РУСЕНСКИ УНИВЕРСИТЕТ „АНГЕЛ КЪНЧЕВ”

МАШИННО-ТЕХНОЛОГИЧЕН ФАКУЛТЕТ

инж. Димитър Стефанов Димитров

СЪЗДАВАНЕ И ИЗСЛЕДВАНЕ НА ТРИКООРДИНАТНА ИЗМЕРВАТЕЛНА ГЛАВА С ПОДОБРЕНИ ПАРАМЕТРИ

АВТОРЕФЕРАТ
на дисертация за присъждане на образователната и научна степен
„ДОКТОР”

Научна специалност:
02.01.10. Технология на машиностроенето

Научен ръководител:
проф. д-р Иван Замфиров Иванов

Рецензенти:
1. проф. д-р Васил Иванов Георгиев
2. доц. д-р Георги Василев Ненов

Русе
2013 г.

Докторантът работи като асистент по дисциплините „Технология на машиностроенето - 1 и 2”, “Групови и типови технологични процеси”, “Технологична екипировка”, “Управление на металообработваща техника”, “Мехатроника”, “Размерно обработване чрез енергийни въздействия” „Точност и технологичност на конструкциите” към катедра ТММРМ на факултет „МАШИННО-ТЕХНОЛОГИЧЕН” при Русенския университет „Ангел Кънчев”. Бил е редовен докторант в същата катедра. В лабораториите към тази катедра са извършени и изследванията по дисертацията.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от научно звено, формирано от преподаватели и хабилитирани преподаватели на разширения съвет при катедра ТММРМ, на Русенски университет „Ангел Кънчев”, на 15.11.2012 г.
.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на открито заседание пред научно жури, назначено от ректора на Русенския университет, на ……..2013 г. от … часа в зала…., корпус …. на университета. Материалите на докторанта са на разположение на заинтересованите в катедра „ТММРМ”. Авторефератът е публикуван в сайта за развитие на академичния състав на университета.

Автор: инж. Димитър Стефанов Димитров
Заглавие: Създаване и изследване на трикоординатна измервателна глава с подобрени парметри

Тираж: 12 бр.
Печатна база при Русенски Университет „Ангел Кънчев”

ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИЯТА

1. АКТУАЛНОСТ НА ПРОБЛЕМА

В съвременното машиностроене, за решаване на определени контролно-измервателни задачи се е наложило използването на металорежещите машини (ММ) с цифрово програмно управление (ЦПУ) и като координатно-измервателни машини (КИМ). Това се отнася главно за фрезовите и за многооперационните машини от пробивно-фрезови тип с ЦПУ, известни като обработващи центри (ОЦ). Със своята компановка и управление те са подходящи за сформиране на измервателна система, подобна на тази при координатно измервателните машини с ЦПУ. Този начин за контрол има редица доказани предимства. Важен елемент на такава измервателна система е т.нар. трикоординатна измервателна глава (ТИГ), чрез която се осъществява контактно измервателно взаимодействие с измервания обект. Най-разпространените и евтини конструкции на ТИГ използват кинематична съпротивителна система (КСС), която генерира измервателен сигнал при прекъсване на вътрешна електрическа верига.

Известните измервателни глави обаче имат съществен метрологичен недостатък, който се изразява в това, че измервателният сигнал се генерира със закъснение след момента на докосване на обекта. В резултат възниква сравнително голяма и нееднаква зона на нечувствителност при измервания в равнината XY (перпендикулярна на оста на измервателния накрайник). За преодоляване на този недостатък може да се приложи калибриране, но то има ограничени възможности при ММ с ЦПУ и влошава производителността. Известните по-точни модели на ТИГ, използващи друг измервателен принцип, са неколкократно по-скъпи и обикновено са по-подходящи за специалните работни условия, характерни при КИМ.

Създаването на ТИГ с по-добри метрологични параметри, при това на по-ниска цена от предлаганите на световния пазар, е изключително актуална задача, осбено като се отчете широкото използване на машините с ЦПУ.

2. ЦЕЛ И ЗАДАЧИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД.

Целта на дисертационния труд е **да се повиши ефективността на координатните измервания, а с това и експлоатацията на обработващи центри, чрез разработване и изследване на нова конструкция трикоординатна измервателна глава с подобрени метрологични характеристики**.

За постигане на целта е необходимо да се решат следните основни задачи:

1. Да се изследват и анализират факторите, влияещи върху точността на известните конструкции трикоординатни измервателни глави с кинематична съпротивителна система.

2. Да се разработи и обоснове нова конструкция на трикоординатна измервателна глава с подобрени метрологични характеристики.

3. Да се изследва и оптимизира влиянието на основни параметри върху точността на новата измервателна глава.

