РУСЕНСКИ УНИВЕРСИТЕТ „АНГЕЛ КЪНЧЕВ”
МАШИННО ТЕХНОЛОГИЧЕН ФАКУЛТЕТ
КАТЕДРА „ТЕХНОЛОГИЯ НА МАШИНОСТРОЕНЕТО И МЕТАЛОРЕЖЕЩИ МАШИНИ”

маг.инж. Георги Колев Георгиев

„ИЗСЛЕДВАНЕ ВЪЗМОЖНОСТИТЕ ЗА ИЗПОЛЗВАНЕ НА ФОТОГРАМЕТРИЧНИТЕ МЕТОДИ ЗА РЕКОНСТРУИРАНЕ НА МАШИНОСТРОИТЕЛНИ ДЕТАЙЛИ”

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация

за присъждане на образователната и научна степен

“доктор”

професионалното направление: 5.1 „Машинно инженерство”

научната специалност: “Метрология и метрологично осигуряване”

Научни ръководители:

доц.д-р инж. Борис Сакакушев
проф.д-р инж. Красимира Георгиева

Рецензенти:
проф. д-р инж. Бранко Сотиров
доц. д-р инж. Виолета Станчева

2016, Русе

Дисертационният труд е отразен в обем от 163 страници с 86 фигури и 47 таблици, от които 8 стр. литература, като в приложение от 41 страници са представени таблици и графики от различните глави. Цитираните литературни източници са 131, от които 40 на кирилица и 82 на латиница, 9 уеб сайта. Съдържанието на дисертацията е структурирано в пет глави с изводи към всяка глава и са заявени 6 научно-приложни и 8 приложни приноси.

В автореферата номерацията на фигурите, таблиците и формулите са според означенията в дисертацията. Докторантът работи като асистент към катедра „Машинно инженерство" на Факултет „Техника и технологии" - Ямбол при Тракийски университет – Стара Загора. Изследванията и разработките по дисертационната работа са извършени в Русенски университет „Ангел Кънчев" гр. Русе и Факултет „Техника и технологии" - Ямбол при Тракийски университет – Стара Загора.

Докторантът е зачислен в докторантура на самостоятелна подготовка към катедра „Технология на машиностроенето и металорежещи машини.

Дисертационният труд е обсъден на 09.06.2016г. на открито заседание пред съвета на катедра „ТММРМ", разширен с хабилитирани лица и насрочен за защита пред научно жури.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на …….2016г. от ……. часа в зала …… на Русенски университет „Ангел Кънчев". Материалите на докторанта са на разположение на заинтересованите в катедра „ТММРМ". Авторефератът е публикуван на сайта за развитие на академичния състав на университета.

Автор: инж. Георги Колев Георгиев
Заглавие: Изследване възможностите за използване на фотограметричните методи за реконструиране на машиностроителни детайли

Тираж: 20 броя
Издателски център при Факултет „Техника и технологии" – Ямбол
Тракийски университет – Стара Загора

The problem with controlling the dimensional accuracy of machine components stands always in the focus of research since its significance in terms of guaranteeing the quality of the final products, and the time required to perform control operations to the total time for manufacture of the devices it is significant.

The use of traditional contact methods for measuring geometric dimensions of objects is accompanied with significant measurement uncertainty, which is due to several factors such as wear on contact surfaces of measuring instruments, errors in metering, errors from temperature deformation and others.

In non-contact methods of measuring this type of error are minimal or totally absent. Usually, this instrumentation in non-contact measurement methods works on the principle of optical transformation of the information or laser scanning. The cost of these devices is too high, and requirements to the environment in which they will work and to the training of staff are essential.

The object of the study is the possibilities of applying photogrammetry technical measurements using readily available and relatively inexpensive photographic equipment.

This work aims to demonstrate the ability to use the methods of reverse engineering and rapid prototyping machine items by photogrammetric method based on photographic shooting in general and mechanical engineering.

For achieving this goal the following tasks are performed:

• a methodology for studying the factors that influence the accuracy photogrammetric determining the geometric dimensions is developed;

• factors influencing the accuracy of calibration and measurement capture are investigated;

• measurement errors by photogrammetric method and prove its performance are analyzed;

• applicability of the photogrammetric method for measuring small size and reconstruction of machine parts is investigated.

ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Актуалност на проблема

Проблемът с контролирането на точността на размерите на машинните детайли стои винаги във фокуса на научните изследвания, тъй като значимостта му по отношение гарантиране качеството на крайните продукти е съществена, а времето, което е необходимо за извършване на контролните операции спрямо общото време за производство на изделията е значително.

Използването на традиционните контактни методи за измерване на геометричните размери на обектите се съпътства със значителна неопределеност на измерванията, което се дължи на редица фактори, например: износването на контактните повърхнини на измервателните инструменти, грешки при отчитане на показанията, грешки от температурни деформации и др.

При безконтактните методи на измерване този тип грешки са минимални или изобщо липсват. Обикновено, използваните уреди при безконтактните методи на измерване работят на принципа на оптичното преобразуване на информацията или на лазерно сканиране. Цената на тези уреди е твърде висока, а изискванията към средата, в която те ще работят и по отношение на квалификацията на обслужващия персонал са съществени.

Използването на принципа на фотограметрията се прилага широко в редица области, където обектите имат значителни размери. Приложението на фотограметрията в областта на техническите измервания, както и за определяне на точността на размерите на машинните детайли, където размерите на обектите са значително по-малки, е в сравнително начален етап в световен мащаб.

С оглед на бурното развитие на фотографската и компютърна техника, софтуерните продукти и непрекъснато намаляващата им цена, използването на фотограметрията в областта на техническите измервания би бил евтин, бърз и ефективен метод за контрол на точността на геометричните размери на машиностроителни детайли.

Обект на изследването е възможностите за прилагане на фотограметрията за технически измервания с помощта на леснодостъпна и сравнително евтина фотографска екипировка.

2. Цел и задачи на работата

Целта на настоящия дисертационен труд е да се изследват възможностите за реконструкция, измерване и бързо прототипиране на машиностроителни изделия чрез фотограметричен метод, основан на фотографско заснемане.

За изпълнение на целта е необходимо да се изпълнят следните задачи:

- Да се разработи методика за изследване на факторите, оказващи влияние върху точността при фотограметрично определяне на геометрични размери;
- Да се изследват факторите, влияещи върху точността при калибриране, заснемане и измерване;
- Да се анализират грешките при измерване чрез фотограметричния метод и да се докаже неговата работоспособност;
- Да се изследва приложимостта на фотограметричния метод за измерване на малки размери и за реконструиране на машинни детайли.

3. Научна новост

Доказана е приложимостта на фотограметричните методи за измерване в областта на общото и машинното инженерство при използване на геометрична информация чрез фотоапарати, среден клас и подходящ софтуер. Получените резултати от проведените експерименти за измерване на малки размери (под 2mm) и ре-инженеринг на машиностроителни детайли потвърждават възможността за получаване на измервания чрез безконтактни методи с необходимата точност.

Проведено е задълбочено и систематично изследване на факторите и тяхното влияние върху точността на фотограметричното измерване като предпоставка за внедряването му в областта машиностроенето за размери до 500mm, като е изведена зависимост за получаване на коефициент на трансформация, отчитащ както геометричните зависимости при фотографското заснемане, така и факторите разстояние от заснемания обект до снимачната техника и промяната на фокусното разстояние.

Изведени са методики за оценяване на грешката и неопределеността при фотограметричните измервания, както и за валидиране на процеса.

4. Приложимост и полезност

Изследваният метод за фотограметрично измерване чрез използване на сравнително евтина екипировка при осигуряване на необходимата точност може да намери приложение в машиностроителната метрология като осигури висока производителност, която се постига благодарение на това, че не се измерват физическите обекти, а техните изображения, което е важна предпоставка за автоматизиране на процеса на измерване и последващите изчисления; обективност и достоверност на информацията, възможност при необходимост за повторение на измерванията; възможност за бързо получаване на информация за състоянието както за целия обект, така и за отделни негови елементи.

Доказана е приложимостта на метода за измерване на малки размери (под 2mm), за които при използване на контактни методи на измерване се създават определени затруднения.

Предложените методики за оценяване на грешката и неопределеността на метода, както и за неговото валидиране имат практическа приложимост и могат да се използват в следващи експериментални изследвания чрез безконтактни измервания, отчитайки спецификата на използваната екипировка.

Изведената зависимост за коефициента на трансформация дава възможност при заснемане в диапазона на изследваните разстояния от обекта до снимачната техника и фокусни разстояния, при условия, сходни с условията на проведените експерименти, да се определя стойността му, което дава възможност за бързо определяне на действителните размери на обектите при осигуряване на необходимата точност.

5. Апробация

Резултати, получени при разработването на дисертацията са докладвани и обсъждани на: Международна научна конференция "Техника, технологии,

образование" ICTTE 2013, 30-31 октомври 2013; VIII Международной научно-практической конференции «Теоретические и практические аспекты развития современной науки», г. Москва, 29 июня 2013 г.; Международната научна конференция „Техника, технологии, образование“ ICTTE 2014, 30-31 октомври 2014г.; Научна конференция „70 години традиции и иновации“, Русенски университет "Ангел Кънчев", Съюз на учените - Русе, 09-10.10.2015 г. и XXIV МНК „Мениджмънт и качество“ за млади учени, ФТТ-Ямбол, ССКБ, 15-16.10.2015г.

6. Публикации (брой и класификация)

Резултати по дисертационния труд са отразени в пет публикации. Три от публикациите са отпечатани в Сборник научни трудове на Русенски университет “Ангел Кънчев” – гр. Русе, една в списанието на Факултет „Техника и технологии“ – Ямбол – ARTTE. Една от публикациите е на руски език и една на английски.

7. Обем и структура на дисертацията

Дисертационният труд е отразен в обем от 163 страници с 86 фигури и 47 таблици, от които 8 стр. литература, като в приложение от 41 страници са представени таблици и графики от различните глави. Цитираните литературни източници са 131, от които 40 на кирилица и 82 на латиница, 9 уеб сайта. Съдържанието на дисертацията е структурирано в пет глави с изводи към всяка глава и са заявени 6 научно-приложни и 8 приложни приноси.

СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА. 1. ЛИТЕРАТУРЕН ОБЗОР

В литературния обзор е направен преглед на областите на приложение на фотограметрията, предимствата и недостатъците на метода, както и неговата същност с цел да се изведат съществените фактори, които влияят върху възможността фотограметрията да се използва като метод за точно измерване на геометрични размери на машиностроителни детайли. Тези фактори се обуславят от спецификата на избрания метод за получаване на дигитална информация и използваната техника за заснемане, от процесите при калибриране на метода и отчитането на резултатите от снимковия материал, от формата, размерите и вида на повърхнината на детайла и др.

На база направеното обзорно проучване са формулирани следните **изводи**:

• Фотограметрията намира широко приложение в редица области като картографията, геодезията, архитектурата, строителството, космическите изследвания, медицината, военното дело, автомобилостроенето и др., като в резултат на бурното развитие на компютърната техника – софтуер и хардуер, придобива все по-голямо значение.

• • Съществуват множество специализирани и универсални софтуери за математическа обработка на фотографската информация и получаване на пространствени модели на обекти, позволяващи измерване на формите и размерите им, но изборът на най-подходящ за конкретния случай зависи от изискванията за точност и разходите за ресурсна осигуреност.

• Прилагането на фотограметрични и стереофотограметрични методи за технически измервания е ограничено, тъй като за постигане на изискващата се по-висока точност е необходима скъпоструваща техника, работеща при специални условия за съхранение и използване на специализирана екипировка.
• Използването на фотограметричните методи в областта на близкообхватната фотография за определяне формата и размерите на машиностроителните детайли би довело до спестяване на средства, време и труд, особено при високото качество на съвременната фотографска техника, която е в състояние да осигури необходимата точност на резултатите.
• При използването на фотографията за получаване на първична геометрична информация за машиностроителните детайли е необходимо спазването на редица външни условия за получаване на качествени фотографии, но най-голям интерес представляват условията (факторите), които операторът може да промени непосредствено преди или в хода на заснемане, т.е. определят режима на фотографиране: разстоянието от обекта до снимачната техника, размерите и разположението на калибриращия (еталонния) елемент, фокусното разстояние.
• В достъпната литература, посочена в края на дисертационния труд, не е намерена информация за систематично изследване на променливите (режимните) фактори върху качеството и точността на заснеманите обекти, което е съществена причина фотограметричните методи да не намират значимо приложение за измерване в машиностроителното производство.
• Широкото използване на фотограметричните методи в редица области на научното познание и в практиката е сериозен атестат за тяхната полезност и рационалност и е основателен мотив да се работи за внедряването им при реконструиране (ре-инженеринг), моделиране и измерване на машиностроителни детайли, особено при специфични размери и форми.
• Създаването на условия за въвеждането на фотограметрията като средство за получаване на достоверна геометрична информация за машиностроителните изделия би довело до скъсяване на процесите на конструиране чрез прилагане на бързото прототипиране.

ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА ФАКТОРИТЕ, ОКАЗВАЩИ ВЛИЯНИЕ ВЪРХУ ТОЧНОСТТА ПРИ ФОТОГРАМЕТРИЧНО ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ГЕОМЕТРИЧНИ РАЗМЕРИ

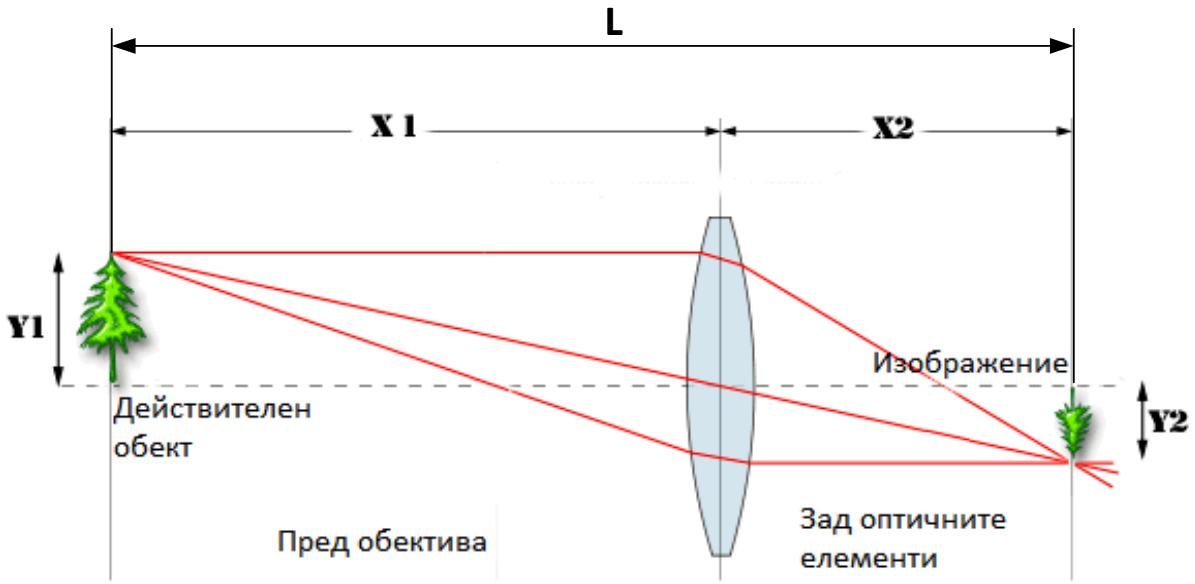
2.1. Теоретични основи на изследването

Съгласно принципите на фотографията, полученото върху светлочувствителния елемент изображение има височина Y2 (фиг.2.1), която е в зависимост от височината на реалния обект Y1, разстоянието от обекта до лещите X1 и от лещите до матрицата, върху която се проектира изображението X2. Между тях съществува зависимост, удовлетворяваща равенството:

$$X1/Y1 = X2/Y2 \qquad (2.1)$$

Математическата връзка между изображението и действителния обект се изразява чрез коефициента на трансформация, който представлява отношението между геометричните размери на изображението върху матрицата и действителните размери на обекта. От това определение и схемата на фиг.2.1 следва, че:

$$К_т = Y2/ Y1. \qquad (2.2)$$



Фиг.2.1. Принципна схема за преобразуване на заснемания обект от оптичните елементи при фотографиране

От формула (2.1) коефициентът на трансформация може да се дефинира и чрез разстоянията X1 и X2 (фиг.2.1):

$$К_т = X2/ X1. \qquad (2.3)$$

Разстоянието X2 е определено от конструкцията на използваната снимачна техника (фотоапарат) и представлява т.нар. фокусно разстояние f, а определянето на височината на полученото изображение Y2 е възможно чрез използване на подходящ софтуер за обработване на получения дигитален образ.

Освен математическата връзка, върху стойността на Кт влияят и други фактори, обусловени от процесите на калибриране, заснемане и отчитане от снимковия материал:

$$К_T = f(K_L, K_f, К(осв.)……Kn), \qquad (2.6)$$

където K_L, K_f, К(осв.)……Kn са корекционните коефициенти от различните фактори, влияещи върху формирането на стойността на $К_T$, дефинирани в т.1.6.3 – разстоянието L, фокусно разстояние, осветеност, големина на матрицата, използван софтуер за обработване на снимките и отчитане на размерите, качество на повърхнината на заснемания обект, разделителна способност на монитора и др.

