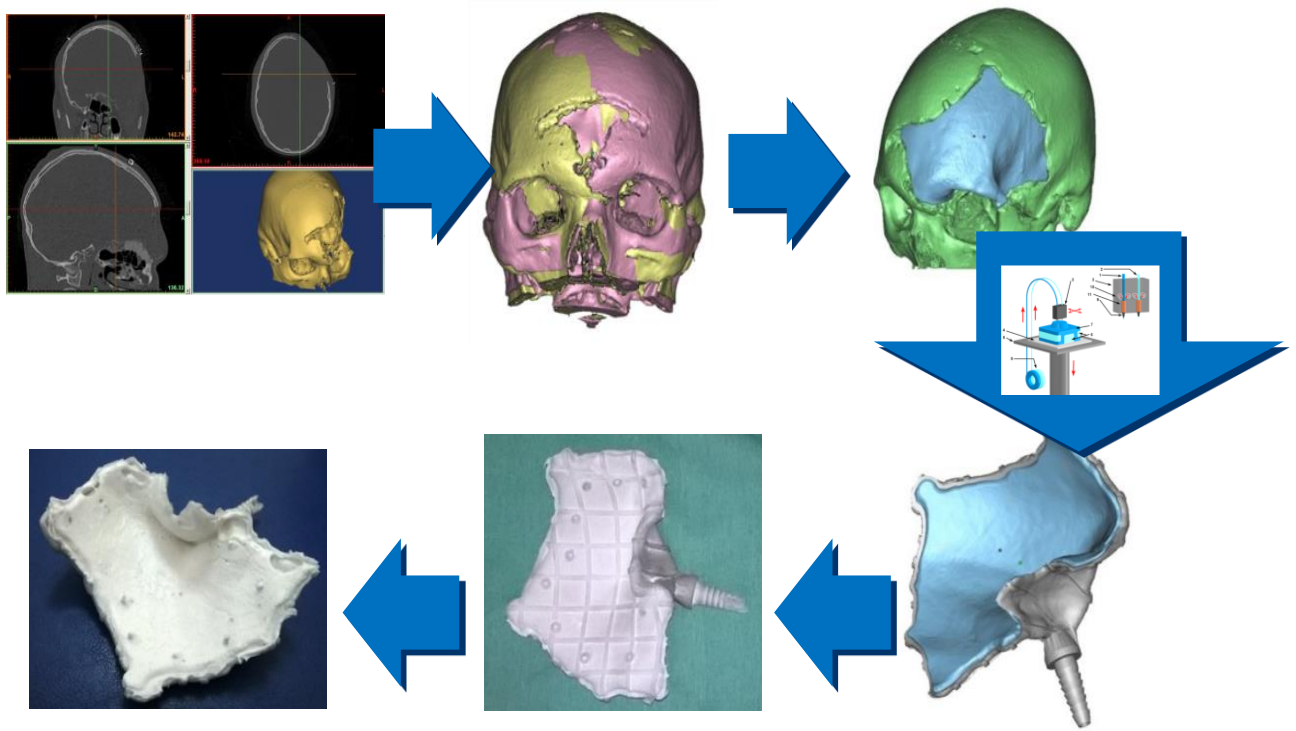


Figure 10-68: Methodology for manufacturing of personalized implants for craneoplasty based on Rapid Tooling

CONCLUSIONS FROM CHAPTER 10

- CAD / CAM technologies and additive manufacturing technologies (3D printing) are increasingly applied in various fields of medicine - pre-operational virtual 3D planning, preparation and simulation of the upcoming surgical procedure; awareness and education of the patient; production of individual, custom implants for cranial surgery (cranial defects), production of individual, custom implants for spinal surgery (neoplastic lesions and traumatic injuries), etc., through democratization of the personalized and individualized approach to the patient.
- In all applications, the process can be described as similar and includes: patient scanning, bone reconstruction, design, engineering and production with complete control and monitoring of each step.
- 3D technologies have the potential to provide better planning, better results, shorter working hours, less complications, reduced recovery and hospital stay and, as a result, better patient care.