4. Да се изследват възможностите за повишаване точността на измерванията с трикоординатна измервателна глава.

3. НАУЧНА ЗНАЧИМОСТ И НОВОСТ

Предложена е приципно различна схема на базиране на подвижния елемент, която осигурява няколко важни метрологични предимства в сравнение с известната в света.

Съгласно нея, в графичната CAD среда на SolidWorks, е разработена принципно нова конструкция на ТИГ, различаваща се от известните образци.

Разработени са теоретичи модели и са изведени зависимости за определяне на връзката между големината на измервателната сила и зоната на нечувствителност за всички възможни посоки при измерване в равнината XY с глави RENISHAW MP3 и новата РУ.

Експериментално е доказано, че при измервания в равнината XY с новата ТИГ е получено 4 пъти по-малко колебание на зоната на нечувствителност (мъртвия ход) в сравнение с MP3.

Получени са теоретични и експериментални резултати за влиянието на основни параметри на главата, които са използвани за оптимизиране на конструкцията и подобряване на експлоатационните й качества.

Разработени са алгоритми и макропрограми за опростено калибриране на новата ТИГ, с цел повишаване точността на измерванията.

4. ПРАКТИЧЕСКА ПОЛЕЗНОСТ И ПРИЛОЖИМОСТ

Създадено е специално приспособление, което позволява тариране силата на пружината и установка за експериментални изследвания на измервателната сила.

Получени са резултати за влиянието на конструктивни и динамични параметри, позволяващи намаляване на силата при измерване.

Работни образци на измервателната глава са внедрени и работят успешно и надеждно в производствените условия на фирмите “Atlas Copco Lifton”, “ГРИФОН 11”, “ПИХ Индъстри” Русе и др.

5. АПРОБАЦИЯ НА РАБОТАТА

Основните резултати, получени при разработване на дисертацията, както и отделни части от нея, са включени в рецензирани отчети по теми на Фонд научни изследвания на РУ „Ан. Кънчев”през 2009 и 2010г. Докладвани и обсъждани са пред Катедрен съвет и на:

- XX Congress of Chemists and Technologists of Macedonia, Oxrid, 2008г.;
- Научни конференции на РУ&СУ, Русе, 2010 и 2011г.;
- Национална конференция «Машиностроене и машинознание», Варна, 2010г.

6. ПУБЛИКАЦИИ

Основните резултати по дисертационния труд са отразени в 4 публикации. От тях една е самостоятелна и една е на английски език.

7. ОБЕМ И СТРУКТУРА НА ДИСЕРТАЦИЯТА

Дисертационният труд е с обем 157 страници и приложения (22 стр.). Състои от литературен обзор, основни етапи на работата, представени в пет глави, списък на цитираната литература – 73 заглавия и Интернет адреси – 15. Дисертацията съдържа 77 фигури, 9 таблици в изложението и 20 таблици в приложенията. Номерата на включените в автореферата фигури, таблици и изрази съвпадат с тези в дисертационния труд.

СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. СЪСТОЯНИЕ НА ВЪПРОСА.

Разгледани са възможностите, особеностите и техническите средства за координатни измервания в машиностроенето. Анализирани и обобщени са основните изисквания към трикоординатни измервателни глави (ТИГ) за осъществяване на координатни измервания (КИ) върху обработващи центри (ОЦ). Изяснени са видовете и източниците на грешки и са разгледани съществуващите възможности за тяхното ограничаване. В заключение може да се обобщи и да се формулира следното:

1. Координатните измервания имат големи възможности по отношение на универсалността, надеждността и автоматизацията на размерните измервания в машиностроенето.

2. Използването на координатни измервания при обработващите центри осигурява повишаване на точността, производителността и надеждността на технологичния процес. Времето за настройване и контрол се намалява над два пъти, а относителното машинно време се увеличава с около 50% - от 55% нараства до 80%.

3. Като основен съставен елемент на системата за координатни измервания ТИГ със своята точност оказва значимо влияние на сумарната точност на системата.

4. Моделите на ТИГ от всички производители, използващи кинематична съпротивителна система имат сравнително висока цена и се характеризират със значителни по големина случайни (около 42% от сумарната случайна грешка на системата за КИ) и систематични грешки, съизмерими и дори по-големи от тези на останалите компоненти на измервателната система.

5. Големият размах (5÷8μm) на систематичната законопроменлива заедно със случайната грешка на ТИГ с КСС внася неопределеност и създава затруднения при реализиране на разнопосочни и срещуположни измервания, каквито често се налага да се извършват на ОЦ.

6. Не са известни модели на контктни ТИГ, които съчетават ниска цена, достатъчна точност и подходящи експлоатационни характеристики за приложение на обработващи центри.