След определяне на Кт е възможно да се построи тарировъчна характеристика, по която при известно разстояние до обекта X1, да е възможно определянето на Кт, респективно размера Y1 с необходимата точност.

2.2. Етапи на фотограметричните измервания

Този процес най-общо включва три основни етапа:

- калибриране – на този етап се получава референтна стойност, по която да се определи търсената геометрична величина. За получаване на необходимата точност е желателно условията, при които се провежда калибрирането да бъдат идентични с условията, при които се извършва заснемането, като най-добри резултати се получават ако калибрирането и заснемането се извършват едновременно. Съгласно [2, 21], калибрирането е съвкупност от действия, които при определени условия установяват зависимостта между стойността на величината, показана от средството за измерване (или измервателната система) или стойностите, представени от мярка,

стандартен образец и съответните стойности, реализирани от еталоните. За целта на провежданото изследване калибрирането представлява точно определяне на връзката между предварително известен размер на избран еталон и дигиталния му образ. В качеството на еталон обикновено се използва плоско-паралелна краищна мярка (ППКМ). Извършва се заснемане, след което се измерва фиксираният й размер върху снимката чрез използване на подходящ за целта софтуер, следва определяне съотношението между действителния размер на еталона и размера от снимката, т.е. коефициента на трансформация. Прецизното определяне на този коефициент е важна предпоставка за точното определяне на размерите на заснеманите обекти;

- заснемане – на този етап се получава дигитален образ на обекта, чиито геометрични размери е необходимо да бъдат определени. Основните точностни характеристики тук зависят от качеството на снимачната техника (оптика, фокусно разстояние) и условията, при които се извършва заснемането;

- отчитане на стойността при измерване – извършва се обработване на геометричната информация, така че да се получи стойностно определяне на съответния размер на обекта. Обикновено се използва софтуер, който може да бъде специализиран или с общо предназначение.

Когато целта на работата е измерване по единична снимка, целесъобразно е калибрирането и заснемането да се извършват едновременно, при което е необходимо да бъде изпълнено изискването калибърът и детайлът, подлежащ на измерване, да лежат в една равнина спрямо направлението на заснемане. В този случай коефициентът на трансформация се определя директно от уравнение (2.2).

Ако е необходимо измерване на няколко размера по повече от една снимки е необходимо първо да се извърши калибриране, след което при същите (или възможно най-близки) условия да се проведе заснемането на детайлите. При това е затруднено осигуряването на изискването детайлът и калибърът да лежат в една равнина, което ще рефлектира върху точността, с която се определя коефициентът на трансформация. Необходимо е да се проведе изследване, което да реши този проблем.

2.3. Експериментални образци

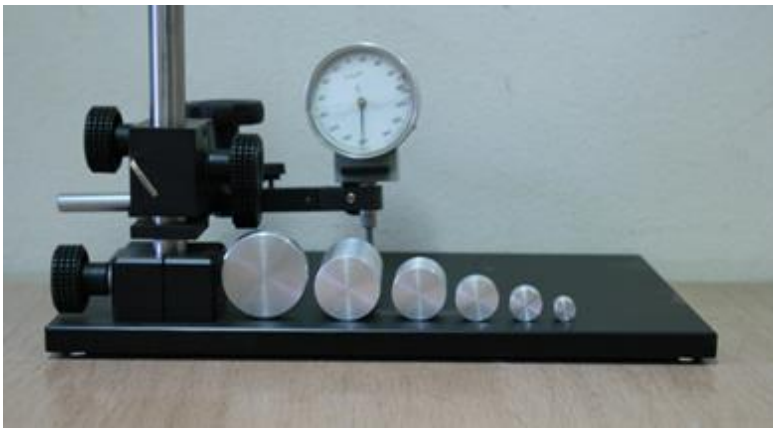
2.3.1. Калибриращи елементи

В качеството на калибриращи елементи (еталони) се използват плоско-паралелни краищни мерки за дължина на фирмата „Mitutoyo“ (фиг.2.2), чиито точностни характеристики, съгласно сертификатите на фирмата, са посочени в табл.2.1.

2.3.2. Обекти на измерване

В качеството на измервани обекти (опитни образци) са изработени цилиндрични детайли с височина 10 mm и номинални размери: ø10mm, ø15mm, ø20mm, ø25mm, ø30mm и ø40mm (фиг.2.3). За определяне на действителните им диаметрални размери е проведено измерване чрез контактни методи.

Извършено е първоначално измерване на диаметрите на цилиндричните повърхнини посредством микрометри с обхвати 0-25mm и 25-50mm с точност на отчитане 0,01 mm. Всеки микрометър е калибриран двукратно: микрометърът с обхват 0-25mm е калибриран на нула и с ППКМ 10mm, а микрометърът с обхват 25-



Фиг.2.3. Опитни образци

50mm е калибриран с ППКМ 25mm и ППКМ 30mm. Измерванията са правени в три напречни сечения. Получените резултати са приведени в табл.2.2.

Видно е, че при използване на микрометъра с обхват 0-25mm не се получават разлики в измерванията при двете калибрирания, докато за микрометъра с обхват 25-50mm се наблюдават малки разлики в отчетените стойности.

На следващия етап са измерени отклоненията на същите размери с помощта на установката, показана на фиг. 2.4. Тя се състои от трасажна маса и стойка за установяване на измервателна глава с ход на чувствителния елемент 0,3mm и стойност на едно деление 2μm. Върху трасажната маса се поставят последователно ППКМ с размери, равни на номиналните размери на измерваните детайли: ППКМ10 mm, ППКМ15 mm, ППКМ20 mm, ППКМ25 mm, ППКМ30 mm и ППКМ40 mm за настройване на нула на измервателната глава, след което всеки детайл е измерван отново в три сечения. Получените отклонения са приведени в таблица 2.3.

Извършена е проверка за отклонение от формата в надлъжно сечение (отклонение от цилиндричност) на детайлите с установка, съдържаща маса, върху която са поставени призма за установяване на детайлите и магнитна стойка за монтиране на измервателната глава (фиг. 2.5).

Табл.2.3. Резултати от контактно измерване с измервателна глава

Измервани обекти		**Измерени отклонения**	$\bar{X}$
Детайл 1, номинален размер 10mm	сечение I	+0.154	**10.155**
	сечение II	+0.154	
	сечение III	+0.156	
Детайл 2, номинален размер 15mm	сечение I	+0.140	**15,139**
	сечение II	+0.140	
	сечение III	+0.136	
Детайл 3, номинален размер 20mm	сечение I	-0.023	**19.978**
	сечение II	-0.020	
	сечение III	-0.012	
Детайл 4, номинален размер 25mm	сечение I	+0.010	**25.020**
	сечение II	+0.020	
	сечение III	+0.030	
Детайл 5, номинален размер 30mm	сечение I	+0.044	**30.044**
	сечение II	+0.040	
	сечение III	+0.048	
Детайл 6, номинален размер 40mm	сечение I	-0.060	**39.939**
	сечение II	-0.064	
	сечение III	-0.060	

Табл.2.4. Резултати от измерване на отклонение от цилиндричност

Измервани обекти	Отклонение от цилиндричност, mm
Детайл 1	**0.008**
Детайл 2	**0.010**
Детайл 3	**0.012**
Детайл 4	**0.014**
Детайл 5	**0.020**
Детайл 6	**0.004**

Измерваните детайли се поставят в призмата, занулява се скалата на измервателната глава, след което, чрез завъртане на ръка, се установява най-голямото отклонение. Измерването се извършва в няколко надлъжни и напречни сечения. Усреднените резултати са приведени в табл.2.4.

2.4. Експериментално оборудване за реализиране на безконтактните измервания

За заснемане на образците се използват:

- цифров фотоапарат Canon, модел EOS Rebel XTi / 400D, с матрица Canon APS-C (22,2/14,8mm), тип CMOS, обектив Canon EF50mm 1:1.8 с резолюция 10,1Mpx (3888/2592px) [46, 47];
- цифров фотоапарат FUJIFILM, модел FinePix S9500, с матрица – SONY Super CCD VHR (9,2 Mpx), с размер 1/1,6” (6,01/8,08mm)
- трикоординатна машина „ABERLINK”;
- Универсален микроскоп модел „Carl Zeiss Jena - 3296.

Фиг.2.6. Установка за експериментални заснемания на калибри и детайли

Установката чрез която се извършват заснеманията притежава стойка (фиг.2.6), на която се установяват фотоапаратите чрез подходящо приспособление. Тя осигурява възможност за вертикално преместване в диапазон от 0 mm до 600mm. На масата се установяват измерваните детайли. Височината на изместване се измерва чрез високомер с точност 0,02mm.

За отчитане и обработване на данните от снимките са използвани:

- лаптоп Lenovo B5400;
- лаптоп „HP 6830S” с резолюция 1440x900px;
- CRT – RGB монитор “Samsung – SyncMaster 795DF” с резолюция – 1024x768px, при което една RGB точка има приблизителен размер 0,2mm.

- софтуерна програма „Visio 2010“. Избрана е тази програма защото е включена в

пакета на „Microsoft Office 2010“, за която университетите разполагат с академичен лиценз и поради възможността за отчитане в различни мерни единици;

- „PhotoM – 1.21“- Предназначена е за измервания чрез микроскопи и стендове при твърдо установени и известни разстояния до матрицата на фотоапарата; използва се основно в биологията и свързаните науки; необходимо е предварително калибриране на всеки от сменяемите обективи;
- „Photoshop CS5“ - професионална комерсиална програма за обработка на растерна графика от американската софтуерна компания Adobe Systems.

Получените резултати са обработвани чрез математическия апарат на “Microsoft Excel 2010” за еднофакторните експерименти и “Statistica 13” на фирмата „StatSoft“, която отскоро е част от „Dell Software“ – за многофакторните експерименти. Всички отчитания са извършвани при еднакво увеличение на изображенията – 100%.

Изводи към глава 2:

1. Въведен е коефициент на трансформация – K_T, даващ връзката между разстоянията между обекта, изображението и оптичните лещи на обектива.
2. Дефинирани са факторите, които влияят върху коефициента на трансформация.
3. Дефинирани са основните етапи за реализиране на фотограметричния метод.
4. Представени са метрологичните характеристики на оборудването, използвано в изследването.
5. Представени са методиките за статистическа обработка на опитните резултати.
6. Представена е методика за изследване на неопределеността на метода.
7. Изведени са теоретични зависимости за пресмятане на грешката на метода.
8. Положени са основите на методиката за валидиране на метода.

ГЛАВА 3. ИЗСЛЕДВАНЕ НА ФАКТОРИТЕ, ВЛИЯЕЩИ ВЪРХУ ТОЧНОСТТА ПРИ КАЛИБРИРАНЕ, ЗАСНЕМАНЕ И ИЗМЕРВАНЕ

Както беше изяснено в литературния обзор основно изискване при осъществяване на фотограметрично измерване е калибърът и измерваният детайл да лежат в една равнина спрямо снимачната техника, т.е. разстоянието L (фиг.2.1) да е еднакво. Това е лесно осъществимо когато се извършва единично измерване (от една снимка). Когато е необходимо да се проведе измерване по няколко снимки, както например това се случва при създаването на тримерни дигитални модели за ре-инженеринга, етапите калибриране и заснемане се извършват последователно. Осигуряването на еднакво разстояние L е затруднено. Същите разсъждения важат и за фокусното разстояние f, при което се извършва заснемането на калибрите и детайлите.

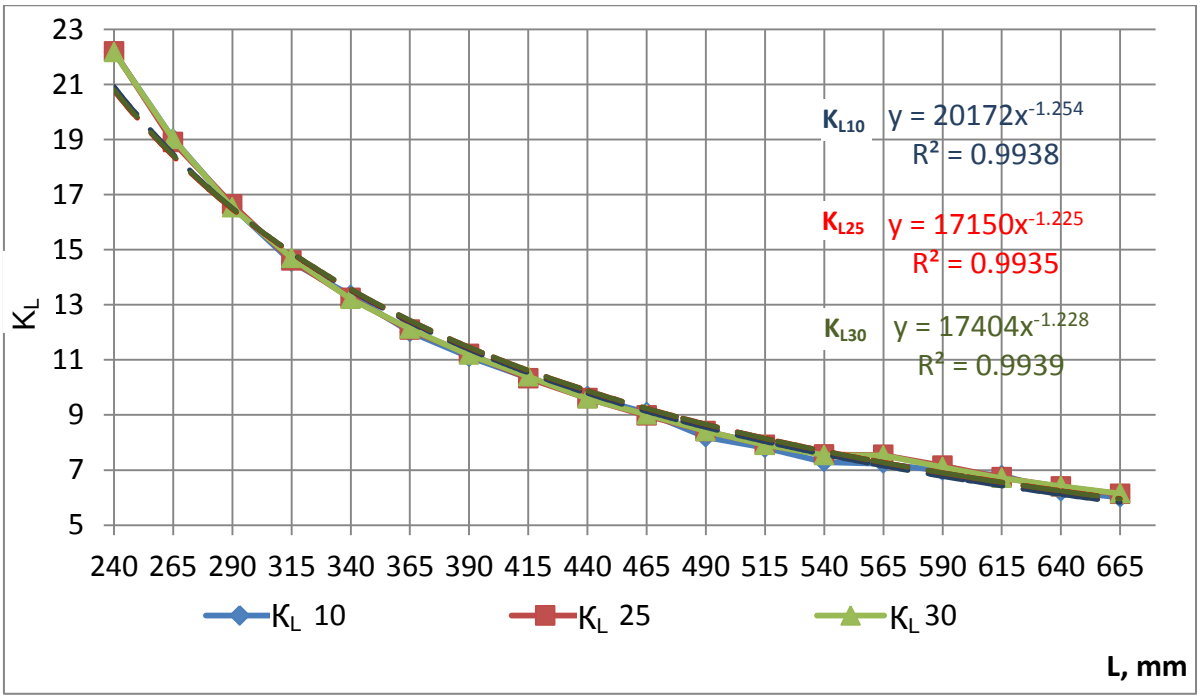
3.1. Изследване влиянието на разстоянието на заснеманите обекти до матрицата на фотоапарата – L

Изследването е направено с помощта на установката, показана на фиг.2.6. Като снимачна техника е използван описаният по-горе фотоапарат Canon със стандартен обектив. Поддържано е постоянно фокусно разстояние f=18mm и постоянни условия на околната среда – температура и осветеност. Заснети са плоско паралелни краищни мерки ППКМ 10, ППКМ 25 и ППКМ 30 при разстояния от L=240mm до L=665mm през 25mm.

Снимките са обработени във “Microsoft Visio 2010“, а пресмятанията и графичната интерпретация на резултатите са извършени в “Microsoft Excel 2010“.

За всяко разстояние обектите са заснемани по три пъти, след което получените стойности в пиксели от измерванията са усреднени и представени в табл.3.1. По формула (2.2) са пресметнати коефициентите на трансформация за всяка ППКМ за изследваните разстояния (K_{L10}, K_{L25}, K_{L30}).

На фиг.3.1 са показани зависимостите между измерените размери в пиксели и разстоянията от матрицата на снимачната техника до заснемания обект. На фиг.3.2 са представени получените модели за определяне на коефициента на трансформация, отчитащ разстоянието от обекта до матрицата на фотоапарата K_L (2.6) в зависимост от размера на заснемания обект и разстоянието L. Построени са линиите на тенденция, които описват най-близкото теоретично разпределение на експерименталните данни. Установено е, че най-точно експерименталните данни се описват със зависимост от вида $y = a_1.x^{a_2}$. Получените коефициенти на детерминация R_2 за всеки модел са по-големи от 0,99 (фиг.3.2).



Фиг.3.2. Зависимост на K_L от разстоянието L до матрицата на фотоапарата

Като заключение от проведеното изследване могат да се формулират следните констатации:

- върху стойността на коефициента на трансформация K_T значимо влияе коефициентът, отчитащ разстоянието от обекта до матрицата на фотоапарата K_L;
- зависимостта има характер на степенна функция, което достоверно се доказва от високите стойности на коефициента на детерминация;
- размерите на заснеманите обекти влияят върху получаваната стойност на коефициента K_L, което се доказва от различните коефициенти и степенни показатели в получените уравнения;
- установено е, че различните разположения на заснеманите обекти оказват влияние върху получаваните стойности при измерване, но установяването му изисква допълнително изследване;

- избраното фокусно разстояние f=18mm, което е най-малкото за използвания обектив, дава минимално запълване на матрицата със графична информация за изследвания обект и грешката при отчитане на размера е голяма, тъй като тя се описва с по-малък брой пиксели;
- при практическото валидиране на получените уравнения се установи получаването на сравнително голяма и неравномерна в изследвания диапазон грешка, която показва наличието и на други смущаващи фактори;
- получаваната грешка е по-голяма в краищата на изследвания диапазон от разстояния между заснемания обект и матрицата на снимачната техника и намалява към средата му, което предполага провеждане на следващ експеримент в по-тесен диапазон;
- задължително е при заснемане да се изключва автоматичното фокусиране на фотоапарата, защото се получават различни измерени стойности, което е предпоставка за задължително контролиране на този фактор.