GENERAL CONCLUSIONS

By fulfilling the dissertation goal and set of related tasks and the proposed new paradigm for designing innovative products in a virtual environment, the following main conclusions can be drawn from the achieved objectives and the results of the research:

- ✓ The thesis of the need for a new paradigm in the design process is announced. Innovative strategies, methods and approaches have been developed, including on a modular basis, to quickly specify and conceive of complex architectures of innovative products with reduced time to market, fulfilling the dynamic requirements of the clients in terms of functionality, customizing and last but not least - the cost of ownership;
- ✓ A Matrix Approach has been developed to efficiently distribution the needed functions between the different systems (mechanical, electronic, sensorics and software) in order to achieve low cost and optimum reliability in composing the product architecture with maximum use of available commercial components;
- ✓ An innovative strategy and a "fractal method" for the compositional development of new complex products and modular structures is proposed, allowing the most accurate and adequate modeling and simulation of the behavior at the earliest possible design stage as well as for the design variants optimization;
- ✓ Specific types of engineering analysis have been analyzed as a component of the VP regarding applicability and efficiency of the simulations in the process of developing new products;
- ✓ The possibilities for evolution of the virtual prototype to the digital twin technology were investigated, allowing the most accurate and adequate modeling, simulation and study of the behavior in the operating conditions of the "nominal" product developed and consequently each physical product and during its operation period building cyber-physical systems;
- ✓ The White and Black Box method has been developed, validated and tested using three proposed "self-learning" based approaches through the fine tuning of specific aspects of virtual prototype behavior through feedback from physical prototyping test data. These approaches are tested in the industrial projects in identifying and evaluating specific physical systems and/or process parameters to achieve high levels of confidence in simulation results;
- ✓ As a result of the proposed methods and approaches, a number of innovative design solutions for industrial partners from Bulgaria and International Companies have been developed and implemented under the supervising of the author, with a number of new solutions patented (9 international patents) and some of them have been launched to the world markets (for example, the innovative impact quasi-resonance system for hammer systems is a world-wide novel, honored with a number of awards);
- ✓ A new "LL" method is proposed, based on the new paradigm of "fractal structuring" of the design and prototyping process, instead of widely used, but in many cases not effective "V/ W" models. The "LL" method provides an opportunity for stepwise upgrading of VP during its creation and validation through fragmentary PPs to dramatically reducing time for product development and validation at the various stages of the projects, providing the most effective balance with physical prototyping. The approaches are demonstrated by their application in industrial projects;
- ✓ The specific requirements, the working methods and the specifics approaches of the creation and production processes in the sphere of healthcare and implantology have been analyzed. The great potential of virtual and additive technologies has been proven to alter the paradigm in implantology, opening up

possibilities for speeding up the processes, shortening the numbers or complexity of surgical operations and the duration of surgical interventions;

- ✓ Three practical methods for implementing the technologies of virtual prototyping and rapid physical production in combination with medical knowledge for personalization of cranial/spinal and dental implants with adequate definition of the needed geometry were worked out and demonstrated. These methods revolutionize the way of implantation in the patient by virtual or physical prototyping of process elements, better planning of surgical operations and achieving a precise and adapted way of aligning to the surrounding bone system, including kinematics and bone loads capacity;
- ✓ Developed and tested in clinical environment is an innovative methodology for creation of personalized facial-cranial implants based on tomography imaging and reconstruction of the bone system with 3D modeling of the “missing” bone elements (using a mirror transformation from the existing elements of the cranial symmetry to the other half), intermediate polymer RP samples for tailoring “in patient” and effective planning of the surgical operation;
- ✓ 3D technologies have the potential to revolutionize healthcare industry dramatically, providing better planning, better results, shorter surgical operation time, less intervention complications, reduced recovery and hospital stay, and as a result - better patient care.