7. Разработените измервателни глави, използващи някакъв друг принцип вместо кинематична съпротивителна система, увеличават точността на измерване. Предлаганите модели обаче са с над 2-3 пъти по-висока себестойност спрямо тези с КСС и още по-голяма зависимост от околната среда. Освен това най-добрите от гледна точка на точността решения не са достатъчно подходящи за приложение на металорежещи машини с ЦПУ.

8. Използването на калибриране за компенсиране на систематичните грешки за голям брой посоки (точки) на кинематично съпротивителни глави тип МРЗ има ограничено приложение при обработващи центри.

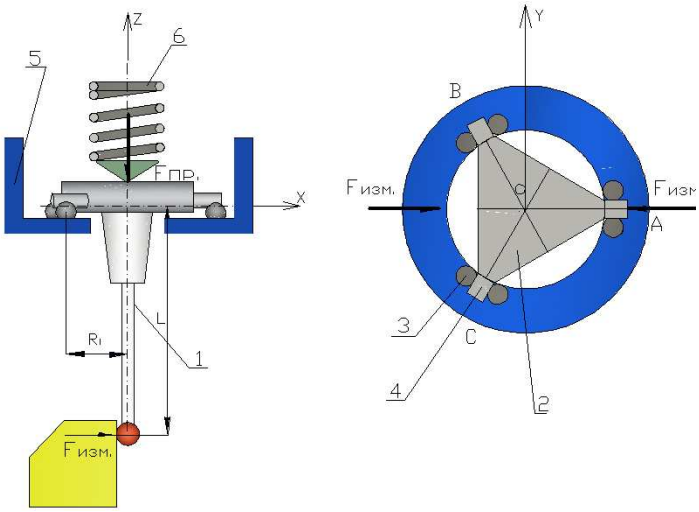
9. Не са открити публикации на модели и зависимости, които достатъчно подробно да описват причините и връзката между изменението на измервателната сила в равнината ОХУ и зоната на нечувствителност на ТИГ.

10. Необходимо е да се изследва влиянието на конструктивно – механичните параметри на базиращата система при ТИГ RENISHAW MP3 за получаваната неблагоприятна метрологична характеристика.

11. За повишаване точността на системата за координатни измервания, реализирана при специфичните условия на обработващите центри е необходима измервателна глава с по-малко колебание на измервателното усилие и зоната на нечувствителност в радиално направление.

2. ИЗСЛЕДВАНЕ ТОЧНОСТТА НА ТИГ, РАБОТЕЩА С КИНЕМАТИЧНА СЪПРОТИВИТЕЛНА СИСТЕМА

Съществена част от задачите, решавани чрез КИ с ТИГ върху ОЦ са в равнината XY. Във връзка с това се налага определянето на грешките, генерирани от ТИГ в тази равнината За установяване произхода и големината на систематичната закономерна грешка ($g_{тиг}$) и систематичната постоянна грешка ($\Delta_{тиг}$) е приложен статичен силов анализ, съгласно [36], на състоянието "измерване"(фиг.2.1) на ТИГ с кинематично съпротивителна система (RENISHAW модел MP3).



Фиг.2.1 ТИГ с кинематична съпротивителна система в начален момент на изпълнение на състояние "измерване"

Разглежда се идеализиран теоретичен модел на механизма на ТИГ, в който всичките му елементи са идеално твърди тела, без отклонения в размерите, формата и разположението. Приема се и, че в модела не действат сили и моменти на триене. На фигурата, илюстрираща модела са представени само основните конструктивни елементи, имащи отношение към разглеждания въпрос.

Неподвижната базова група е оформена в корпуса 5 като цилиндричен пръстен, към който по окръжност са закрепени неподвижно шест сферични тела (сачми 3), които са групирани в три двойки през 120°. Всяка двойка сачми оформя базова призма със сферични стени.

Подвижната базова група включва тяло 2 с форма на равностранен триъгълник с върхове ABC. При върховете му са установени радиално три иглени ролки 4, така че мислените продължения на осите им да се пресичат в една точка, представляваща медицентъра на триъгълника. Подвижният елемент е базиран чрез иглените ролки спрямо трите призми на неподвижния елемент в общо шест точки.

За пружината 6 в разглеждания модел се приема, че задава единствено и само **пружинната сила $F_{пр}$** с приложна точка в центъра на подвижната база и посока, насочена по оста на осезателя. **Накрайникът** 1 с дължина L завършва със сферична форма с осезател при върха и се разглежда като монолитна част от подвижната база.