3.2. Изследване влиянието на разположението на обектите спрямо матрицата на фотоапарата

Върху установката (фиг.2.6) е проведен експеримент, при който са заснети плоско-паралелните краищни мерки, използвани в предходното изследване, като е отчетено и разположението им при заснемане спрямо матрицата на фотоапарата. Заснеманията са извършени с описания по-горе фотоапарат Canon EOS със стандартния обектив. Поддържано е по-голямо фокусно разстояние (f=24mm), за постигане на по-голямо запълване на матрицата от предходния експеримент и постоянни условия на околната среда. Калибрите (същите като в предходните опити) са заснети в две различни положения спрямо матрицата на фотоапарата: I (X) – хоризонтално положение и II (B) – вертикално положение.

Получените, след обработка в средата на „Visio 2010“, резултати са закръглени до третия знак и са приведени в таблица 3.2. Закръглението е изпълнено само за таблиците, приведени в текста, а пресмятанията на зависимостите са извършвани с пълните числови стойности.

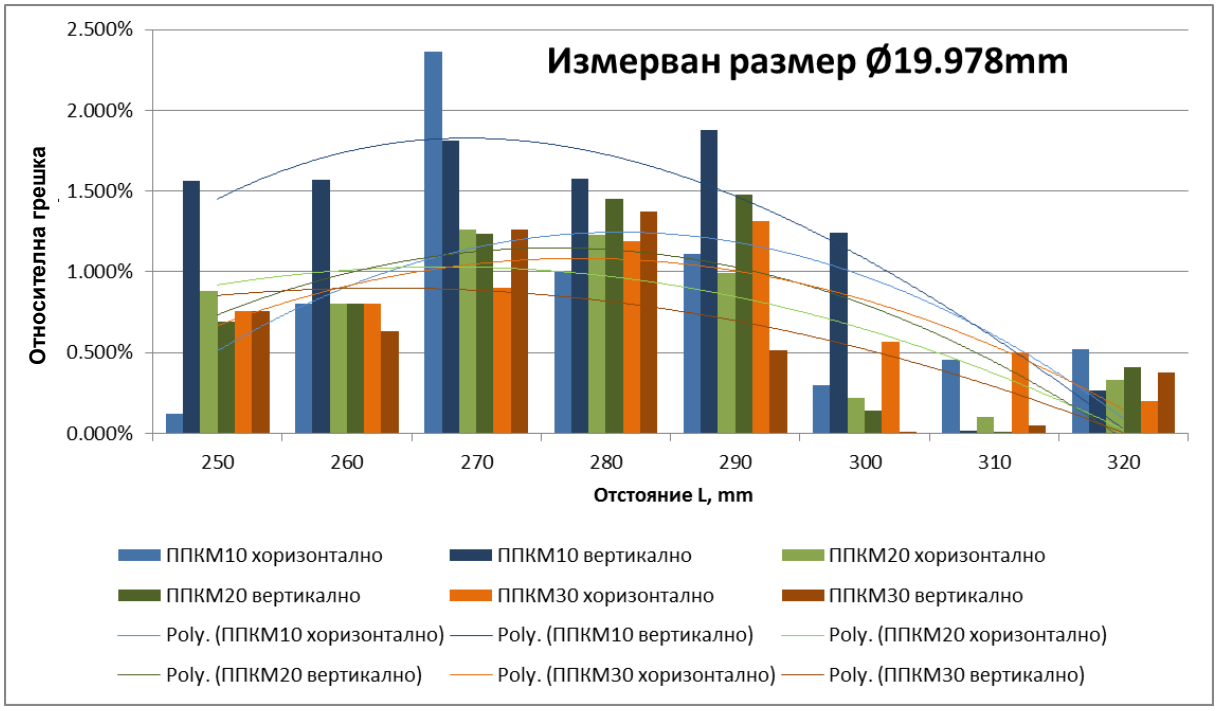
В сравнение с предходния експеримент е стеснен диапазонът на изследваните разстояния, при които са заснети обектите - от 250 до 320 mm, при което се очаква получаване на по-конкретна информация за вида на разпределение на наблюдаваните явления и намаляване на получаваната грешка в краищата на диапазона. Измерванията са контролирани през по-малък диапазон (10 mm), с което се цели по-точно определяне на съществуващата зависимост.

За валидиране на получените резултати, при същите условия, са заснети няколко детайла. В качеството на измервани обекти са използвани цилиндричните детайли с референтни диаметри Ø19,978mm, Ø25,02mm, Ø30,044mm и Ø39,939mm.

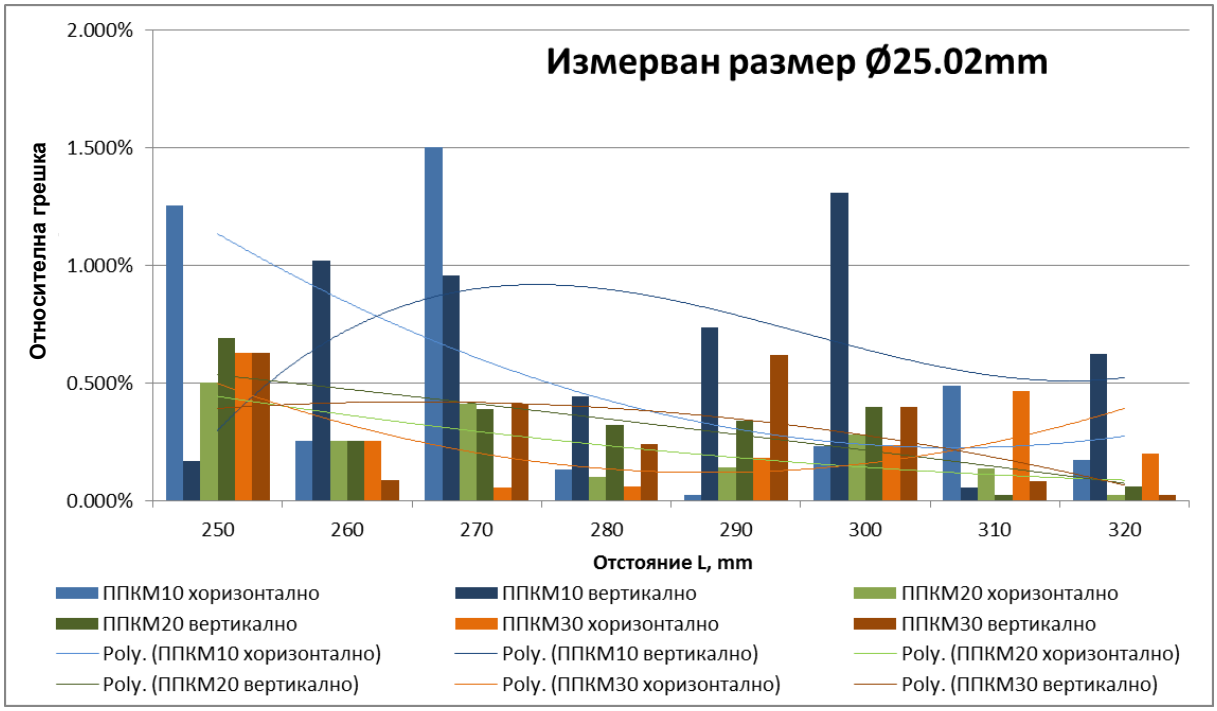
От снимките се отчитат диаметралните им размери в пиксели, които се коригират с получените стойности за K_L (табл.3.2) при хоризонтално и вертикално положение за съответната ППКМ. По формула (2.4) са пресметнати контролираните размери в милиметри. След това получените резултати се сравняват с референтните им стойности, получени чрез контактните измервания (табл.3.3) и се оценява получаваната грешка.

Диаметралните размери на избраните за този експеримент детайли се измерват в три сечения, разположени през 60°.

На фиг.3.3 са представени графично резултатите за зависимостта на получаваната грешка при отчитане разстоянието от заснеманите обекти до матрицата на фотоапарата и разположението на обектите спрямо матрицата за всеки измерван детайл (табл.3.3). Дадени са и линиите на тенденция на разпределението на грешката при изчисляване на размерите при използване за калибриране различните ППКМ.

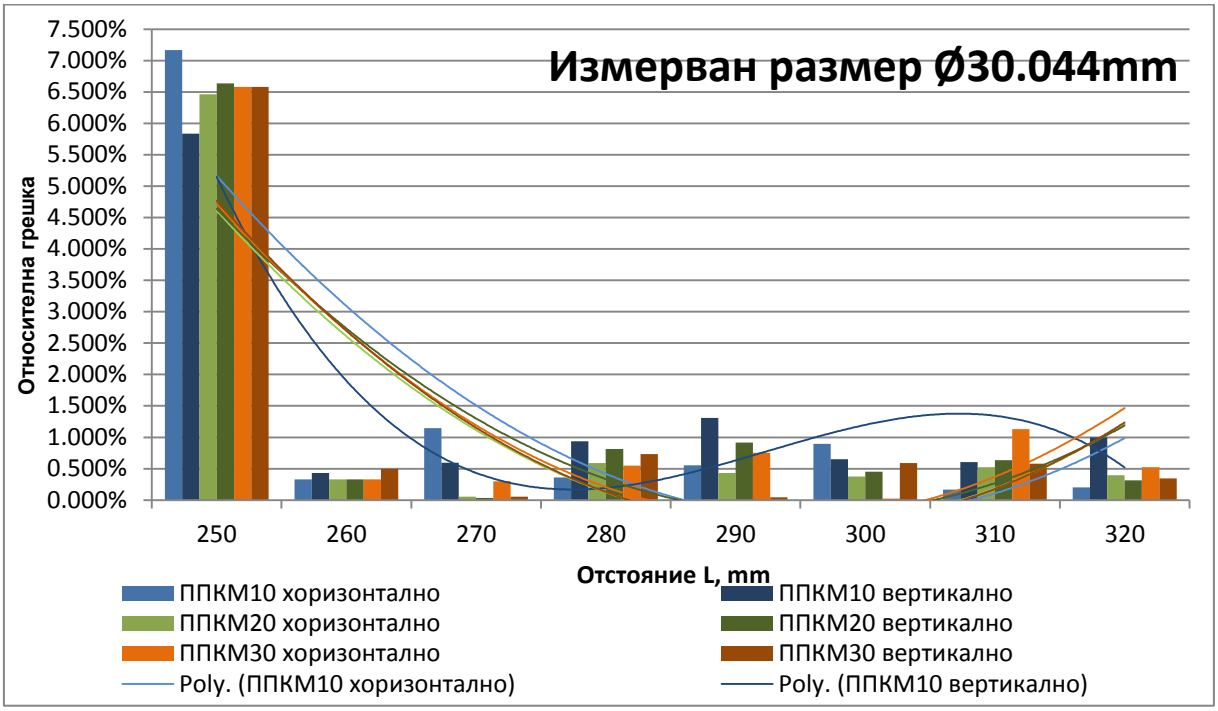


а)

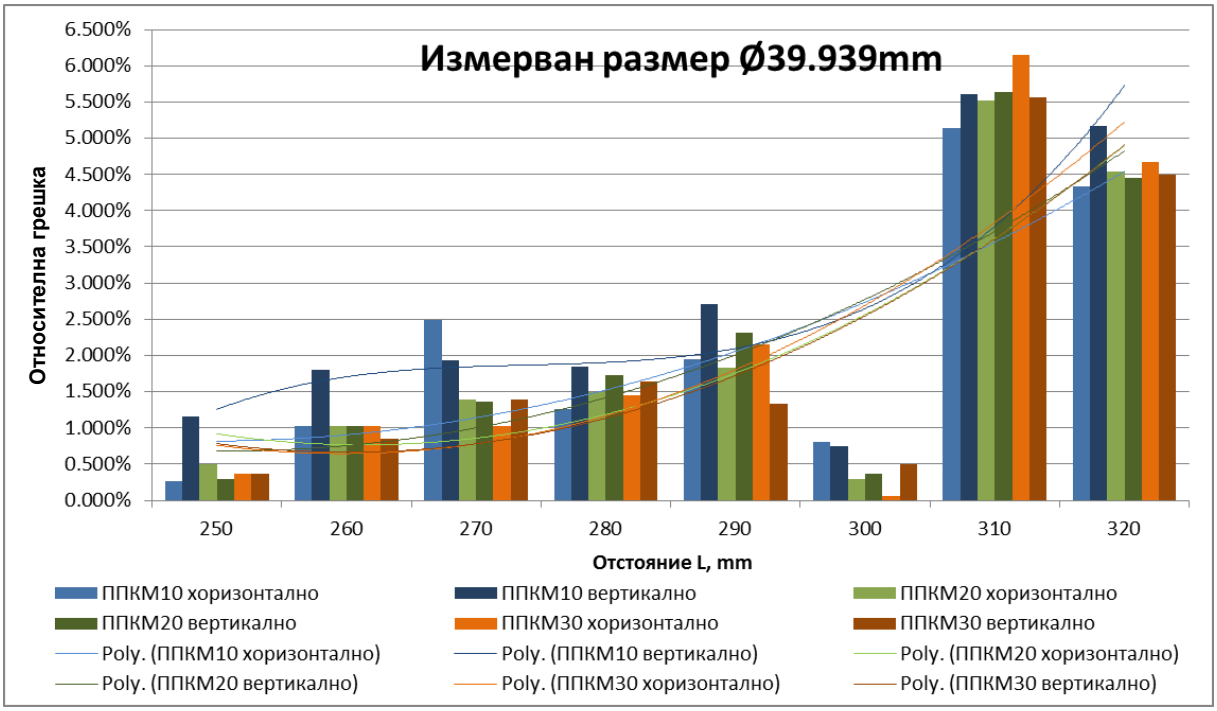


б)

Фиг.3.3. Зависимост на получаваната грешка от разположението на калибъра спрямо матрицата на фотоапарата и разстоянието му от обекта на заснемане - детайли с различни размери



в)

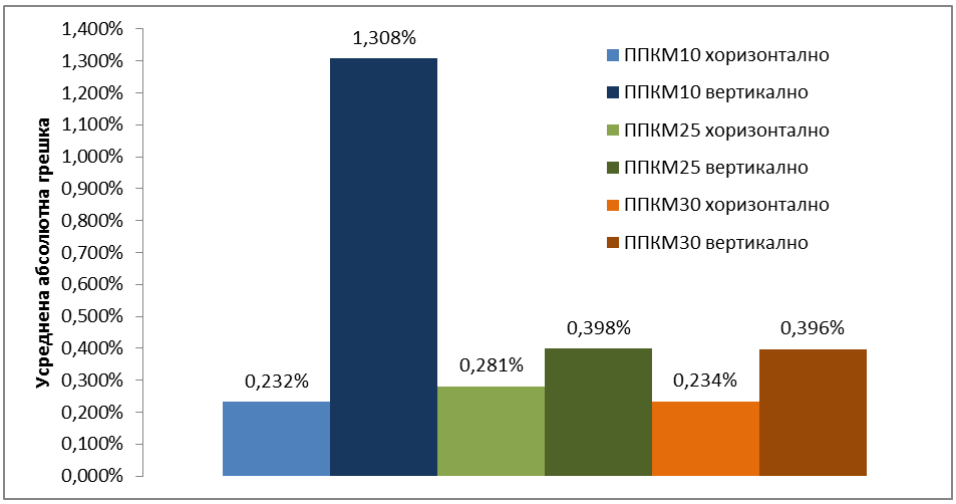


г)

Фиг.3.3. Зависимост на получаваната грешка от разположението на калибъра спрямо матрицата на фотоапарата и разстоянието му от обекта на заснемане - детайли с различни размери

По отношение на влиянието на разположението на калибъра спрямо матрицата при определяне на K_L, обобщената информация е представена на фиг.3.4. Като цяло, с изключение на резултатите при вертикално разположение на ППКМ10, получената грешка не надхвърля 0,4%. Установено е, че най-големи грешки се получават при вертикално разположение на използваната като калибър ППКМ10 (фиг.3.4).

Това се дължи на относително малкия му размер спрямо избраното разстояние за заснемане, при което се запълва по-малка площ от матрицата и стойността на размера му се изразява в по-малък брой пиксели. Тогава евентуална грешка при отчитане би имала по-съществено влияние. Това влияние би могло да се ограничи като се намали изследваното минимално разстояние на обектите до матрицата на снимачната техника Lmin до подходяща стойност за получаване на изображение с ясни контури.



Фиг.3.4. Зависимост на получаваната грешка от разположението на калибъра спрямо матрицата на фотоапарата

В резултат на проведеното изследване бяха формулирани следните заключения:

- може да се твърди, че съществува корелационна връзка между размерите на калибъра, разстоянието от обекта до матрицата на снимачната техника, положението на обекта спрямо матрицата и получаваната точност на измервания размер;
- изследваният диапазон от разстояния не е с достатъчен обхват за да се установят прецизно тенденциите в промените на изследваните фактори и е необходимо да се проведе следващ експеримент при по-разширен диапазон;
- независимо от големината на използваната ППКМ в качеството си на калибър, грешката в получавания размер е по-малка когато тя е разположена хоризонтално спрямо матрицата на фотоапарата, което се дължи на нееднаквия брой пиксели в двете направления на матрицата.
- изключвайки голямата стойност на грешката при ППКМ10 - вертикално разположение, при останалите случаи разликата между грешките в двете положения е средно 0,14%. Необходимо е да се проведе допълнително изследване за определяне възможността за пренебрегване влиянието на този фактор.