III. CONTRIBUTIONS

A) SCIENTIFIC CONTRIBUTIONS

1. A new “fractal approach” has been proposed for composing complex systems for rapid implementation of variant based development and modular re-use of the components, aiming at a high degree of flexibility and efficiency of product and process organization throughout the whole product life cycle.

2. A new principle and method of operation of pneumatic vacuum mechanisms for impact systems operating in quasi-resonance mode with increased efficiency of the impact energy was developed and tested. The proposed method and design solution is protected by a Bulgarian and a worldwide Patents in co-authoring by author.

3. A new method called "WHITE/BLACK BOX" has been worked out to improve the efficiency and effectiveness of the virtual prototype (VP), defined as a "white box", through feedback from physical prototype(PP) test data (defined as black box model) and organizing an internal VP simulation “micro” cycle for fine tuning and calibration in the iterative connectivity and "self-learning" of the VP.

4. A new "LL" method has been proposed to develop new innovative products, based on the evolution of the virtual prototype and fragmentation of physical prototypes in which the development process goes in hybrid and parallel - the concept and architecture "from top to down", the virtual prototype "from bottom - up", and the physical prototype – just fragmentary- by levels.

B) SCIENTIFIC-APPLIED CONTRIBUTIONS

1. Based on the modified Quality Functional Matrix (QFD), an approach to identifying user needs (using prototypes) and transforming them into technical specifications is proposed.
2. A matrix method for family structure definition was worked out, based on the minimal functional-value overlap between family members at the highest possible level of unification.
3. A “matrix approach” to define the functional architecture of the product with the distribution of the necessary functions between the main systems was developed in three “steps” and in three sub-matrices.
4. Two new approaches (generative and comparative) are proposed for successful reintegration into the product development process of the resultant model after geometric optimization to the achievement of "live", feature based geometry and model connectivity.

5. A method for preliminary assessment of the confidence level of the results of multi physical virtual prototype (VP) simulations was worked out by feedback with measured parameters of physical tests on PP, and three possible approaches were proposed for assessing the reliability of the results of virtual prototypes - initial, intermediate and final.
6. A hybrid “analytical- simulation” approach for the design of the elastic clips for plastic components assembly, allowing "self-learning" by integrating test results using the WHITE/BLACK BOX method and the formation of a knowledge-based expert system is proposed and tested.
7. A combined structural and parametric approach for optimization of the shape and parameters of the elastic system by VP in a well-defined space of constraints and rigid functional requirements with application of a heuristic approach for creating variants of concepts and parametric optimization of generations through virtual “design of experiment” is worked out.
8. An approach to evaluate the influence of the design parameters on the acoustic performance of the railway wheel has been proposed and the effectiveness of this assessment has been demonstrated using a virtual prototype in the early design stage. The approach is proven by TUV certification and the requirements of industry standards for the acoustic emissions of railway wheels by reference to the physical test sample. This is a remarkable step in a new common methodology development for acoustic research, based on VP.
9. A new method of implant building based on computer tomography, 3D reconstruction and creation of a 3D model of the affected area of the jaw, virtual design and additive manufacturing of a physical personal Subperiosteal implant was worked out and validated.
10. An innovative methodology for the creation of personalized facial-cranial implants was developed and tested in clinical environment, based on computer tomography imaging and reconstruction of the jaw bone system with 3D modeling of the missing elements (using a mirror transformation from the existing elements of the bone to the other half of the skull), intermediate polymer RP samples for tailoring “in patient” and effective planning of the surgical operation was implemented too.
11. A special method for applying an indirect approach to implant preparation has been worked out, using technologies to rapid create a mold with additive technology (negative image materialization) and physical formation the prepared virtual implant into printed one-shot mold until implant hardening.