Въведена е координатна система 0XYZ като се приема, че шестте базови точки лежат в една обща равнина, определена от оси X и Y. Центърът на координатната система съвпада с оста на накрайника, ос X съвпада с оста на базираната към неподвижните опори AA иглена ролка, а ос Z е с положителна посока срещу пружинната сила $F_{пр}$. С $F_{изм}$ е означен векторът на силата, представяща реакцията от взаимодействието на накрайника с измервания обект в контактната му точка при измерване, достатъчна за да се генерира измервателен сигнал (SKIP). Тя е успоредна на равнината XY и е насочена нормално спрямо оста на осезателя. Подвижната базова група се разглежда като идеално твърдо тяло - лост, чиято опори са точките на базиране. В двата края на лоста действат силите $F_{пр}$ и $F_{изм}$ (фиг.2.1) и създават въртящи моменти с противоположни посоки. При анализа се приема, че лостът се намира все още в равновесие, в състояние преди да започне завъртане, водещо до нарушаване на базирането в поне една от шестте базови точки.

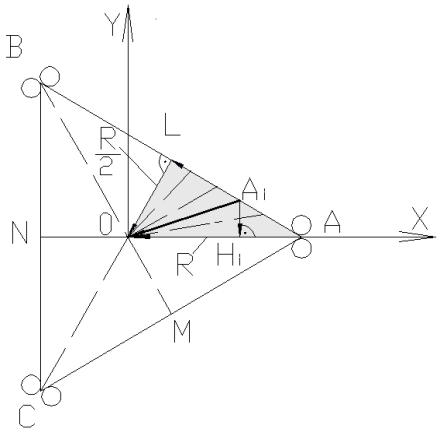
Графичен модел на състояние измерване в равнината XY

За изследване на всички възможни измервания в равнината XY) може да се се използва построението от фиг.2.3. На него е означен равностранният триъгълник ABC от фиг.2.1 при "поглед отгоре" на механизма на ТИГ (RENISHAW MP3). В множеството правоъгълни триъгълници A_iOL хипотенузата A_iO е променлива по големина отсечка и представлява текущата дължина на едното рамо от лостовата система. $R_i = A_iO$. Следователно за радиуса R_i е в сила неравенството: $OL \le R_i \le AO$.

И тъй като в правоъгълния триъгълник AOL ъгълът OAL=60°, следва че AO = 2.OL, а след заместване в неравенството се получава: $OL \le R_i \le 2.OL$

Тъй като измерванията и съответно измервателната сила може да има различни посоки в равнината XY е необходимо да се изведе обобщена зависимост за R_i, отчитаща посоката на въздействие.

$$R_i = OA_i = \frac{OL}{\cos(60^\circ - AOA_i)} \qquad (2.4)$$



Фиг.2.3 Графичен силов модел на MP3

Изменението на големината на рамото има периодичен характер и се описва с периодична тригонометрична функция. За анализиране на вариантите, когато измервателна сила е действаща в различни посоки на равнината XY може да се използва построението от фиг.2.3. Разглеждат се правоъгълните триъгълници от типа AOL и A_iOL. Приема се отсечката AiO да е единица мярка на измервателната сила, когато тя съвпада с ос OX и е насочена към центъра O на триъгълника.

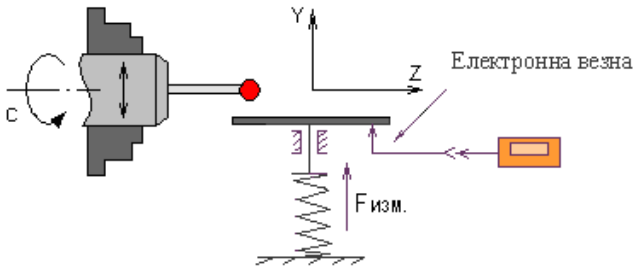
В получения графичен силов модел векторът на силата $\overrightarrow{A_iO}$ може да се редуцира и се разглежда като сума от съставни. Едната от тях ($\overrightarrow{H_iO}$) е проекцията му OA върху оста X, а другата $\overrightarrow{A_iH_i}$ е нормална на оста X. Тъй като проекцията $\overrightarrow{H_iO}$ е по-малка от силата $\overrightarrow{A_iO}$, то тази проекция не е в състояние да създаде достатъчно голям въртящ момент за да се завърти подвижната база спрямо опори A. Ако силата $\overrightarrow{A_iO}$ се представи като сума от проекциите й $\overrightarrow{LO}$ върху височината OL и $\overrightarrow{A_iL}$ върху страната AB се установява, че проекцията $\overrightarrow{LO}$ винаги има една и съща достатъчна големина за да се завърти подвижната база спрямо ос през опорите AB. Съгласно схемата от фиг.2.3 силата $\overrightarrow{A_iO}$ се променя в границите: $\overrightarrow{LO} \le \overrightarrow{A_iO} \le \overrightarrow{AO}$. От схемата, съгласно приетата единица мярка и въведените по-горе означения за силата при измерване Fизм.i за границите й на изменение може да се запише:

$$F_{изм.min} \le F_{изм.i} \le F_{изм.max}. \qquad F_{изм.min} \le F_{изм.i} \le 2.F_{изм.min}. \qquad (2.5)$$