3.3. Изследване на влиянието на разположението на обекта спрямо матрицата и размерите на обекта върху коефициента K_L

В резултат от анализа на резултатите от предходния експеримент е извършен следващ, при разширен диапазон на разстоянието L - между 210 mm и 340mm през стъпка 10mm и точно контролиране разположението на обекта спрямо матрицата.

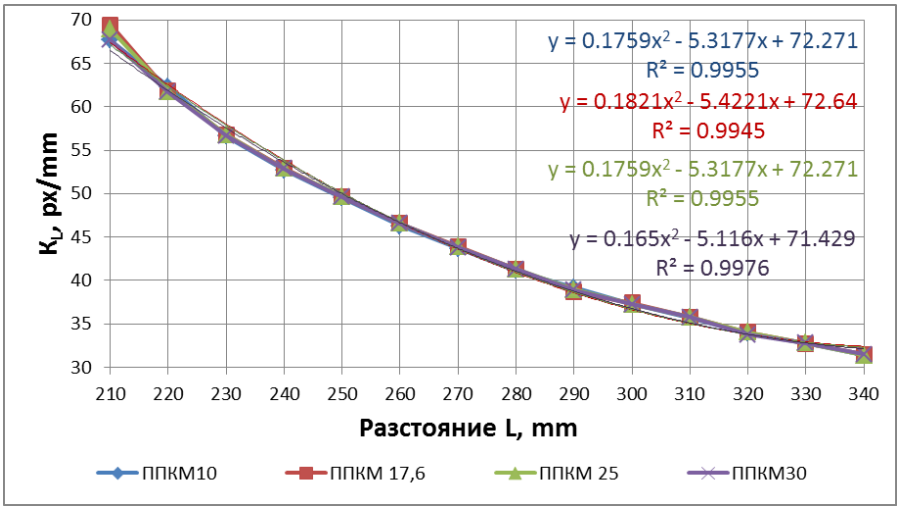
Използвана е екипировката, описана в т.3.1 при поддържане на постоянно фокусно разстояние f=55mm (максималното за използвания обектив) и постоянни

условия на околната среда. Заснети са ППКМ10; ППКМ17,6; ППКМ25 и ППКМ30. От изследваните размери отпадна ППКМ40, тъй като минималното разстояние е много близо до обекта, при което образът запълва цялата матрица и не може са измерят контролираните размери. В този експеримент е включена и ППКМ 17,6, при което обхватът от изследваните размери калибри става по-равномерен.

Всяка мярка е заснета в две положения спрямо матрицата на фотоапарата – хоризонтално и вертикално. Всяка снимка е обработена във „Microsoft Visio 2010“ и върху нея са извършени по 40 измервания на контролния размер. Резултатите са дадени в табл.3.4.а за хоризонтално и табл.3.4.б - вертикално.

На фиг.3.7 са представени резултатите за усреднения коефициент K_L, отчитащ влиянието на разстоянието L, изчислен за всяка плоско-паралелна краищна мярка при хоризонталното й разположение спрямо матрицата на снимачната техника. Чрез използване на “Microsoft Excel 2010”, по метода на най-малките квадрати, са изведени уравненията на получените зависимости, които описват опитните резултати и са посочени коефициентите на регресия, които показват много силна зависимост между изследваните фактори (R^2>0,99). Оценявани са чрез визуално сравняване на модели на линейно, степенно, логаритмично и експоненциално разпределение и е установено, че най-голямо приближение се получава при квадратната функция.

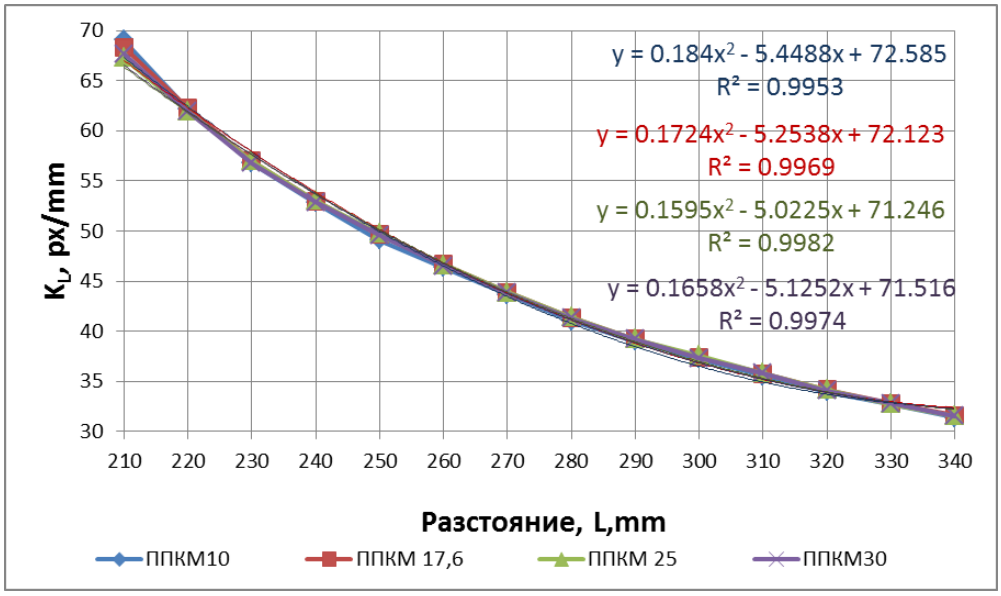
Същата информация за вертикално разположение на ППКМ спрямо матрицата на фотоапарата е представена на фиг.3.8. С голяма достоверност може да се твърди, че връзката между изследваните фактори се описва с квадратна функция.



Фиг.3.7. Зависимост на коефициента K_L от разстоянието между обекта и матрицата при хоризонтално разположение на калибрите спрямо матрицата на фотоапарата

От получените резултати може да се направят следните заключения:

- получените коефициенти на регресия за всички уравнения имат стойности над 0,99, което показва много силна корелационна зависимост;
- в разширения обхват на разстоянието L зависимостите за различните ППКМ имат еднакъв характер и са сходими;



Фиг.3.8. Зависимост на коефициента K_L от разстоянието между обекта и матрицата при вертикално разположение на калибрите спрямо матрицата на фотоапарата

- установено е, че моделът, който най-близко описва експерименталните данни е степенна функция от втора степен;
- зависимостта за определяне на K_L не се влияе от размерите на калибъра;
- най-точно съвпадение между експерименталните данни и теоретичния закон за разпределение се получава в средата на интервала – при разстояния между 250mm и 280mm;
- еднаквостта в тенденциите на графиките при хоризонтално и вертикално разположение на обекта спрямо матрицата на снимачната техника е още една предпоставка за изследване възможността за пренебрегване влиянието на този фактор.

Извършена е статистическа проверка за статистическа зависимост между получените данни при хоризонтално и вертикално разположение на обекта спрямо матрицата, в следствие на което е установено, че няма статистическа значима разлика. Поради това отпада отчитането на този фактор при следващите експерименти.

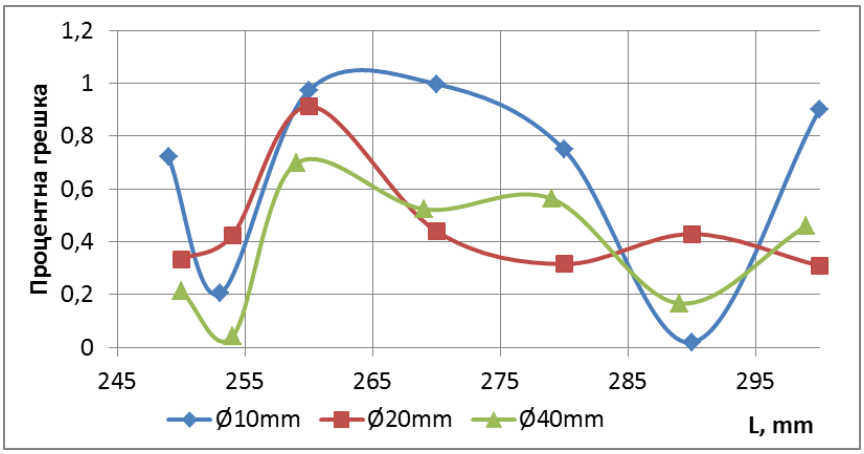
След обработка на базата данни от измерванията със статистическите програми „Microsoft Excel 2010" и "Statistica 13" са получени 11 работни модели с определени стойности за коефициентите (табл.3.11), от които след регресионен анализ е избрана комбинираната функция, като беше установено от практическа апробация, че процентната грешка се колебае в границите на 1% (фиг.3.11):

$$y = \frac{1}{(0{,}00436434.\sqrt{x} - 0{,}0486932)}. \qquad (3.8)$$

3.4. Изследване влиянието на фокусното разстояние при определяне на действителния размер

Съгласно формула (2.4), получаваният размер зависи от броя отчетени пиксели от снимката и коефициент на трансформация K_T. В т.3.3.5 този коефициент е определен при отчитане влиянието на разстояние от матрицата до обекта. При

това, фокусното разстояние е поддържано постоянно. За може да се изследва и неговото влияние формула (2.4) добива вида:



Фиг.3.11. Процентна грешка при определяне на K_L по уравнение (3.8)

$$Y_1 = \frac{Y_2}{K_L} . K_f \qquad (3.10)$$

където K_f представлява корекционният коефициент, който служи за приравняване на текущото фокусно разстояние към фокусното разстояние, за което е определен K_L в т.3.3.4 (f=55mm).

За провеждане на планирания експеримент е използвана установката, показана на фиг.2.6, фотоапарат "Canon" и стандартен обектив, с обхват на фокусните разстояния от 18 до 55mm. Заснемана е ППКМ25 при поддържане на постоянно разстояние L=270mm в обхвата на фокусните разстояния, осигурявани от обектива. Резултатите са приведени в табл.3.18. Получената зависимост има линеен характер (фиг.3.12).

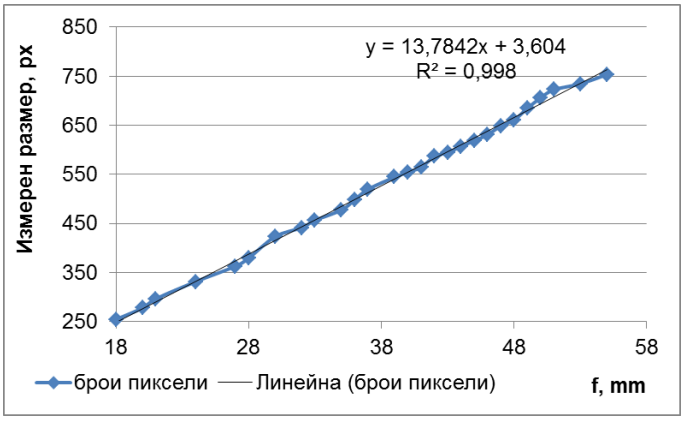
За потвърждаване работоспособността на изведеното уравнение е направена проверка, при която като обект за измерване е използван детайла, с референтен размер Ø15,139 mm. Върху установката от фиг.2.6 със същия фотоапарат, детайлът е заснеман при различни фокусни разстояния и постоянно разстояние между обекта и матрицата - L=250mm. Промяната на измерваният детайл и разстоянието L е продиктувана от това, да се получи по-голямо запълване на матрицата, респективно по-голям брой пиксели, което ще намали грешката при отчитане.

Резултатите са представени в табл.3.20. Отчетените пиксели за размера от измерването са сравнявани с изчислените чрез приетото теоретично разпределение за K_f по формула (3.11). Изчислени са грешката и процентната грешка за всяко измерване, като графично тя е представено на фиг.3.13.

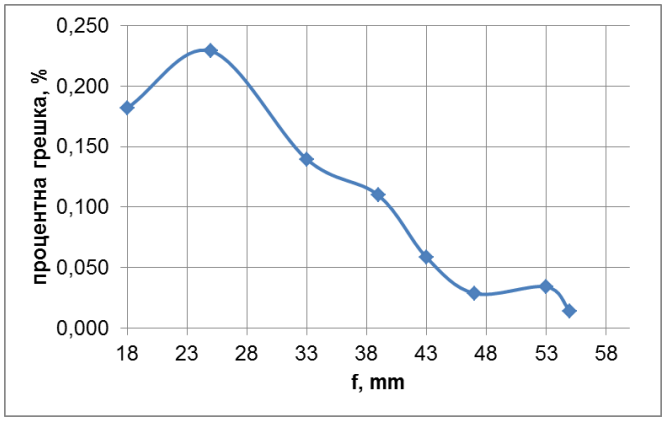
3.5. Апробиране на обобщен коефициент K_T, отчитащ влияние на всички изследвани фактори

В т.3.3.4 и т.3.4.2 са определени зависимостите за определяне на K_L и K_f и е предложена зависимост за отчитане на тяхното комплексно влияние. От формули (2.4) и (3.15) следва, че:

$$K_T = \frac{K_L}{K_f}, px/mm \qquad (3.13)$$

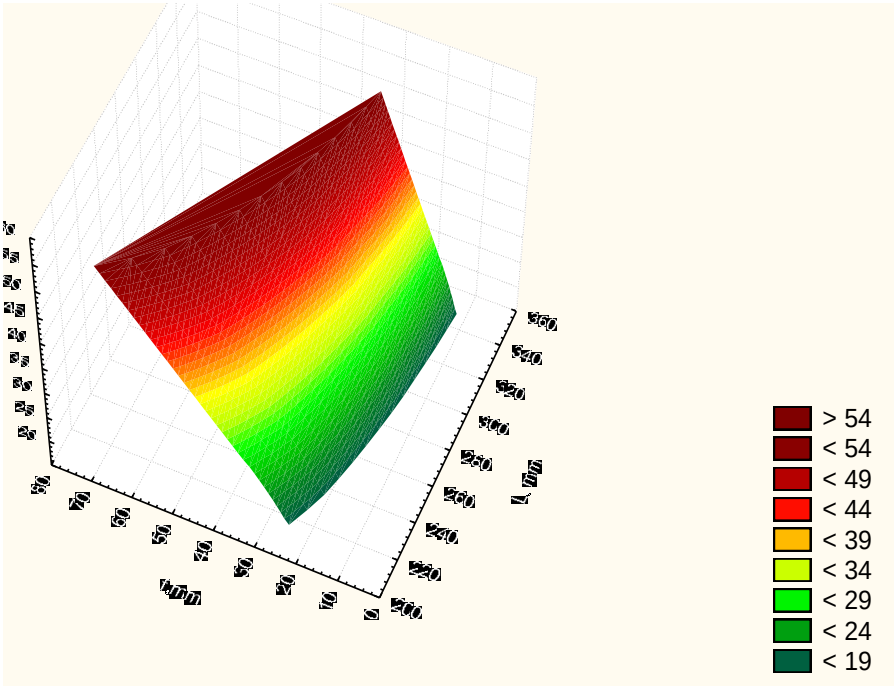


Фиг.3.12. Зависимост на отчетените размери от промяната на фокусното разстояние



Фиг.3.13. Процентна грешка между експерименталните данни и изчислените по формула (3.11)

Направена е проверка, при която като обект за измерване е използван детайл, с референтен размер Ø10,15 mm. Върху установката от фиг.2.6 със същия фотоапарат, детайлът е заснеман при произволно избрани комбинации от разстояния L и фокусни разстояния f, като резултатите са представени в табл.3.21. Коефициентите, отчитащи влиянията на изследваните фактори са изчислени по приетите уравнения, съответно: K_f - по формула (3.11) и K_L - по формула (3.8). Изчисленият размер по формула (3.10) е сравняван с референтния, при което е изчислено отклонението и получаваната грешка. В резултат е извършено изчисление по формула (3.13) за стойностите на Кт при отчитане на двата фактора – разстояние от матрицата на фотоапарата до заснемания обект и промяна на фокусното разстояние f. Резултатите са приведени в табл.3.22, а графичната интерпретация е показана на фиг.3.15.



Фиг.3.14. Зависимост на коефициента на трансформация КТ от разстоянието L и фокусното разстояние f

Изводи към глава 3:

1. 1. Точността на отчитане на размерите на заснетите обекти зависи в значителна степен от точността, с която се определя коефициентът на трансформация K_T като върху стойността му най-силно влияние оказват разстоянието L от заснемания обект до матрицата на фотоапарата и фокусното разстояние f, при което въздействието им е разнопосочно.

2. Разположението на обектите спрямо матрицата на фотоапарата не оказва съществено влияние върху точността на получавания размер.

3. Установено е, че зависимостта на коефициента на трансформация от разстоянието L между заснемания обект и матрицата на фотоапарата е степенна функция, а спрямо фокусното разстояние - линейна функция.

4. Изведената зависимост за определяне на коефициента на трансформация, в зависимост от разстоянието L между заснемания обект и матрицата на фотоапарата и фокусното разстояние f, дава възможност за определянето му, с достатъчна прецизност в изследвания интервал, позволявайки отчитането на размерите на обекта с висока точност.