C) APPLIED CONTRIBUTIONS

1. A multiphysical virtual prototype of a pneumatic-vacuum impact mechanism has been developed and validated;
2. The general characteristics, the areas of effective application, as well as the advantages and disadvantages of the additive technologies and methods have been investigated. The important features of industrially recognized additive methods have been evaluated in a tabular and easy to use form;
3. The combined ultrasonic/milling prototyping process has been identified as effective in case of use of rigid and brittle materials, including non-metallic materials such as glass, porcelain, glass fiber, zirconium dioxide and many others;
4. Additive production and rapid prototyping technologies were evaluated using a reference model, which was used to measure the accuracy of the process and specific geometric elements;
5. The proposed methods of fractal design, modular composition, "WHITE/BLACK BOX" and "LL" have been demonstrated in the industrial projects and was shown good results in terms of effectiveness and efficiency of the design process;
6. For the practical application of the developed combined structural and parametric approach, a software tool was developed to support design calculations at the development stage of elastic clips in case of "no initial geometry" model. The product is implemented under the conditions of the leading engineering company Visteon Bulgaria, significantly reducing the time compared to creating a detailed VP;
7. The proposed modular approach to building a forklift family was tested into industrial project, demonstrating the composition and support of a significant variants, covering over 200 "tailor made" forklifts to more effectively meet customer needs and to achieve practically product personalization using design compositions by available modules. Each forklift assembly is generated in a 3D individual VP-based "digital twin" provided by Virtual Engineering and Industry 4.0 technologies;
8. The possibilities of the most common technologies for the cranial/spinal and dental implants are analyzed. Their advantages and disadvantages in manufacturing process was outlined, depending on the geometry and structure of the implants geometry and materials. Areas of effective application are outlined too;
9. A very good distribution of the chewing loads on the jaw of the Subperiosteal implant has been achieved, the structure of which has been optimized using VP to ensure optimal implant stiffness;
10. The proposed indirect approach to rapid virtual building and physical implant formation in a 3D printed mold allows rapid design and production of life-saving implants that enable more successful transplants.

IV. Publications, Science Fields and Dissemination.

The main thesis research results are published into two Monographies:

- **Todorov, G., K. Kamberov**, Virtual Engineering. CAD/CAM/CAE&PLM Technologies, ISBN 978-619-7171-15-0, Direct Services Ltd., 704 p. Sofia, 2015.
- **Todorov, G., K. Kamberov**, Engineering Analysis, ISBN978-619-7171-63-1, Direct Services Ltd., 280 p., Sofia, 2018.

As in 30 publications:

A) SCOPUS

1. **Todorov, G.**, Kamberov, K., Pantaleev, T., Koprarev, N., Elastic rail clip design development, based on virtual prototyping, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 393(1),012120, 2018
2. **Todorov, G.**, Kamberov, K., Design concept evaluation of tooth implant-abutment interface based on engineering analyses using virtual prototypes,2018, Journal of the Balkan Tribological Association 24(3), pp. 521-530
3. **Todorov, G.**, Sofronov, Y., Kyurkchiev, G., Benchmarking of different additive technologies as rapid manufacturing techniques,2018 Journal of the Balkan Tribological Association, 24(3), pp. 477-483
4. **Todorov, G.**, Kamberov, K., Kralov, I., Ignatov, I., Influence of the contact roughness upon railway monoblock wheel acoustic behavior on virtual prototyping approach, 2017, AIP Conference Proceedings
5. **Todorov, G.**, Kamberov, K., Semkov, M., Thermal CFD study and improvement of table top fridge evaporator by virtual prototyping, 2017 Case Studies in Thermal Engineering 10, pp.434-442
6. **Todorov, G.**, Todorov, T., Ivanov, I., Valtchev, S., Klaassens, B., Tuning techniques for kinetic MEMS energy harvesters 2011INTELEC, International Telecommunications Energy Conference (Proceedings), DOI: 10.1109/INTLEC.2011.6099874