Експериментално изследване на състояние измерване

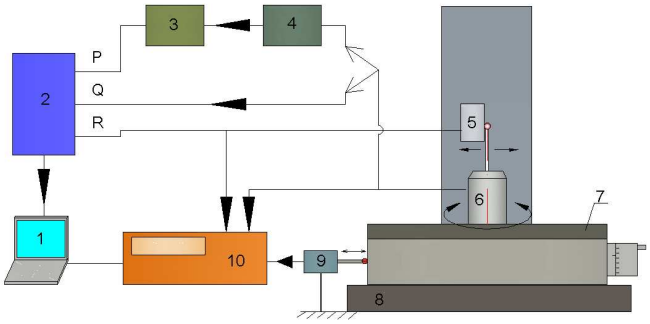
Проведен е експеримент в две части. Първоначално с помощта на опитната установка показана на фиг.2.5 е изследвана зависимостта на силата Fизм.i от посоката на измерване. Измервателната глава MP3 [69] със стоманен накрайник с дължина L=50mm е установена чрез тричелюстен патронник към масата на ОЦ MC032, така че оста й да бъде в хоризонтално положение (успоредно на ос Z на машината).

За отчитане на измервателното усилие, в ролята на силомер, върху корпуса на машината е поставена прецизна електронна везна, която предварително е тарирана с помощта на работен еталон. Измервателното преместване се осъществява чрез подавателно движение по ос Y със супорта на машината и подавателна скорост 3mm/min, създаваща условия на измерване максимално близки до статичните. При възникване на измервателен сигнал SKIP от ТИГ движението се преустановява и се отчита показанието на везната, а резултатът се записва. Изпълняват се по пет повторения във всяка посока (точка). След това със завъртане на масата по ос C през 15° е изследван целия работен диапазон в равнината XY. За проверка на повторяемостта се изпълняват пет серии при същите условия. Останалите условия включват ориентирано начално ъглово положение на ТИГ, големина на силата Fпр=3.5N, времезадържане (пауза) за отчитане 5s и отдръпване със скорост 2.5m/min;



Фиг.2.5 Изследване на измервателната сила в равнината XY

На получените статистически данни от проведеното изследване във всяка серия, е направено първоначално обработване с помощта на статистическо приложение на Microsoft Office Excel 2003. За центъра на групиране във всяка посока (точка) е изчислена средноаритметичната стойност. По изчислените средни стойности е построена графика под формата на кръглограма (фиг.2.7). Като характеристика на разсейването за целия диапазон са определени граничните стойности, размахът, средноквадратичното отклонение и поле на разсейване с дверителен интервал 6s. По изчислените средни стойности е пресметната средната голе-мина на силата $F_{изм.i}$ за целия диапазон.

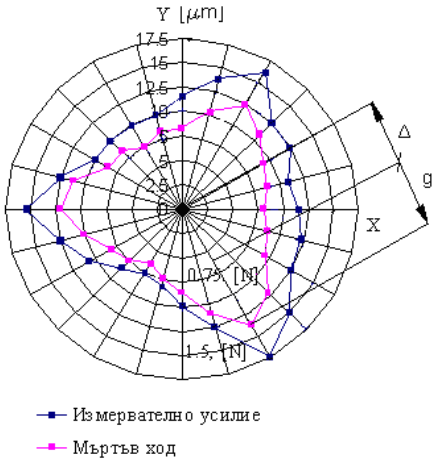


Фиг.2.6 Установка за установяване на зоната на нечувствителност

Вторият експеримент е проведен с помощта на специално създадена установка (фиг.2.6) за изследване на зоната на нечувствителност в статичен режим. Установката е използван инструменталенния микроскоп 8. Поради недостатъчната разделителна способност на измервателната система на микроскопа е вградена микрометрична система. Тя е съставена от фоторастеров линеен преобразувател 9 (сонда HEIDENHAIN CT2501) и отчитащо устройство 10. Върху подвижната маса 7, с която може да се изпълняват транслационни и ротационни движения, е установена изследваната ТИГ 6. Измервателната глава е изолирана електрически спрямо масата 7. Металният упор 5, който служи за измерван обект, е закрепен към вертикалната колона и също е електрически изолиран. Измервателните премествания на ТИГ се осъществяват чрез завъртане на ръкохватката, управляваща микрометричния винт за съответното линейно преместване на масата. Чрез промяна на посоката на измерване през 15° с помощта на въртящата маса 7 се изследва целия работен диапазон на ТИГ в