ГЛАВА 4. АНАЛИЗ НА ГРЕШКИТЕ ПРИ ИЗМЕРВАНЕ ЧРЕЗ ФОТОГРАМЕТРИЧНИЯ МЕТОД И УТВЪРЖДАВАНЕ НА НЕГОВАТА РАБОТОСПОСОБНОСТ

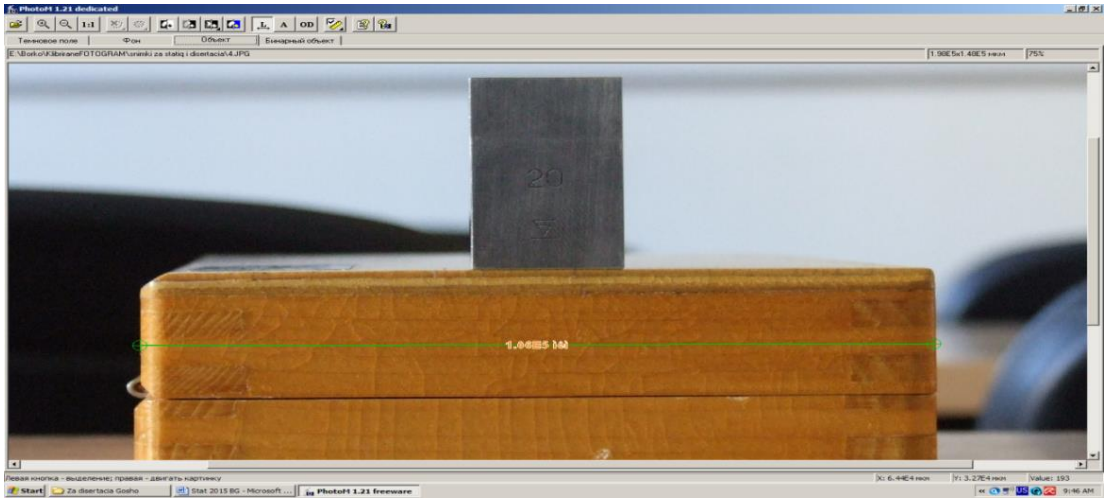
4.1. Грешки при отчитане на контролирания размер в зависимост от параметрите на измервания обект

За разкриването на ключовите фактори, влияещи на неопределеността при фотограметричните измервания е проведено експериментално изследване. Двата основни, изследвани фактора са фокусното разстояние – f и предметното разстояние – a (X1). Освен тях са въведени още два вариращи фактора – осветеността (със и без светкавица) и различните размери за калибриране с ППКМ (20, 40, 60, 80 и 100mm). Тези фактори са определени на базата на експертна оценка.

За фотографиране се използва цифров фотоапарат FUJIFILM, описан в т.2.4. Използваната резолюция за снимките е 5Mpx (2592/1944px), при което условният размер на един “реален” пиксел е 3,1μm. Програмата, която се използва за измерването е свободен софтуер “PhotoM”. Всяка снимка е повторена два пъти – при нормално лабораторно осветление (нечетни номера) и с осветяване от вградената светкавица (четни номера). Първата серия опити е проведена при предметно разстояние – a=500 mm, а втората серия при - a=1000 mm.

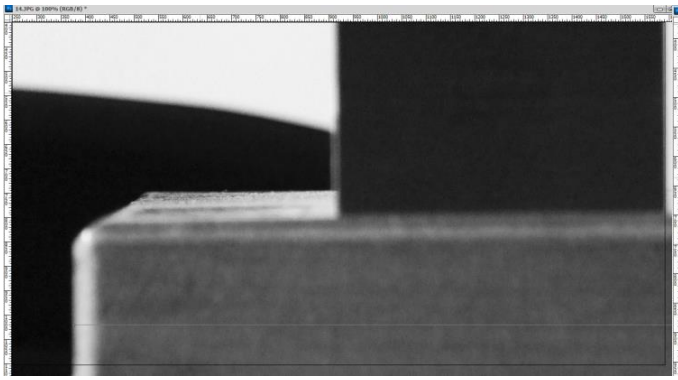
Измерва се дължината на средната част на горната половина на кутията, която в двата си края има големи радиуси на закръгление, така както е показано на фиг.4.2. Избраният обект притежава комплекс от неблагоприятни фактори за точно измерване. Резултатите от измерванията на различните серии опити са показани в таблица 4.1.

От тези експериментални изследвания, ясно се вижда, че освен параметрите на матрицата и параметрите на оптичната система на фотоапарата, много съществено влияние върху грешката и неопределеността оказват и параметрите на заснимания обект. При определено, неблагоприятно стечение на обстоятелствата тяхното влияние може да се окаже решаващо.

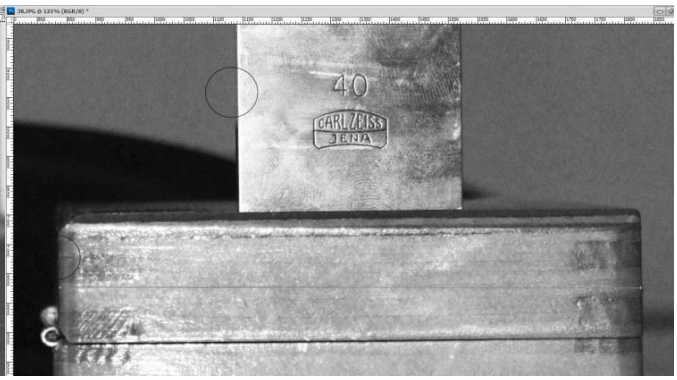


Фиг.4.2. Позиция при заснимането и място на измерването

За определяне влиянието на формата, размерите и вида на повърхнините е проведен експеримент, при който са измерени четири от изображенията от горния експеримент. Това са снимките, №14 и №22, който са с лошо фокусиране (фиг.4.4.); №38 и №49 (фиг.4.5.), които са с добро фокусиране. При измерването е използван коефициента на трансформиране. Измерванията са извършени в два варианта на снимките – без и с допълнителна обработка: превеждане в черно-бяла снимка и засилване на контраста със 100%. Засилването на контраста е свързано със стремежа за подобряване на интерпретацията на границите на обекта, особено при наличието на голям радиус на закръгление, съчетано с лошо фокусиране.



Фиг. 4.4. Снимка №14, преведена в черно-бяло и засилен със 100% контраст. Мащабът е увеличен на 100%.



Фиг.4.5. Снимка №38, преведена в черно-бяло и засилен със 100% контраст. Мащабът е увеличен на 121%.

Резултатите за добре фокусираните снимки с наличие на бликове и текстура, показват, че е по-удачно снимките да се привеждат в черно-бели при засилен контраст. При това се засилва идентифицирането на сенките и радиусите на закръгления, при което се потвърждава заключението от [32], че при добри условия на заснемане сумарната грешка на измерването, включва описването на линията по широчина или контура с минимум 3 px (9,3 μm) – един действителен и двата съседни. При тази предпоставка сумарната грешка на измерването при тези условия се ограничава в рамките на ~ 9÷ 20 μm. За сравнение, горната граница на тази грешка е по-малка от инструменталната грешка на шублер (дебеломер, високомер и

дълбокомер) с обхват 360-500mm, константа – 0,02mm, която е 40 μm. Факт е, че сумарната грешка при цитираните видове шублери е доста по-голяма.

Приемайки факта, че разделителната способност на окото на човек с нормално зрение от разстояние ~ 20cm е ~ 0,1mm (100 μm), може да се забележи от измерванията на снимки №38 и №49, че грешката се колебае но максимума е 20 μm (1px) спрямо референтната стойност. Това е дебелината на щриха на маркера на софтуера, визуализиран на екрана на компютъра, т.е. това е сумарната грешка на позициониране (прицелване) на началния или крайния маркер в процеса на дефиниране на разстоянието за измерване върху монитора (по подобие на измерванията върху инструментални или универсални микроскопи и проектори).

4.2. Грешки при измерването чрез фотограметричния метод

За изясняване на влиянието на фактора „фокусиране" на средностатистически метални повърхнини и влиянието на действителната и екстраполираната разделителна способност на фотографската матрица е извършен експеримент чрез използване на цифров фотоапарат FUJIFILM, описан в т.2.4. Използваната резолюция при заснемане на снимките е 5Mpx (2592/1944px), при което условният размер на един "реален" пиксел е 3,1μm. Максималната резолюция на матрицата е 9Mpx (3488/2616px), при което размерът на един реален пиксел е 2,3μm. Заснемането на двете ППКМ с номинални размери 20mm и 40mm е извършено от еднакво разстояние 300mm, при едни и същи условия на осветяване, с използване на системата за автоматично фокусиране на фотоапарата, с използване на макро режим (и без него) при двете резолюции – 5Mpx и 9MPx. ППКМ са разположени в централната част на кадъра, а фокусното разстояние на обектива е установено на 50mm еквивалент, приведен към стандартен кадър – 24x36. Извършени са по 5 измервания върху всяка снимка и е използвано кръстосано калибриране, веднъж по самата снимка, върху която се извършва измерването (табл. 4.2) и веднъж на другата снимка правена при същите условия (табл.4.3). За измерването са използвани двата софтуера, както и в горните опити (фиг.4.8, фиг.4.9, фиг.4.10).

От табл.4.2, 4.3, 4.4 и 4.5 става ясно, че на практика няма значение по коя от снимките се извършва калибрирането, при условие, че двете снимки да са направени при строго еднакви условия и параметри на заснимане (резолюция и фокусно разстояние). Няма съществена разлика между използването на пълната резолюция на матрицата и екстраполираната резолюция – разликата в действителния размер на пиксел от матрицата е 0,8μm.

От табл.4.2 и 4.3 се вижда и спецификата на софтуер 2 - "PhotoM – 1.21". При измерена стойност над 1000μm, програмата извежда резултата във вида – X.EY μm – фиг.4.8 и 4.9. При това положение резултатът се закръгля до 10μm.

Основният извод, валиден за двата софтуера е, че действителната стойност на максималната грешка съвпада с пресметнатата по зависимост (2.26) за размери до 500mm за най-лошия вариант - 10μm. От табл. 4.4 и 4.5 се вижда, че средните стойности от 5 измервания се колебаят около най-добрия вариант, пресметнат по зависимост (2.26) - 4μm. Това важи както за ортотропни и огледални метални повърхнини, така и за смесени такива.

Табл. 4.2. Резултати при калибриране по снимката на която се извършва измерването

	Снимка №	Измерен размер чрез Софтуер 1, mm					Измерен размер чрез Софтуер 2, mm				
5MPx	1	40,000	40,000	40,005	40,000	40,005	40,010	40,000	40,010	40,010	40,000
	2	40,010	40,005	40,010	40,010	40,000	40,000	40,010	40,010	40,000	40,000
9MPx	3	40,000	40,005	40,000	40,000	40,005	40,000	40,000	40,010	40,000	40,010
	4	40,005	40,000	40,000	40,000	40,000	40,010	40,000	40,000	40,010	40,000

Табл. 4.3. Резултати при калибриране по другата снимка от същата серия и при същата резолюция

	Снимка №	Измерен размер чрез Софтуер 1, mm					Измерен размер чрез Софтуер 2, mm				
5 MPx	1	40,005	40,000	40,000	40,005	40,005	40,000	40,000	40,010	40,010	40,000
	2	40,005	40,000	40,000	40,010	40,000	40,010	40,010	40,000	40,000	40,000
9 MPx	3	40,000	40,005	40,005	40,000	40,000	40,000	40,000	40,000	40,000	40,010
	4	40,000	40,010	40,000	40,000	40,005	40,010	40,000	40,000	40,000	40,000

Табл. 4.4. Средни стойности от табл. 4.2

	Снимка №	Среден размер, измерен чрез Софтуер 1 – Ā, mm	Среден размер, измерен чрез Софтуер 1 – Ā, mm
5 MPx	1	40,002	40,006
	2	40,007	40,004
9 MPx	3	40,002	40,004
	4	40,001	40,004

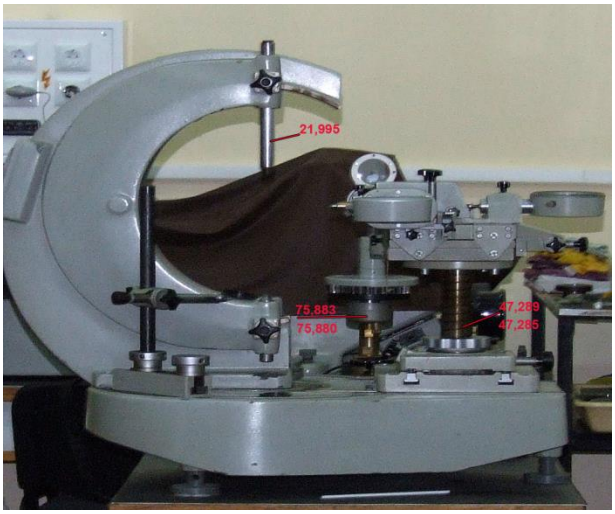
Табл. 4.5. Средни стойности от табл. 4.3

	Снимка №	Среден размер, измерен чрез Софтуер 1 – Ā, mm	Среден размер, измерен чрез Софтуер 1 – Ā, mm
5 MPx	1	40,003	40,004
	2	40,003	40,004
9 MPx	3	40,002	40,002
	4	40,003	40,002

Интересен е фактът, че тази грешка е изцяло в “положителна” посока. Обяснението е, че стремежът на оператора е да постави маркера на софтуера симетрично на разделителната граница на повърхнината – фиг.4.9 и 4.10. От фиг.4.6 се вижда, че ясно определимата разделителна граница при ортотропни и огледални повърхнини е почти винаги в положителна посока (извън обекта) и е със стойност обикновено един пиксел - 2,3 ~3,1μm (за конкретния случай).

Проведено експериментално изследване за проверка на работоспособността на метода, при което са използвани две снимки направени с фотоапарата FUJIFILM FinePix, в метрологичната лаборатория на Русенски университет „Ангел Кънчев”, катедра ТММРМ. Заснети са два метрологични уреда (фиг. 4.11 и 4.12) и са измерени размери, които характеризират функционални им повърхнини, с достатъчно висока точност. За да се получат референтните им стойности са

измерени и чрез класическите контактни методи, чрез дигитални микрометри с константа 1 μm, съгласно [5]. Резултатите са показани върху самите снимки.



Фиг. 4.11. Скоба „Carl Zeiss”

Фиг. 4.12. Уред за комплексна двупрофилна проверка (КДП)

Там където има разлика между измерените по фотограметричния метод размери и референтните им стойности, последните са посочени под стойностите, измерени по фотограметричния метод. Снимката на фиг. 4.11 е обработена чрез изрязване от по-голяма снимка, включваща в себе си скобата на Цайс, а снимката на фиг. 4.12 е с оригиналната си резолюция.

4.3. Разширена неопределеност, тип В при фотограметрични измервания

4.3.1. Анализ на източниците на неопределеност

Съгласно [33] и описаната методика в т.2.6, оценяване тип В на средноквадратичната неопределеност има когато е налице на наличната, априорна информация за възможните изменения на величината X. Ако горната a+ и долната a- граници са симетрично разположени то неопределеността се изчислява по зависимостта

$$U(x) = \frac{a}{\sqrt{3}} \qquad (4.1)$$

Разширената неопределеност U определя интервал около резултата от измерване и се получава като се приема нормално разпределение на измерваната величина, достатъчно надеждна средноквадратична неопределеност (k = 2) и вероятност на доверителния интервал приблизително 95 %. Тези условия са изпълнени в голяма част от случаите при калибриране, използвани във фотограметричните измервания.

Окончателният резултат от калибрирането на конкретна снимка се представя със стойността на измерваната (изходна) величина “y” и доверителния интервал, изразен чрез разширената неопределеност

$$y \pm U \qquad (4.2)$$

В конкретния случай при измерване на нормални размери най-достоверния постулат е симетрично разположение на горната и долната граници на разсейването на размера спрямо референтната стойност. При това полагане е в сила зависимост (4.1). Като пример може да се посочи, че в най-лошия вариант, при натрупване на

всички възможни неблагоприятни фактори, анализирани в тази глава, се получава amax=60μm, при което U=34,6 μm.

В нормалния вариант, при спазване на условията на измерване, анализирани в тази глава - amax=20μm и U=11,5 μm.

Тази средно квадратична неопределеност е съизмерима (от един порядък) с инструменталната средноквадратична неопределеност на дигитален микрометър с обхват – 75-100mm и константа – i=0,001 (по паспорт):

Представяне на бюджета на неопределеността е показано в табл. 4.6., където:

Табл.4.6. Бюджет на неопределеността на фотограметричните измервания

Величина X_i	Оценка X_i	Тип на оце-нянето	Закон на разпределение	Стандартна неопреде-леност	Степени на свобода	Коеф. на чувствителност Ci	Дял от общата неопределеност
X_1	9,3μm	B	Равно-мерно	1,8μm	∞	1	1,8μm
X_2	60μm	B	Равно-мерно	34,6μm	2	$1/2\sqrt{x_2}$	2,2μm
X_3	9,3μm	B	Равно-мерно	1,8μm	∞	1	1,8μm
X_4	20μm	B	Равно-мерно	11,5 μm	2	1	11,5μm
							11,8μm

- Обект на измерване – X_1 - резултатите от проведените експерименти показват, че при наличието на лошо фокусиране, съчетано със засенчване и големи радиуси на закръгление, при огледално отразяващи и комбинирано отразяващи повърхнини, действително неопределеността има доста сериозна стойност (процесът на измерване носи случаен характер), независимо от обработката на снимките и използвания софтуер. Основната причина е субективното интерпретиране на границата на обекта. При нормални обекти и условия на заснемане сумарната грешка на измерването, включва описването на контурната линия по широчина или контура с минимум 3 px от матрицата (9,3 μm) – един действителен и двата съседни – фиг.4.4 и 4.5.