B) Web of Science

1. **Todorov, Georgi**; Kamberov, Konstantin. Virtual Prototyping of Drop Test Using Explicit Analysis, 43rd International Conference on Applications of Mathematics in Engineering and Economics (AMEE) 2017 PROCEEDINGS OF THE 43RD INTERNATIONAL CONFERENCE APPLICATIONS OF MATHEMATICS IN ENGINEERING AND ECONOMICS (AMEE'17) Book Series: AIP Conference Proceedings Volume: 1910 Article Number: UNSP 020013 Published: 2017
2. Abadzhiev, Metodi; **Todorov, Georgi**; Kamberov, Konstantin, MANDIBULAR FLEXURE - A REASON FOR CHRONIC PAIN SYNDROME IN EDENTULOUS PATIENT RESTORED WITH FIXED ZRO (2) CONSTRUCTION OVER IMPLANTS, INSERTED IN NATURAL BONE AND BONE GRAFT AREA. CASE REPORT. JOURNAL OF IMAB Volume: 23 Issue: 1 Published: JAN-MAR 2017 Pages: 1432-1440

C) Journals and Conferences

1. **Тодоров, Г.**, Николов, Н., Митов, В., Нови методи за създаване на дентални импланти, част 2, Сборник доклади на МНК МТФ'2012 18-20 октомври, 2012, София, България, стр. 411-419;
2. **Todorov. G.**, Dobrev, I., Kamberov, K., CFD and thermal analyses application at reflow oven design improvements based on virtual prototyping techniques, Proceedings of International Conference on Innovative Technologies, IN-TECH 2012, Rijeka, 26 - 28.
3. **Todorov. G.**, K. Kamberov, Sv. Stoev, I. Savov Structural Analysis and Verification of Snap-Fit Joints in Plastic Parts CONTECH '13, Istanbul, Turkey, 26th to 28th December 2013