равнината XY. Електрически изолираните един от друг упор 5 и ТИГ 6 са свързани в последователна верига. Това дава възможност да се формират два независими сигнала при измерване. Първият възниква при докосване на накрайника до упора, а вторият възниква със закъснение, след прекъсване на кинематичната съпротивителна верига в ТИГ. Чрез сондата 9 и устройството 10 могат да се отчитат позициите, в които възникват сигналите. Разликата между тях представлява зоната на нечувствителност. Резултатите се записват в подходяща форма в компютъра 1. За да бъдат условията близки до статичните измервателните премествания се изпълняват с възможно най-ниска скорост. Електронните блокове 2 ,3 и 4 са необходими за изследване и на електрическите процеси в КСС.

Изследването е осъществено при същите условия както първото. На получените статистически данни от него във всяка серия е направено аналогично първоначално обработване. За центъра на групиране във всяка посока (точка) е изчислена средноаритметичната стойност. По изчислените средни стойности е построена графика под формата на кръглограма (фиг.2.7). Като характеристика на разсейването за целия диапазон са определени граничните стойности, изчислен са размахът, средноквадратичното отклонение и полето на разсейване за доверителен интервал 6S.



Фиг. 2.7 RENISHAW MP3- измервателна сила и мъртъв ход в равнина XY.

При обработването на данните от двата експеримента са получени следните резултати:

- Отчетените минимална и максимална стойност на силата при измерване за целия диапазон са: **Fизм.min = 0.8N** и **Fизм.max = 1.7N**, а съотношението им е: **Fизм.max ≈ 2.Fизм.min**

Размахът е $\mathbf{R_F}$**=0.9N**, а средната стойност на силата в равнината XY е **Fизм.ср = 1.2N**

Пресметнато относително $\mathbf{R_F}$**/Fизм.ср = 0.9/1.2** представлява **75%**, което е показател за съществен метрологичен недостатък на MP3.

- За зоната на нечувствителност са получени следните резултати:

$$(\Delta_{тиг} + g_{тиг})_{max} = 13.5\mu m; \quad (\Delta_{тиг} + g_{тиг})_{min} = 6\mu m; \quad (\Delta_{тиг} + g_{тиг})_{ср} = 9.4\mu m$$

Границите на зоната на нечувствителност в целия дипазон спрямо изчислената средна стойност са **[-3.4μm; +4.1μm].**

Като оценка на неопределеността е изчислената средна големина на случайната грешка – средната неопределност за всички посоки на измерване в равнината XY, която при вероятност 99.73% и съответен коефициент на покриване е: $\omega_{тиг} = 6s \approx 2\mu m$

Графичното представяне на резултатите ясно показва, че сумарната грешка $\varepsilon_{\Sigma тиг}$ и силата на измерване Fизм имат периодичен закон на изменение с период 2/3π. Също така от анализа на графично представените данни се установява тяхното фазово съвпадане, вероятно корелационна връзка и правопропорционален по големина период на изменение. Следователно експериментално се потвърждава, че зоната на нечувствителност и горе описаните грешки са функция на действащите сили и реакции в базовите опори, т.е на конструкцията на механизма. Потвърждава се и отношението Fизм.max = 2.Fизм.min между максималната и минималната сила при измерване в равнина XY. Графиката на зоната на нечувствителност има контури,

близки до формата на равностранен триъгълник. При такава форма на графиката е възможна приблизително еднакво голяма зона на нечувствителност само за три двойки диаметрално срещуположни точки на измерване, като първата е при измерване по направление под ъгъл 30° спрямо абсцисата X. Останалите две двойки са изместени ъглово спрямо първата на 2/3π (120°).

Измерване по направление на ос Z

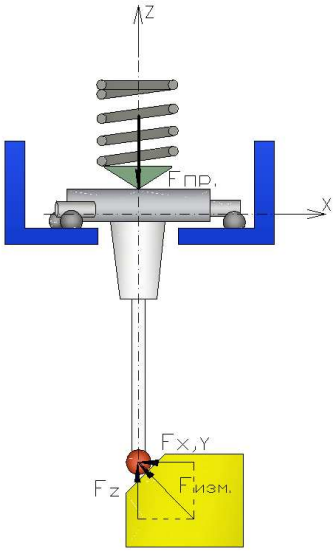
Когато действащата сила при измерване е с приложна точка в оста на на накрайника и посока, съвпадаща с тази на координатната ос Z и ако се пренебрегнат загубите от триене се получава: $F_{изм} = F_{пр}$. Установява се, че в този случай действащата измервателна сила ще е по-голяма от тази в равнината XY винаги когато: $L > R_i$, което обикновено се получава в лостовата система.