- Процедура на измерване (и калибриране) – X_2 - при малките размери на калибриране – 20 и 40mm и измерване на размери до 500mm, неопределеността е доста висока – това показват експерименталните изследвания. Тук основното влияние се дължи на малките стойности в пиксели на размерите за калибриране. Други основни причини са лошото автоматично фокусиране, лошата осветеност на

обекта, вибрации при експонирането и др. които се разпределят по равномерен закон. При спазване на нормалната процедура за заснемане, нормално калибриране и натрупване на всички останали екстремни, неблагоприятни фактори, неопределеността, определена експериментално, е в рамките на ±60μm при к=2.

- Средство за измерване (СИ) - X_3 – тук интересният момент е, че средството за измерване се припокрива до известна степен с оператора и със софтуера. Относно хардуерът, с който работи оператора - 3px на монитора (CRT – RGB монитор "Samsung – SyncMaster 795DF,описан в т.2.4) при процеса на позициониране на маркера се описват в „идеалния" случай от RGB точки с широчина ~ 0,2mm

- Околната среда – X_4 – Най-сериозното влияние на околната среда е осветеността и качеството на матрицата и оптичната система на фототехниката. Благодарение на добрата осветеност (при необходимост се осигурява осветяване от долната страна, за да се прояви по-добре наличието на ясна контурна граница на обекта) се проявяват достатъчно ясно контурните граници на обекта и се осигурява нормална работа на системата за автоматично фокусиране, която, както вече се видя не винаги работи на задоволително ниво – фиг.4.4 и 4.5. При тази условия сумарната неопределеност на измерването се ограничава в рамките на 20 μm, като типична стойност.

От табл. 4.6 се вижда, че най-сериозен дял в бюджета на неопределеността на измерването по разглеждания метод имат осветеността и качеството на фотографската техника.

Практиката показва, че неопределеността не е основен критерий за закупуване или за реална експлоатация на измервателната техника, а е по-скоро параметър, свързан с теоретичното, точностно интерпретиране на съответното средство за измерване и резултата от измерването, както и за атестирането и валидирането на метода на измерване.

В такъв случай решаващ параметър се явява грешката на измерването.

4.3.2. Изчисляване на неопределеността при фотограметрично измерване на конкретен детайл

За изчисляване на неопределеността при фотограметрично измерване на конкретен детайл е проведен експеримент за измерване на диаметралния размер на цилиндричен детайл от алуминий, описан като обект на измерване в т.2.3.2. Референтният му размер е 10.155 mm, отклонението от формата в надлъжно сечение (отклонение от цилиндричност) е 0.008 mm. За калибриране е използвана ППКМ10, описана в т.2.3.1. За провеждане на изследването е използвана установката, показана на фиг.2.6, а заснемането е извършено с цифров фотоапарат Canon (т.2.4). За обработване на снимките е използван софтуер „Visio 2010", инсталиран на лаптоп Lenovo B5400 (т.2.6). Извършен е анализ и оценяване на входящите фактори Xi. Първоначално са дефинирани:

A. Задача: измерване на диаметъра на цилиндричен детайл D чрез безконтактен метод – фотограметрия при използване на снимачна техника – фотоапарат.

B. Целева неопределеност UT= 0,01mm.

C. Принцип и метод на измерване

• Принцип: измерване на дължина – и сравняването и с известна дължина (ППКМ10);

• Метод на измерване – безконтактен, извършва се върху снимка на детайла с точност на отчитане 0,001px при използване на софтуер;

D. Измервателна процедура: калибриране на фотоапарата; заснемане на детайла; обработване на снимките; измерване на размера от снимката; изчисление на разширената неопределеност.

E. Условия при калибриране и заснемане:

• Поддържана е постоянна температура 20°C±2°C, използваният термометър е живачен с точност на отчитането ±1°C;

• Калибрирането е извършено чрез ППКМ10 – известни са геометричните й характеристики;

• Известно е отклонението от цилиндричност на детайла - 0,008mm;

• Поддържан е еднакъв формат на снимките – 3240x2160px;

• Поддържана е еднаква осветеност при калибриране и при извършване на заснеманията;

• Поддържани са еднакви стойности на разстоянието от обекта до матрицата на фотоапарата L и фокусно разстояние f;

• Изключени са автоматичните настройки на фотоапарата – автоматичен фокус, оптично увеличение и др.

F. Съставляващи на неопределеността при измерване на размера:

• Околна среда – температура, осветеност;

• Характерен елемент на измервателния уред – фоточувствителният елемент на фотоапарата;

• Средство за измерване – използваният софтуер „Visio 2010“ отчита размерите с точност до шести знак след запетаята, което не носи съществено влияние;

• Повторяемост на опитите – опитите са повторени 45 пъти, като средната допусната грешка от оператора при отчитане е 1,315px;

• Измервателна процедура – необходимо е да се осигури съпоставимост между размера на детайла и калибъра;

• Изчисления – всички пресмятания са закръгляни до трета значеща цифра след запетаята, което не носи съществено влияние върху оценяваната неопределеност.

След оценяване на дефинираните входни фактори е извършена първа итерация за оценяване на разширената неопределеност. Резултатите са представени в табл.4.7. При това е установено, че неравенство (2.18) не е изпълнено.

Установено е, че входните величини с най-голямо въздействие са: обработката на снимката от калибрирането на фотоапарата, грешка при измерването от калибрирането на фотоапарата, влиянието на размера на калибъра, влиянието на големината на фокусиране - Kf, обработка на снимката и грешка при измерването (отчитането). Извършена е корекция на входните величини с най-голямо въздействие. Резултатите от втората итерация са представени в табл.4.8 (в приложение), като разширената неопределеност след втората итерация има стойност U_{EN}=9,126μm, удовлетворяваща неравенство (2.18).

4.4. Валидиране на процесите на измерване чрез фотограметрични методи

За да се валидира процеса, при оптимални разходи за валидиране, са изпълнени следните задачи:

•Използване на програмни системи разработени от световно признати софтуерни фирми – свободен софтуер 1 (PhotoM – 1.21) и софтуер 2 (Photoshop CS5) - двата софтуера измерват коректно и еднакво броят пиксели. И при двата софтуера, използването на коефициента на трансформиране е коректно и дава съпоставими резултати от измерването – таблици 4.2, 4.3, 4.4 и 4.5.

•За целите на експериментите е използван действащ, серийно произвеждан цифров фотоапарат FUJIFILM,описан в т.2.6.

•Използваните плочки от комплект ППКМ са от нов комплект 1 клас, получен като дарение от Регионалния център по стандартизация и метрология гр. Русе.

•В т. 2.7 е направен математичен модел на грешката на измерване, съгласно утвърдената методика за пресмятане на грешката при фотограметрични измервания [32]. Резултатите между теоретично пресметнатите стойности за размери до 500mm и реално получените при експерименталните изследвания, при спазване на необходимите изисквания са съпоставими – разликата е 8%.

•Референтните стойности, с които е сравнен предложения метод, са получени при измервания с помощта на серийно произвеждани уреди – шублери и дигитални микрометри, който са предварително проверени съгласно действащите стандарти.

•Методика за определяне на разширената неопределеност, тип В при измерване – приведена в т.2.8. Неопределеността на метода - y±11,8 μm.

От гледна точка на документиране на валидирането е необходимо да се създадат предписания за този процес като:

- критерии за преглед и одобряване на процеса;
- одобряване на техническите средства и квалификацията на персонала;
- използване на конкретен метод и процедура;
- изисквания за записите.

Изискванията към процеса на фотограметрично измерване могат да се представят в следните фази (методика за фотограметрично заснимане и измерване):

- планиране: детайли (брой, габаритни размери, материал), фотоапарат (вид и резолюция на матрицата, физически размер на матрицата и на един пиксел, качество на оптичната система, качество на работа на системата за автоматично фокусиране, ако се използва такава, вид на компресията на получения файл – JPG, BMP, RAW), оценител (квалификация и годност по отношение на биоконстанти- острота на зрително възприятие), разположение на детайлите спрямо фотоапарата, метод (използван софтуер) условия на работната среда (осветеност минимум 50lx, температура на околната среда по възможност 20-23°C, липса на задименост и запрашеност) и др. В началото на изследването се извършва измерване на повърхнина от детайла или конструкцията, по възможност лежаща в същата равнина на останалите размери с най-високата достижима точност за осъществяване на процеса „калиброване” на софтуера.
- извършване на фотограметричното заснимане.

Методите и процедурите (работни инструкции) при фотограметричното заснимане могат накратко да се обобщят по следния начин:

1. Установява се фотоапарата на подходящо закрепване на подходящо разстояние от заснимания обект. Разстоянието зависи или от достъпността на обекта, или от неговите габаритни размери, или от други фактори, но при всички положения, той

трябва да заема голяма част (над 80%) от централната част на кадъра, както по височина, така и по ширина.

2. Установява се фокусното разстояние на обектива (при обектив с променливо фокусно разстояние) в диапазона – f=50-100mm, еквивалент, отнесен към стандартен размер на кадъра – 24x36.

3. При възможност се прави пробно заснемане с използване на системата за автофокусиране при естествено осветление и при използване на помощно осветление от светкавица (това е в зависимост от вида на повърхнините на детайла или конструкцията). Тези пробни снимки се анализират на място с универсален софтуер за разглеждане на снимки при голямо увеличение и се определя вида на осветлението, степента на фокусиране, степента на определяне на границите на измерваните повърхнини спрямо фона. При необходимост се внасят корекции.

4. Извършване на самото заснемане по възможност с жило за експониране. Това се прави с цел да се игнорират дори и най-малките вибрации, внесени в системата.

- извършване на фотограметричното измерване. Избира се удобно увеличение (там където е възможно). Извършва се калибрирането. Измерват се броят на пикселите на калибрращата повърхнина или на калибриращия размер, пресмята се коефициента на трансформация. Желателно е всяко измерване да се извърши с пет кратна повторяемост и за измерена стойност да се приеме средната стойност.

- действия за подобрение на процеса: при незадоволителни резултати или при значителни отклонения, в зависимост от причината за тях, могат да се предприемат следните действия: повтаряне на фотограметричното измерване, контролно измерване с универсален измервателен уред (там където е възможно), почивка, възстановяване на способността на оператора да възприема информация от сетивата си (лечение) или смяна на оператора.

Одобряване на техническите средства: Те могат да бъдат контролни средства за измерване на линейни или ъглови размери, които е необходимо да бъдат проверени и калибрирани, а също така и оценителя и неговите сетива. Особеност на фотограметричното измерване е, че оценителят се явява едновременно и изпълнител на измерването, и основна, неделима част от средство за измерване.

Изводи от Глава 4

1. 1. За да се минимизират грешките при фотограметричното измерване на обекти без използване на коефициент на трансформация е необходимо калибриращата и измерваната повърхнини да лежат в една равнина, т.е. на еднакво разстояние от снимачната техника.

2. Резултатите от фотограметричните измервания при горните условия са толкова по-точни, колкото номиналният размер на калибриращата повърхнина е по-близък до този, на измерваните размери. Нарастването на разстоянието между обекта и снимачната техника, съчетано с малък калибриращ размер и фокусно разстояние води до увеличаване на грешките от измерването.

3. Точността на фотограметричните измервания зависи в голяма степен от контрастното изображение на границите на измерваните повърхнини, които в идеалния случай трябва да се описват с 2-4px върху екрана на монитора. Наличието на радиусни закръгления, съчетани с лошо фокусиране, засенчване, аберация, кома и др. внася многозначност при отчитането на размерите. За преодоляване на тези

затруднения могат да се използват черно-бели фотографии, направени при добро фокусиране и повишен контраст.
4. Освен параметрите на заснетият обект (форма, цвят, текстура, размери, разположение) върху грешките и неопределеността при фотограметричните измервания оказва влияние и качеството на неговите повърхнини по отношение на формата и размерите на грапавините им. Най-неблагоприятни са огледалните повърхнини, а най-благоприятни – ортотропните, имащи дифузно отражение (равномерно във всички посоки).
5. Най-висока точност на фотограметичните измервания може да се постигне, когато заснемането на еталона и обекта е направено при еднакви условия и параметри на заснемането (резолюция и фокусно разстояние), при което в рамките на настоящото изследване е постигната максимална разлика между референтните и измерените стойности 4 μm.
6. Теоретичната и експериментално доказана стойност на неопределеността при фотограметрично измерване е съизмерима (от един порядък) с инструменталната средноквадратична неопределеност на дигитални микрометрични средства за измерване на фирмата „Mitutoyo“, което утвърждава приложимостта на метода в областите на общата техника и машиностроене за размери до 500mm.
7. В резултат от валидирането на фотограметричния метод на измерване на материални обекти е разработена процедура, която може да се използва като инструкция и практическо ръководство за прилагането му в посочените по-горе области с помощта на произволна фотографска техника, достъпен софтуер и кратко обучение на оператора.

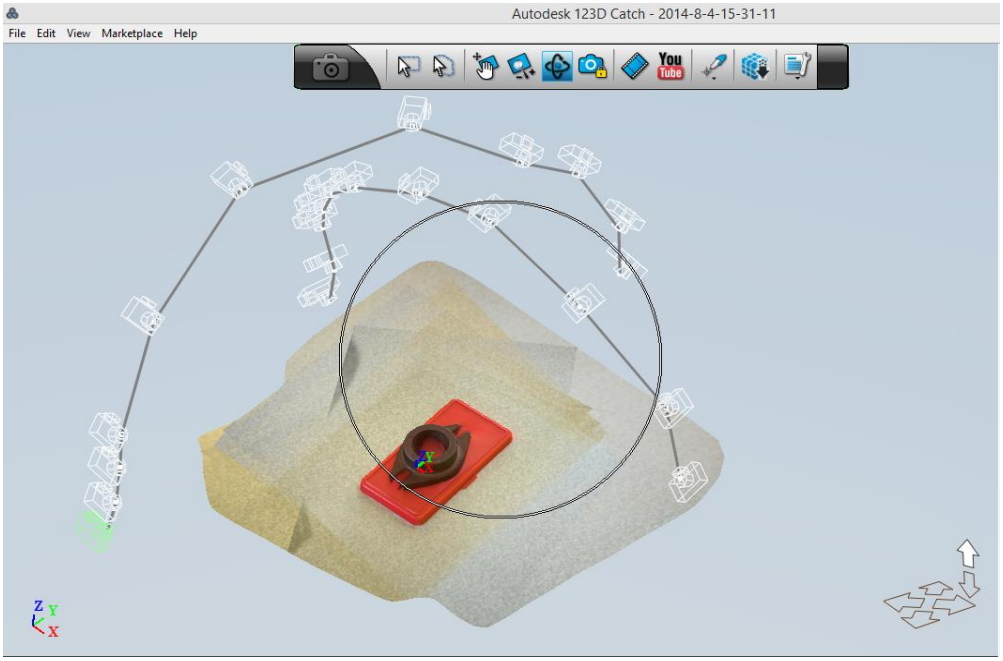
ГЛАВА 5. ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПРИЛОЖИМОСТТА НА ФОТОГРАМЕТРИЯТА ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА МАЛКИ РАЗМЕРИ И ЗА РЕКОНСТРУИРАНЕ НА МАШИННИ ДЕТАЙЛИ

5.1. Изследване на възможностите за получаване на дигитален модел на детайл чрез методите на фотограметрията и ре-инженеринга

5.1.1. Реконструиране на обект чрез използване на безплатен софтуер

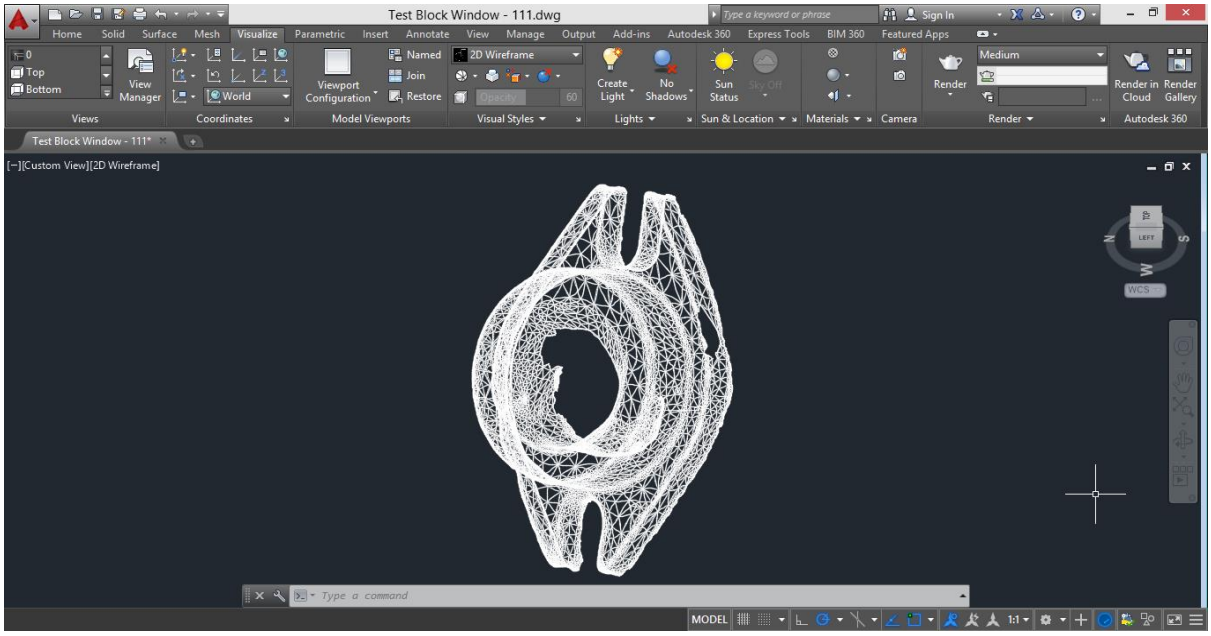
Проведено е експериментално изследване на възможностите за използване на свободен софтуер за обработка на серия фотографии, така че да се получи триизмерен модел, по който да могат да се определят размерите на физическия обект. Изследвани са различни програми, предлагани на пазар и В резултат са избрани продуктите на американската фирма Autodesk Inc., която произвежда широк спектър софтуер като известна част от него е безплатна, а за често използваните в практиката програми има безплатен университетски лиценз [126].