4. **Тодоров Г.**, Я. Софронов, Х. Христов, Якостно и деформационно поведение на субпериостални импланти, сп. „Машиностроене и електротехника“, ISSN 0025-455X, бр.06/2013, с. 10-12
5. **Тодоров Г.**, К. Камберов, Цв. Иванов, Б. Врабевски, Ефективност на инженерните анализи, сп. СЮ, CAD/CAM&GIS, бр.8, година IX, 09/2013
6. Софронов Я., **Г. Тодоров**, К. Камберов, Реконструкция в CAD средата на геометрия след оптимизация или сканиране на реален обект при развитие на комплексен продукт, сп. СЮ, CAD/CAM&GIS, бр.8, година X, 09/2014
7. Камберов К., **Г. Тодоров**, Ст. Малешков, Б. Романов, Подходи за обратно интегриране на оптимизирани геометрични модели в процеса на развитие на продукта, сп. „Машиностроене и електротехника“, ISSN 0025-455X, стр. 14-19, бр. 5-6, година LXIII, 2014
8. **Тодоров Г.**, Б. Романов, Б. Врабевски, Я. Софронов, Възможности за избягване на деформации в ореберени детайли чрез оптимизация на геометричната структура, „Механика на машините“, № 107, 2014, ISSN 0861-9727, с. 15-19.
9. **Тодоров Г.**, Я. Софронов, Цв. Иванов, Изготвяне на мащабни физически прототипи за идентификация на функционални параметри, „Машиностроене и Машинознание“, 2014, ISSN 1312-8612, стр. 102 – 106.
10. **Тодоров Г.**, Митов В., Николов Н., Софронов Я., Методика за 3D реконструирване от томографски изображения на кости и практическото и приложение при изграждане на импланти; Списание „CAD ДАЙДЖЕСТ“, ноември 2014 г.
11. **Тодоров Г.**, Митов В., Върбанов Б., Софронов Я., Христов Х., 3D Реконструирване от томографски изображения на челюстна кост за субпериостални импланти и практическото и приложение, Списание „Машиностроене и електротехника“, ISSN 0025-455X, брой № 9, 2014 г.
12. Kamberov K., **G. Todorov**, Sv. Stoev, B. Romanov, Mechanical Strength Test of Train Wheel Based on Virtual Prototyping, Proceedings in Manufacturing Systems, vol. 10, issue 3, 2015, Bucharest, pp 99-104
13. **Тодоров Г.**, К. Камберов, Цв. Иванов, Валидация на конструкции чрез инженерни анализи на виртуални прототипи, сп. „Машиностроене и машинознание“, ISSN 0025-455X, бр.5, 2015, стр.9-12;
14. **Тодоров Г.**, Б. Загорев, К. Камберов, Б. Романов, Проектиране на иновативни продукти чрез хармонизация на стилистично и функционално решение, сп. „Машиностроене и машинознание“, ISSN 0025-455X, бр.6, 2015, стр.7-1;
15. **Тодоров Г.**, К. Камберов, Б. Романов, Мултифизичен термо-флуиден анализ за определяне работните параметри на тестова магнитна глава, 28 Международна научна конференция, Сборник доклади, Созопол, България, 11-14 Септември 2015, стр.407-414
16. **Тодоров Г.**, К. Камберов, Ил. Савов, Автоматизиран подход за CAD моделиране на ортези за костни импланти, 28 Международна научна конференция, Сборник доклади, Созопол, България, 11-14 Септември 2015, стр.391-398
17. Софронов Я., **Г. Тодоров**, К. Стоичков, Ю. Цаков, А. Тодоров, Н. Николов, Прогресивни методи за изработка на дентални импланти, 2015, Сборник доклади международна научна конференция „70 години МТФ“, МТФ 2015, ISBN: 978-619-167-178-6, стр. 445 – 449.
18. **ТОДОРОВ, Г.**, И. САВОВ, КАМБЕРОВ, К., КОНСТРУКЦИИ НА ОРТЕЗИ, ОСНОВАНИ НА ТЕХНОЛОГИИТЕ ЗА БЪРЗО ПРОТОТИПИРАНЕ НА ПОЛИМЕРНИ СТРУКТУРИ С БИОПРИЛОЖЕНИЕ, СПИСАНИЕ „МАШИНОСТРОЕНИЕ И ЕЛЕКТРОТЕХНИКА“, ISSN 0025-455X, БР. 5-6, ГОДИНА LXV 2016, СТР. 12-15
19. **ТОДОРОВ, Г.**, КАМБЕРОВ, К., СЕМКОВ, М., РАЗВИТИЕ НА КОНСТРУКТИВНА КОНЦЕПЦИЯ ЧРЕЗ ВИРТУАЛНО ПРОТОТИПИРАНЕ, СПИСАНИЕ „МАШИНОСТРОЕНИЕ И ЕЛЕКТРОТЕХНИКА“, ISSN 0025-455X, БР. 10-11, ГОДИНА LXV 2016, СТР. 27-30
20. **ТОДОРОВ, Г.**, СОФРОНОВ Я., Н. НИКОЛОВ, КАМБЕРОВ, К., ПРИЛОЖЕНИЕ НА 3D CAD/CAM ТЕХНОЛОГИИ В МЕДИЦИНАТА, СП. СЮ, CAD/CAM&GIS, БР.8, ГОДИНА XII, 09/2016, СТР. 66-72
21. **ТОДОРОВ Г.**, КАМБЕРОВ К., СТАТЕВ П., ИНДУСТРИЯ 4.0 –ПРЕДИЗВИКАТЕЛСТВА И ВЪЗМОЖНОСТИ, СП. СЮ, CAD/CAM&GIS, БР.9, ГОДИНА XII, 09/2017, СТР. 66-72
22. **ТОДОРОВ Г.**, ПРИЛОЖИМОСТ НА ТЕХНОЛОГИЧНАТА КОНЦЕПЦИЯ „ИНДУСТРИЯ 4.0“ПРИ РАЗВИТИЕ НА НОВИ „МАСОВО ПЕРСОНАЛИЗИРАНЕ “ПРОДУКТИ НА ПРИМЕРА НА ФАМИЛИЯ ВИСОКОПОВДИГАЧИ, СПИСАНИЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ И ЕЛЕКТРОТЕХНИКА“, БР. 5-6, СТР.12-18, 2017.