Пространствено измерване

При пространствено (3D) измерване (фиг.2.9) се прилага движение с нормален подход към повърхнината. Измервателната сила може да се разгледа като резултантна величина, получена от векторната сума на проекциите й по направление на ос Z и в равнината XY. В такъв случай първо се сравнява проекцията на измервателната сила по ос Z с пружинната сила. Възможни са два случая.

А) Когато е изпълнено условието $F_{X,Y} < F_z > F_{пр.}$

Щом проекцията F_z на измервателната сила по ос Z е по-голяма от пружинната сила $F_{пр.}$ и от проекцията $F_{X,Y}$ на измервателната сила в равнината XY, то основното преместване на подвижната базова група ще е по направление на оста на накрайника и посока, съвпадаща с положителната посока на оста Z.



Фиг.2.9 Измерване в пространството

Б) Когато проекцията на измервателната сила по ос Z е по-малка от пружинната сила и от проекцията на измервателната сила в равнината XY: $F_{X,Y} > F_Z < F_{пр.}$

Тогава основното преместване на подвижната базова група ще е завъртане спрямо опорите на лоста, но само ако проекцията на измервателната сила в равнината XY създава достатъчно голям момент, така както е разгледан аналогичния вариант, илюстриран с фиг.2.1 .

. **Изводи**

1. С помощта на графични модели е установена функционална тригонометрична зависимост с период 120° както на зоната на нечувствителност, така и на измервателната сила от ъгъла на измерване в равнина XY.

2. Експериментално, при изследване на ТИГ МРЗ, е установено значително колебание на измервателната сила в радиално направление. При средна стойност на силата 1,2N, колебанието й е в границите на 0,9N, което представлява 75%.

3. Експериментално е установено голямо колебание и на зоната на нечувствителност. При средна стойност 9,4 μm, колебанието й е в границите на 7,5 μm, т.е. около 80%.

4. При измерване по ос Z (вертикално по оста на накрайника предавателното отношение е 1:1) силата е по-голяма, приблизително равна на силата на пружината. Когато се измерват наклонени повърхнини, в зависимост от ъгъла на наклона са възможни две ситуации – завъртане на накрайника или осево преместване до прекъсване на контакта в базиращата система.

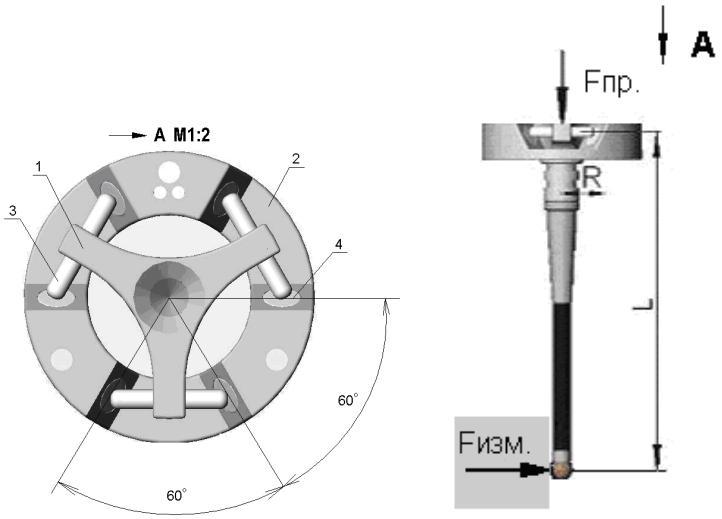
5. Изложените по-горе недостатъци на ТИГ с кинемтична съпротивителна система (RENISHAW MP3) откриват възможност за търсене на ново принципно решение на измервателната глава, с което да се намалят или отстранят посочените недостатъци.

3. РАЗРАБОТВАНЕ И ИЗСЛЕДВАНЕ ХАРАКТЕРИСТИКИТЕ НА НОВА КОНСТРУКЦИЯ ИЗМЕРВАТЕЛНА ГЛАВА

Въз основа на направения анализ на конструкцията на ТИГ с кинематична съпротивителна система (MP3) бе установено, че възникващата голяма неравномерност в зоната на нечувствителност е основен проблем и източник на неопределеност при осигуряване точността на измерванията. Получените теоретични и експериментални характеристики имат “триъгълна” форма, която значително се отличава от идеалната - кръгла. Причина за този проблем е характерната схема на разположение на подвижните базови елементи (цилиндрични ролки) и на неподвижните (сачми), създаващи групирано базиране на всяка ролка към двойка сачми по окръжност с интервал 2/3π. Следователно една от възможностите за подобряване на точностната характеристика на ТИГ е като се промени тази схема на базиране с друга, създаваща по-благоприятни условия на работа при измерване. Логично следствие от анализа е предположението, че е необходимо равномерно вместо групирано разполо-жение на базовите точки.