На фиг.5.1 е показана визуализацията на генериран образ чрез облак от реперни точки, получен след обработката, която се извършва в реално време чрез онлайн платформа.



Фиг.5.1. Визуализация на реконструирания модел при използване на „Autodesk 123D Catch“

На фиг.5.3 е показано изображението, което се получава след импортиране на мрежовия модел на обекта в „Autocad“ като блок, което позволява неговото обработване. Тук вече ясно се вижда, че по модела липсват части от повърхнини, което се дължи на недоброто разпознаване на снимките с „Autodesk 123D Catch“ – част от тях са с лошо качество, поради недостатъчна осветеност и недостатъчен фокус.



Фиг.5.3. Импортиране на мрежовия модел на обекта в „Autocad“

В резултат от направеното изследване е установено, че е възможно, чрез използване на безплатни софтуерни програми, от комплект снимки да се регенерира триизмерен модел на обект, от който да се получи размерна информация. По този начин се осигурява евтин и бърз метод за осъществяване на метрологичен контрол на размерите и качеството на машиностроителните детайли със сравнително малки

размери, но за да се получи качествен тримерен модел е необходимо сравнително голямо количество снимки с добро качество.

5.1.2. Реконструиране на обект чрез използване на снимки и допълнителна геометрична информация от директно измерване на обекта

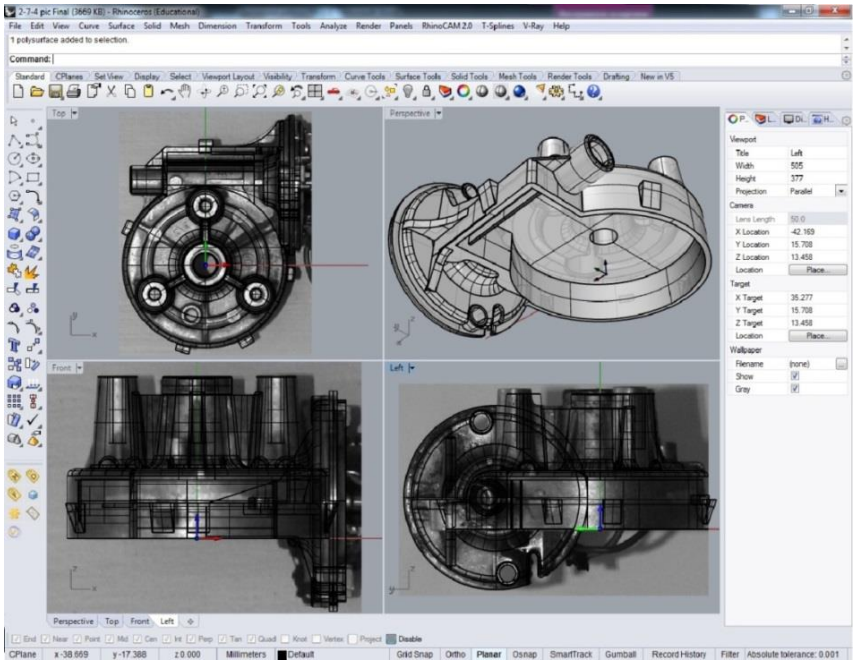
Тук е направена реконструкция [12] на детайл по три снимки и възстановяване на обемната му форма в средата на триизмерния софтуер „Rhinoceros 5.0“ на компанията „Robert McNeel & Associates“.

Детайлът, който е обект на експеримента, представлява корпус на редуктора на стъклопочистващия механизъм на автомобил, марка „Порше 911 Carrera RS“ от 1973г. (фиг. 5.5) и е необходимо да бъде подменен, но не може да бъде закупен. Необходимо е да се конструира и изработи отново при отчитане на условията за изработването му (единично производство).

Получаването на дигитална конструктивна информация се базира на снимков материал за съществуващия автомобилен детайл.

Фиг. 5.5. Снимки на детайла в три взаимноперпендикулярни равнини

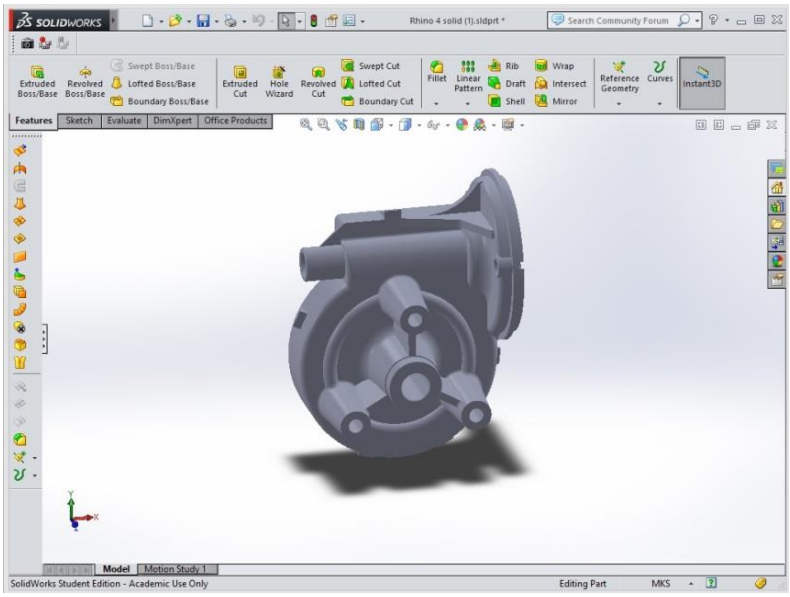
На фиг.5.8 е показан завършения повърхнинен модел. В етапа на построяване е използвана допълнителна геометрична информация чрез директно измерване от детайла на вътрешни повърхнини, глухи отвори и др.



Фиг. 5.8. Завършен повърхнинен модел на обекта в средата на Rhinoceros

Конструктивният чертеж на завършения дигитален модел е направен с лицензирана версия на SolidWorks, собственост на Факултет „Техника и

технологии” – Ямбол, като първо е извършено преобразуване на повърхнинния (Surface) модел в твърдотелен (Solid) (фиг.5.9).

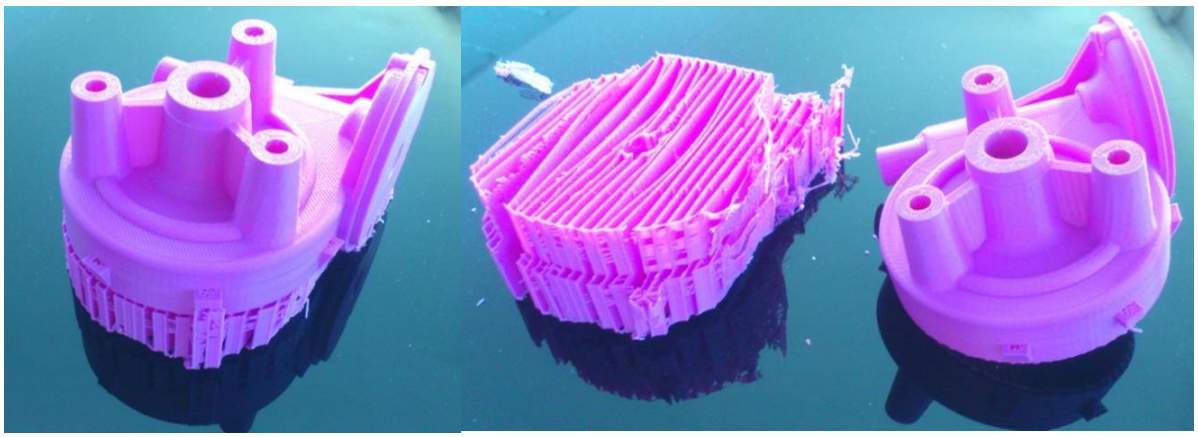


Фиг. 5.9. Твърдотелен модел на обекта в средата на SolidWorks

Разгледани са два технологични процеса за изработване на детайла: изработване чрез снемане на стружка – фрезоване на CNC машина и изработване без снемане на стружка – чрез използване на така наречените адитивни методи – 3D принтери. След направена симулация чрез софтуерния продукт Vectric Cut3D е установено, че при първия вариант общото машинно време за изработване на детайла (ако бъде изработен от алуминиева сплав) е 15 часа, а при втория ще е 13 часа и 23 минути, тъй като не се налага преустановяване на обработвания детайл по време работа.

На фиг.5.10 е показан принтирания детайл преди и след премахване на помощните повърхнини.

На фиг.5.10 е показан принтирания детайл преди и след премахване на помощните повърхнини.



Фиг.5.10. Получения след 3D принтиране детайл

5.1.3. Реконструиране на обект чрез използване на снимки и априорна геометрична информация

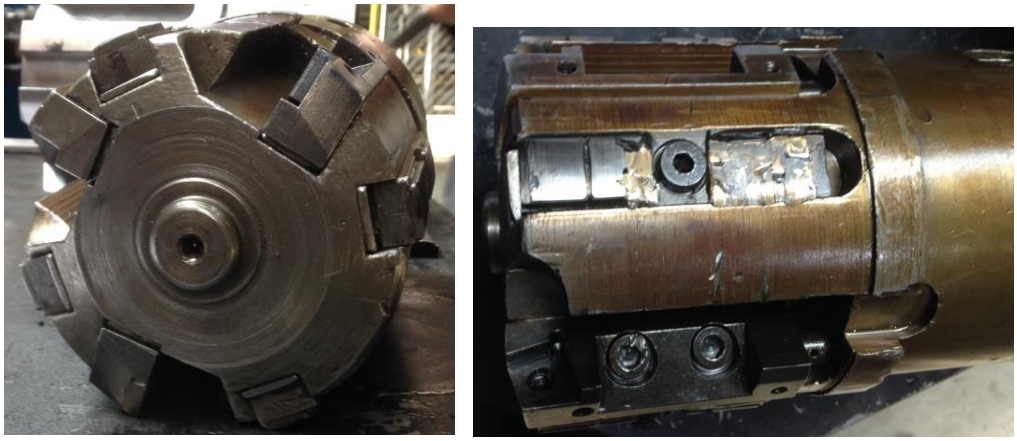
Пример за приложение на метода е реконструиране на обект без преработване на входната информация в „облак“ от точки, който е демонстриран чрез

реконструиране на разстъргваща триножова глава на немската фирма “Ecoroll AG“, използвана за обработване на отворите на хидравлични цилиндри в условията на фирма „Палфингер – Продукционстехник“ България ЕООД - под. Тенево (фиг.5.11).

Във фирмата разполагат с такива разстъргващи глави по един типоразмер за всеки от диапазоните на изработваните хидравлични цилиндри, но не разполага с конструктивна документация.

Решаването на този проблем включва разработването на дигитален модел на съществуващия тип инструмент, от който да е възможно промяна на геометричната информация, за да се получат по възможно най-бърз начин чертежи и друга конструктивна документация на всички типоразмери разстъргващи глави.

Снемането на геометричните размери се извършва в производствени условия, тъй като инструментите са единични бройки и е невъзможно изваждането им от производството. Като база се използва разстъргващата глава ø120mm. Използвани са няколко снимки на инструмента, заснети с камерата на смартфон “iPhone – 5” от ръка, в условията на осветлението в цеха, като целта е да се получат качествени снимки в двете взаимноперпендикулярни направления – напречно и надлъжно.



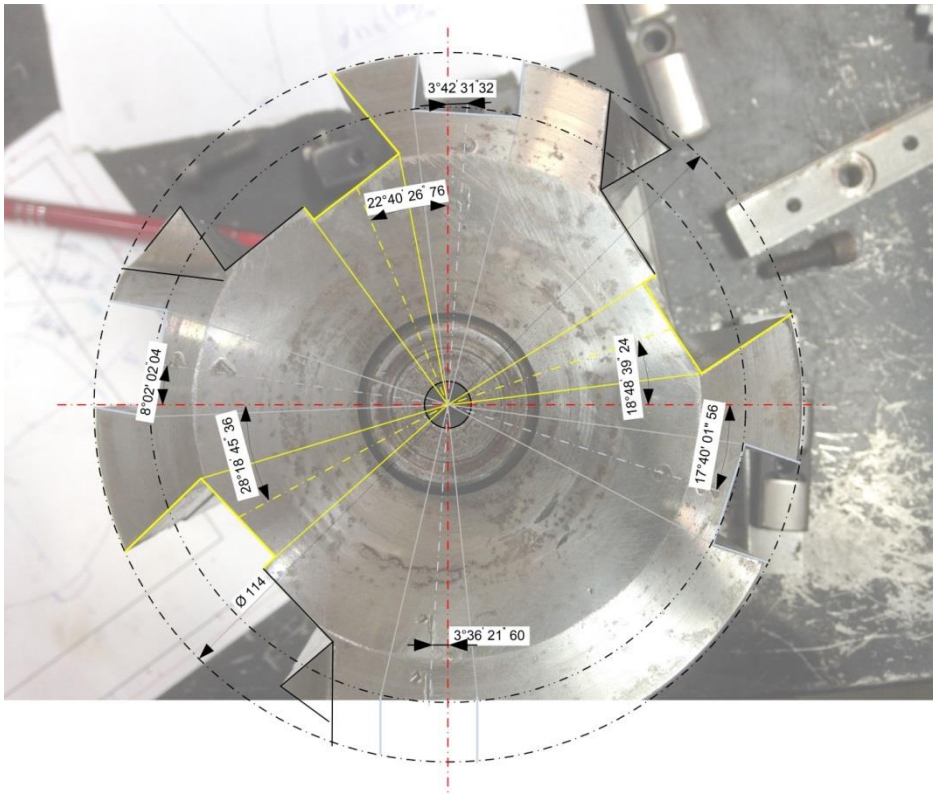
Фиг.5.11. Разстъгваща глава ø120mm

Тъй като присъединителната част на инструмента към борщангата на машината е стандартна, снимки на този елемент не са правени, а за конструирането им е използвана априорна информация.

Работата е разделена на два етапа:

- На първия етап са снети геометричните размери на разстъргващата глава в средата на софтуерната програма „Microsoft Visio 2010“, която е част от „Microsoft Office 2010“;
- На втория етап е създаден 3D дигитален модел на инструмента чрез използване на CAD програмата „SolidWorks 2015“, за която факултет „Техника и технологии“ – Ямбол има закупен лиценз.

Обработена е снимката, която показва челно инструмента, тя е мащабирана, т.е. увеличена така, че базовият диаметър на главината Ø114mm, получен от априорна информация (фиг.5.12). Точността, с която са определени ъгловите размери е в дробни части от минутата, а линейните – дробни части от милиметъра, каквито са възможностите на използваната програма. Върху точността на определените размери влияе качеството на снимката, което зависи главно от степента на разсейване на контурите на обекта.