Patents, related to the Thesis

Name	Inventors:	Publication
METHOD AND SYSTEM FOR DIRECT CASTING OF CAST COMPONENTS BY ADDITIVE MANUFACTURING OF COMPOSITE MONOLITHIC MOLDS	TODOROV GEORGI DIMITROV [BG]; IVANOV TSVETOZAR TIHOMIROV [BG]	WO2017008130 (A1) — 2017-01-19
DEVICE INTERLOCKING WITH A COMPARTMENT	TODOROV GEORGI DIMITROV [BG]; KAMBEROV KONSTANTIN [BG]; EVANS JAMES [US]; DEGGINGER CHRIS [US]	WO2016134287 (A1) — 2016-08-25
ADDITIVE MANUFACTURING MACHINE FOR CREATING THREE-DIMENSIONAL OBJECTS FROM POWDER MATERIAL	TODOROV GEORGI DIMITROV [BG]; IVANOV TSVETOZAR TIHOMIROV [BG]	US2018021978 (A1) — 2018-01-25
METHOD AND SYSTEM FOR LAYER-WISE GENERATION OF THREE-DIMENSIONAL MODELS FROM POWDERED MATERIAL	TODOROV GEORGI DIMITROV [BG]; IVANOV TSVETOZAR TIHOMIROV [BG]	WO2016161489 (A2) — 2016-10-13
APPARATUS FOR PACKAGING A PRODUCT WITH AN EXTENSIBLE FILM	CAPPI ANGELO [IT]; TODOROV GEORGI DIMITROV [BG]	US2017217611 (A1) — 2017-08-03
A DEVICE FOR ATTACHING WORK TOOLS	MANTOVANI ALBERTO [IT]; TODOROV GEORGI DIMITROV [BG]	WO2006103558 (A1) — 2006-10-05
PERCUSSIVE MECHANISM FOR PORTABLE ELECTRIC PERCUSSION DRILLING MACHINES	PEYKOV VELICHKO [BG]; GANCHEV NIKOLAY [BG]; TODOROV GEORGI [BG]; ROMANOV BORISLAV [BG]	WO 2009/036526 A1 BG109958 (A) — 2009-03-31
UNINTERRUPTIBLE POWER SUPPLY SYSTEM	ZHIVKOV VENELIN [BG]; TODOROV GEORGI [BG]; NIKOLOV NIKOLAY [BG]; IVANOV TSVETOZAR [BG]	BG2135 (U1) — 2015- 10-30
MODULE FOR UNINTERRUPTED ELECTRIC CHARGING WITH A KINETIC ACCUMULATOR OF ENERGY	TODOROV GEORGI [BG]; NIKOLOV NIKOLAY [BG]; KAMBEROV KONSTANTIN [BG]	BG2655 (U1) — 2017- 06-30
JOYSTICK	NIKOLOV NIKOLAY [BG]; TODOROV GEORGI [BG]; ZABCHEV GEORGI [BG]	BG112068 (A) — 2017-01-31
CONTACT SYSTEM FOR ELECTRICAL CABINETS WITH MOVABLE CHASSIS	NIKOLOV NIKOLAY [BG]; TODOROV GEORGI [BG]; GROZDANOVA SNEZHANKA [BG]	BG1954 (U1) — 2014- 08-31

Successfully finished PhD Thesis's, supervised by the Author, relevant to field of the Research,

	PhD student Name	PhD Title	Finished date
1	Konstantin Hristov Kamberov	Modelling and Prediction of reliability parameters in design stage	27.09.2011
2	Borislav Borisov Vrabewski	Integral Optimization of dynamic loaded components in the design stage	20.05.2014
3	Velichko Martinov Pejkov	Study of impact mechanisms for hand-held drilling power tools	08.10.2012
4	Adriana Trajche Ikova	Functional-Cost Analysis application in CAD/CAM Environment	03.11.2012
5	Yavor Petrov Sofronov	Manipulation Systems Design for Extracting Robots	19.11.2015
6	Krasimir Stoyanov Vassilev	Machining Accuracy Modelling of Free Form Surfaces for Cutting Tools by HSM	27.09.2012
7	Viktor Krumov Mitov	Study of the Rapid Production Technologies of Dental Implants	11.12.2014
8	Borislav Georgiev Romanov	Complex Shaped Plastic Components Design Improvement based on Filling Process Simulation by Virtual Prototyping	01.04.2016
9	Tsvetozar Tihomirov Ivanov	Sheet metal cutting machines design process automation	05.02.2016
10	Nikolay Petkov Ostrev	Rapid Prototyping and Production of the LED Light Elements	20.09.2017

ANOTATION

The Doctoral Thesis is dedicated to the methods and approaches of virtual and physical prototyping in the development of new products, enabling early testing of conceptual solutions, functionality identification, detection of potential engineering problems as well as rapid and adequate personalization of solutions, where the number of constructive modifications and the number of prototypes and the associated new strategies are substantially reduced.

The research covers the processes of development, identification and validation in the creation of innovative products and solutions as well as processes, allowing a high degree of personalization allowing to pursue the need to reduce the process loop from the idea to the market as much as possible and to achieve maximum efficiency and reverse of investments. The focus of the study is on developing the strategies, methods and approaches for the application of CAD/CAM/CAE technologies and particularly in the development and testing of effective application of virtual and physical prototypes for shortening the time, improving the quality and the environmental performance of the new products' development, design and personalization as well as the sustainability of the organizational and process methods and tools to minimize the risk for errors and improve the quality and efficiency of the innovations.

The work has developed a methodological sequence in conceiving and designing complex industrial products and systems, including the medical implants' creation. The thesis defines the need for a new paradigm in the design process organization. Innovative strategies, methods and approaches have been developed to quickly specify and conceive the complex architectures of innovative products, including modular design principle in fulfilling the dynamic demands of the customers for functionality, variance and last but not least – the cost of ownership.

A matrix approach has been developed to efficiently divide & distribute the functionality between mechanical, electronic, sensor and software systems to achieve low cost and optimum reliability when composing the product structure with maximum use of commercial components.

A new fractal method is proposed as well as an innovative "LL" method for virtual and physical prototyping. A new "black/white" box method was worked out to validate virtual prototypes. Industry held test cases have shown that FEM simulations achieve very accurate estimates when optimizing the design combined with physical tests and feedback allowing the virtual prototype to evolve into a "digital twin".

The combination of virtual technologies and additive technologies is defined as a promising tool for creating and manufacturing medical implants, including personalized ones. The specific requirements, the working methods and the specifics of the creation and production processes in the sphere of healthcare and implantology are analyzed. Three practical methods of implementing the technologies of virtual prototyping and rapid physical manufacturing in combination with medical knowledge for personalization of bone and dental implants along with adequate definition of the geometry are proposed and realized. These methods revolutionize the process of organizing the whole implants' creation process by virtual or physical prototyping of process elements, good planning of surgical operations and achieving a precise and adapted to the surrounding bone system implants as well as a way of joining with the inclusion of dynamic loads to bones.

As a result of the proposed methods and approaches, a number of innovative design solutions for industrial partners have been developed and implemented into industrial scenarios under the author's supervision, with a number of new solutions being patented (9 international patents). Some of the products have reached the world's markets (for an instance, the innovative hammer quasi-resonance system was recognized as a world-wide innovation, honored with a number of awards).