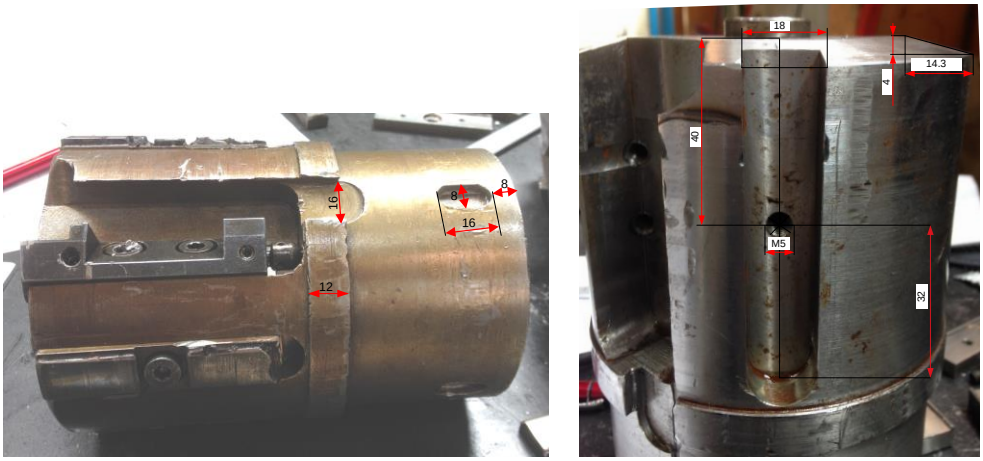


Фиг.5.12. Определяне на ъгловото разположение на каналите за монтиране на ножодържачите и водещите пластини

разположение на ножодържачите;

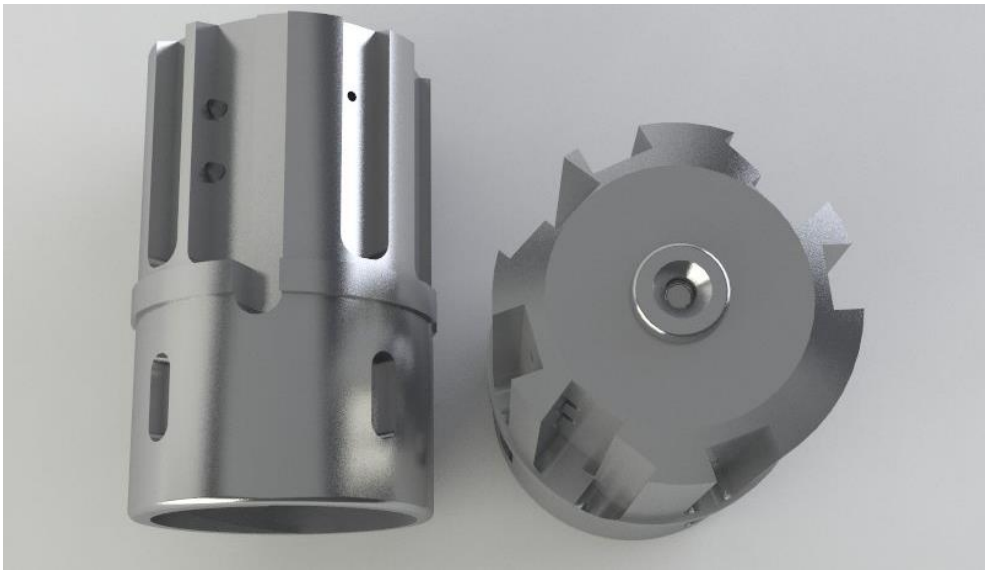
разположение на каналите за водещите пластини

Същата процедура е повторена и с двете снимки в надлъжно направление – снети са размерите, определящи дължината на каналите за режещите и водещите пластини, размерът и разположението на резбовите отвори за монтаж на пластините, на водещия пояс, на шпонковите канали, служещи за изваждане на инструмента, на ъгъла при върха на инструмента и др. (фиг.5.13).



Фиг.5.13. Определяне на надлъжното разположение на елементи от разстъргващата глава

След уточняване на основните геометрични размери започва изграждането на дигиталния тримерен модел на разстъргващата глава в средата на „SolidWorks 2015“ (фиг.5.14).



Фиг.5.14. Дигитализиран модел на проектираната разстъргваща глава за обработване на отворите на хидравлични цилиндри с диаметър ø120mm

5.2. Изследване на приложимостта на фотограметричния метод за измерване на малки размери

Измерването на тези повърхнини чрез реализиране на конткатни методи е свързано със скъпо, специализирано оборудване, скъп, специализиран софтуер, което по-малките фирми не могат да си позволят и с изискването за висока квалификация на операторите на това оборудване. Не на последно място е и ниската производителност на тези методи, реализирани на универсални или инструментални микроскопи и проектори.

Тук се провежда сравнително изследване на точностните възможности на метода чрез използване на фотоапарат от среден клас и два софтуера (със свободен и с платен лиценз), с което се избягват до голяма степен посочените по-горе недостатъци.

5.2.2. Експериментално изследване приложимостта и точността на фотограметричното измерване на отвори с диаметри, по-малки от 2mm

В качеството на референтни стойности се използват размерите на диаметри, измерени по безконтактен метод на 3D измервателна машина „ABERLINK” и на Универсален микроскоп модел „Carl Zeiss Jena - 3296„ (фиг.5.19). На фиг.5.20 е показана калибриращата плочка на 3D машината, притежаваща калибриращи отвори с различни диаметри.

Реализирането на измерването по предлагания метод се извършва със серийно произвеждан цифров фотоапарат FUJIFILM с описаните в т.2.4 характеристики. Заснемането се извършва върху Универсален дължиномер, при отстранен окуляр и в режим „Супермакро” при резолюция 5 Mpx, от ръка, без специално закрепване на камерата. Целта е да се „замърси” по възможност максимално експеримента, за да може да се оцени обективно приложимоста на метода.

За отчитане на размерите от снимките, получени чрез заснемане са използвани двата софтуера „Photo M1.21“ и „Photoshop CS5”. При заснемането за калибриране са използвани отворите от калибриращата плочка с размери Ø0,5mm и Ø4mm.

Избраният за измерване детайл е плата от часовников механизъм швейцарско производство – ETA 2824-2, на който има монтирани рубинови лагери (3, 4 и 5) и свредловани отвори (1, 2 и 6) с много диаметри – фиг.5.21. резултатите са приведени в табл.5.2 до табл.5.7.

Фиг.5.21. Детайл от часовников механизъм, заснет с камерата на 3D машина

Таблица 5.2. Резултати от измерване на 1 отвор

Aberlink	Универсален дължиномер	Photo M 1.21		Photoshop CS	
		калибър – 4mm	калибър – 0,5mm	калибър – 4mm	калибър – 0,5mm
0,707	0,705	0,707	0,700	0,699	0,696

Таблица 5.3. Резултати от измерване на отвор 2

Aberlink	Универсален дължиномер	Photo M 1.21		Photoshop CS	
		калибър – 4mm	калибър – 0,5mm	калибър – 4mm	калибър – 0,5mm
0,751	0,748	0,747	0,748	0,749	0,748

Таблица 5.3. Резултати от измерване на отвор 3

Aberlink	Универсален дължиномер	Photo M 1.21		Photoshop CS	
		калибър – 4mm	калибър – 0,5mm	калибър – 4mm	калибър – 0,5mm
0,201	0,201	0,202	0,200	0,202	0,196

Таблица 5.5. Резултати от измерване на отвор 4

Aberlink	Универсален дължиномер	Photo M 1.21		Photoshop CS	
		калибър – 4mm	калибър – 0,5mm	калибър – 4mm	калибър – 0,5mm
0,299	0,296	0,303	0,300	0,303	0,304

Таблица 5.6. Резултати от измерване на отвор 5

Aberlink	Универсален дължиномер	Photo M 1.21		Photoshop CS	
		калибър – 4mm	калибър – 0,5mm	калибър – 4mm	калибър – 0,5mm
0,201	0,202	0,202	0,201	0,202	0,199

Таблица 5.7. Резултати от измерване на отвор 6

Aberlink	Универсален дължиномер	Photo M 1.21		Photoshop CS	
		калибър – 4mm	калибър – 0,5mm	калибър – 4mm	калибър – 0,5mm
1,372	1,369	1,370	-	1,367	-

5.2.3. Експериментално изследване на измерването на отклонението от кръглост по фотограметричния метод на много малки отвори

Доказаната приложимост на фотограметричния метод за измерване на отвори с много малки диаметри, дава основание да се предположи, че методът е подходящ и за измерване на отклонение от форма – в конкретния случай на отклонение от кръглост в равнината на фокусиране на измерваните в т.5.2 отвори. При това изследване за референтна стойност се използва стойността, измерена от 3D машината „ABERLINK" и представена като резултат от измерването на всички фигури. Измерването се извършва по простия, дискретен метод на измерване в две взаинмноперпендикулярни равнини. Резултатите са приведени в табл.5.8 до табл.5.13.

Таблица 5.8. Резултати от измерване на отклонение от кръглост на отвор 1

Aberlink	Универсален дължиномер	Photo M 1.21		Photoshop CS	
		калибър – 4mm	калибър – 0,5mm	калибър – 4mm	калибър – 0,5mm
0,006	-	0,010	0	0,010	0,008

Таблица 5.9. Резултати от измерване на отклонение от кръглост на отвор 2

Aberlink	Универсален дължиномер	Photo M 1.21	Photo M 1.21	Photoshop CS	Photoshop CS
		калибър – 4mm	калибър – 0,5mm	калибър – 4mm	калибър – 0,5mm
0,008	-	0,010	-	0,008	-

Таблица 5.10. Резултати от измерване на отклонение от кръглост на отвор 3

Aberlink	Универсален дължиномер	Photo M 1.21		Photoshop CS	
		калибър – 4mm	калибър – 0,5mm	калибър – 4mm	калибър – 0,5mm
0,006	-	0,010	-	0,004	-

Таблица 5.11. Резултати от измерване на отклонение от кръглост на отвор 4

Aberlink	Универсален дължиномер	Photo M 1.21		Photoshop CS	
		калибър – 4mm	калибър – 0,5mm	калибър – 4mm	калибър – 0,5mm
0,006	-	0,008	-	0,008	-

Таблица 5.12. Резултати от измерване на отклонение от кръглост на отвор 5

Aberlink	Универсален дължиномер	Photo M 1.21		Photoshop CS	
		калибър – 4mm	калибър – 0,5mm	калибър – 4mm	калибър – 0,5mm
0,006	-	0,010	-	0,006	-

Таблица 5.13. Резултати от измерване на отклонение от кръглост на отвор 6

Aberlink	Универсален дължиномер	Photo M 1.21		Photoshop CS	
		калибър – 4mm	калибър – 0,5mm	калибър – 4mm	калибър – 0,5mm
0,008	-	0,010	-	0,008	-

Изводи към глава 5

1. Опитните данни от проведеното изследване показват, че резултатите от измерването на диаметрите на отвори в посочения по-горе диапазон чрез фотограметричния метод практически съвпадат с тези от класическите контактни методи. Получените разлики са в рамките на случайните грешки от субективен характер. Това доказва убедително приложимостта на метода.
2. Доказаната възможност за измерване на диаметрите на малки отвори с висока точност чрез фотограметричния метод въз основа на заснемане с техника от среден клас (фотоапарати, телефони, таблети) създава реални предпоставки за практическо използване на метода и намаляване на разходите за измерване.
3. Прецизното разкриване на контурите на измерваните отвори от снимковия материал е от съществено значение за точността на отчитаните размери, особено при малки диаметри, което зависи колкото от степента на фокусиране и качествата на оптичната система, толкова и от уменията на оператора.
4. Фотограметричният метод, основан на обработването на дигитална информация от заснет чрез мобилни устройства физически обект дава възможност за получаване на дигитален модел на обекта, независимо от неговата сложност и размери. Той успешно може да се използва за измерване, реконструиране, бързо прототипиране и изработване.
5. Съществува голямо разнообразие от софтуерни продукти, чрез които определянето и коригирането на влиянието на факторите, от които зависи качеството на снимките и точността на отчитане се извършва автоматично при минимално участие на оператора. Препоръчително е използване на специализираният софтуер „Photomodeler“ на канадската фирма EOS Systems Ins.
6. Описаният метод за получаване на дигитален модел на реален детайл по три снимки с цел реконструкция и изработване, при отсъствие на конструктивна документация, може да послужи като практическо ръководство за прилагане на фотограметричния метод при възстановяване на детайли и възли чрез класически технологии или бързо прототипиране.
7. Реконструирането на триножовата разстъргваща глава от действащо производство чрез използване на снимки от телефон и априорна геометрична информация е убедителен пример за приложимостта на фотограметричния метод в машиностроителното производство. Описанието на последователност от действия може да се използва като ръководство за прилагане на метода.

ПРИНОСИ

Научно-приложни:

1. Изведени са зависимости за определяне грешката на предложения фотограметричен метод, в зависимост от влияещите фактори. Теоретичните резултати се потвърждават от проведените експериментални изследвания.

2. Изследвано е влиянието на различните фактори върху грешката и неопределеността на метода. Дефинирани са четири основни типа повърхнини и е определено влиянието им върху качеството на измерването.

3. Предложена е методика за дефиниране на неопределеността на фотограметричния метод, в зависимост от влияещите фактори. Дефинираната неопределеността на метода, е от един порядък с неопределеността на дигиталните микрометрични средства за измерване.

4. Разработена е методика за валидиране на фотограметричния метод в зависимост от влияещите фактори. Разработената методика, позволява да се валидира метода при използване на различна фотографска техника и различни софтуерни продукти.

5. Разработена е методика за реализиране на метода при използване на произволна фотографска техника и обучение на операторите.

6. Доказано е, че чрез комбинирането на методите на фотограметрията и реинженеринга е възможно получаване на дигитален модел на номиналната геометрия на обект, независимо от формата и размерите му.

Приложни:

1. Доказана е експериментално приложимостта в областта на общата техника и машиностроенето за размери до 500mm, при използване на серийно произвеждани фотоапарати и сериен софтуер.

2. Доказана е експериментално приложимостта в областта на измерване параметрите на отвори с диаметри по-малки от 2mm. На практика в тази област предложения метод е без конкуренция и осигурява необходимата точност на измерването.

3. Експериментално е установено, че върху стойността на коефициента на трансформация най-силно влияние оказват разстоянието L от заснемания обект до матрицата на фотоапарата и фокусното разстояние f на обектива.

4. Статистически е установено, че зависимостта на коефициента на трансформация спрямо разстоянието L от заснемания обект до матрицата на фотоапарата е степенна функция.

5. Статистически е установено, че зависимостта на коефициента на трансформация спрямо фокусното разстояние f на обектива е линейна функция.

6. Изведена е зависимост за определяне на коефициента на трансформация в зависимост от разстоянието L от заснемания обект до матрицата на фотоапарата и фокусното разстояние f, даваща възможност за определяне, с достатъчна точност, стойността на КТ в изследвания интервал.

7. Установено е, че входната дигитална информация за ре-инженеринга може да се получи от различни устройства, като съществуват приложения, които дават възможност информацията да се получава от мобилни устройства като телефони и таблети.

8. Извършени са експериментални дигитализирания на обекти при различни изходни условия, при реални практически задания. Получените модели отговарят на необходимите изисквания за точност.

НАУЧНИ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМАТА НА ДИСЕРТАЦИЯТА

1. Сакакушев Б.Б., Григоров В.И., Георгиев Г.К. Методика определения расстояния объекта с помощью стереофотограметрии, Теоретические и практические аспекты развития современной науки [Текст]: материалы VIII международной научно-практической конференции, г. Москва, 29 июня 2013 г./Науч.-инф. издат. центр «Институт стратегических исследований». – Москва : Изд-во «Спецкнига», 2013. – 252 с. ISBN 978-5-91891-297-3, стр.77-80
2. Georgiev Georgi & Georgieva Nely Investigation possibilities for the use of free software for data processing used for accurate measurement details through photogrammetry, ARTTE Vol. 2, No. 3, 2014 ISSN 1314-8788 (print), ISSN 1314-8796 (online), pp 202-210
3. Георгиев Георги, Борис Сакакушев, Красимира Георгиева Изследване на приложимостта на фотограметричния метод за измерване на много малки размери, Научни трудове на Русенския университет, 2015, брой т.54, с.2, стр. 15-19, ISSN 1311-3321
4. Георгиев Георги Възможности за намаляване себестойността на продукцията чрез използване на нови методи за проектиране и производство на детайли, Научни трудове на Русенския университет, 2015, брой т.54, с.2, стр. 135-139, ISSN 1311-3321
5. Димитров Иван, Георги Георгиев, Нели Георгиева Пример за използване на метода ре-инженериг при реконструиране на машинен детайл, Ямбол, Сб. науч. тр. XXIV МНК „Мениджмънт и качество“ за млади учени, ФТТ-Ямбол, ССКБ, 15-16.10.2015, с. 74-81. ISSN 1314-4669

Цитирания

Цитиращи автори:

Казакова Миглена, Мирослав Пенчев Приложение на цифрова видеокамера като безконтактен колориметър, Ямбол, Сб. науч. тр. XXV МНК „Мениджмънт и качество“ за млади учени, ФТТ-Ямбол, ССКБ, 11-12.05.2016, (под печат), ISSN 1314-4669

Цитирана статия:

- Georgiev Georgi & Georgieva Nely Investigation possibilities for the use of free software for data processing used for accurate measurement details through photogrammetry, ARTTE Vol. 2, No. 3, 2014 ISSN 1314-8788 (print), ISSN 1314-8796 (online), pp 202-210

The problem with controlling the dimensional accuracy of machine components stands always in the focus of research since its significance in terms of guaranteeing the quality of the final products, and the time required to perform control operations to the total time for manufacture of the devices it is significant.

The use of traditional contact methods for measuring geometric dimensions of objects is accompanied with significant measurement uncertainty, which is due to several factors such as wear on contact surfaces of measuring instruments, errors in metering, errors from temperature deformation and others.

In non-contact methods of measuring this type of error are minimal or totally absent. Usually, this instrumentation in non-contact measurement methods works on the principle of optical transformation of the information or laser scanning. The cost of these devices is too high, and requirements to the environment in which they will work and to the training of staff are essential.

The object of the study is the possibilities of applying photogrammetry technical measurements using readily available and relatively inexpensive photographic equipment.

This work aims to demonstrate the ability to use the methods of reverse engineering and rapid prototyping machine items by photogrammetric method based on photographic shooting in general and mechanical engineering.

For achieving this goal the following tasks are performed:

• a methodology for studying the factors that influence the accuracy photogrammetric determining the geometric dimensions is developed;

• factors influencing the accuracy of calibration and measurement capture are investigated;

• measurement errors by photogrammetric method and prove its performance are analyzed;

• applicability of the photogrammetric method for measuring small size and reconstruction of machine parts is investigated.