Нова конструкция на ТИГ

За преодоляване на изяснения проблем при базирането се предлага конструктивното решение на ТИГ, разработено от автора и реализирано в лабораторията по „Обработване на детайли на машини с ЦПУ” към кат. ТММРМ на РУ”А.Кънчев”. Основна идея и постижение в разработената нова, оригинална конструкция на ТИГ РУ е създаването на условия за равномерно разположение на базовите точки, възникващи между неподвижния и подвижния базов елемент. Това е постигнато като същевременно се запазва КСС и принципа за базиране в шест точки. При тази реализация обаче се променя както разположението, така и вида на контактните елементи, с които се осъществява.



Фиг.3.1 Основни детайли на нова конструкция ТИГ РУ

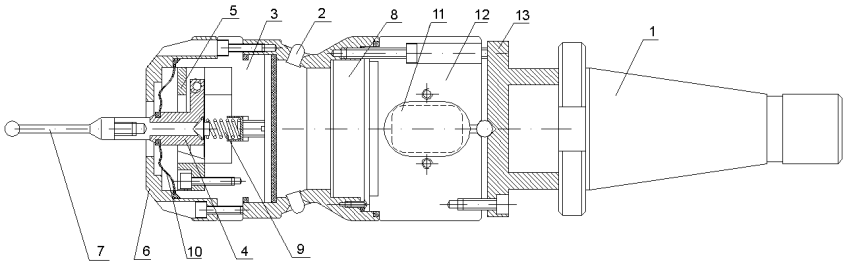
На фиг.3.1 са представени основните детайли в новата конструкция на ТИГ – базовият 2 и подвижният 1, като към последния чрез резбово съединение се закрепва накрайника с осезателя. И двата основни детайла са изработени от алуминиева сплав, осигуряваща едновременно ниско тегло и достатъчна коравина на конструкцията. Неподвижната база 2 е детайл, който има форма на къса цилиндрична втулка (гривна), която е закрепена неподвижно към корпуса на ТИГ. В гривната са оформени три радиални клиновидни канала с наклонени стени. Повърхнините на всяка двойка диаметрално срещуположни стени лежат в общи равнини. В определени точки,

нрмално на стените, са изработени гладки, глухи отвори. Точките, в които осите на тези отвори пресичат стените, са разположени равномерно по окръжност през 60°. Във всеки от отворите са сглобени къси, цилиндрични ролки базирани с челата си по дъната. Така всяка двойка къси ролки оформя с външните си чела равнинни наклонени стени – продължение на стените на един трапецовиден канал, т.е. оформя се базова призма. Подвижната база включва основен детайл 1 с форма на трилъчева звезда. Лъчите са радиални, равномерно ъглово раположени един от друг на 120°. Близо до външните краища на всеки от лъчите са изработени гладки, светли отвори. Направлението им е нормално спрямо лъчите (и тангенциално спрямо обща окръжност през точките на пресичане на осите на отворите с тези на лъчите), а осите им са разположени в една равнина. В тези отвори съответно са сглобени неподвижно три също тангенциално разположени, иглени ролки 3, така че краищата й да имат еднакъв излет. Челата им са със сферична форма с радиус равен на радиуса на цилиндричната част. Размерите и разположението на всички детайли осигурява контакт - **базиране на подвижния детайл в шест точки, равномерно разположени по окръжност със стъпка през 60°, при което той е лишен от всички степени на свобода**. Радиусът на тази окръжност е R=17mm. колкото е радиусът на окръжността, по която са разположени базовите точки в конструкцията на МРЗ.

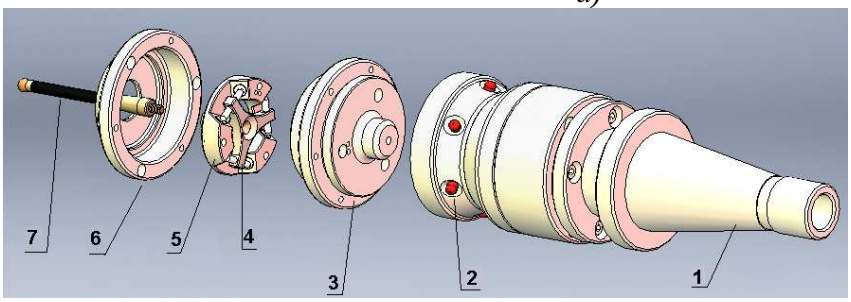
Върху повърхнините на пръстена, подвижната база и особено на отворите, в които се монтират цилиндричните и иглените ролки е нанесено високояко електроизолационно покритие. Така иглените и цилиндричните ролки са електрически изолирани. Същевременно, след добавяне в избрани места на електрически връзки между отделните двойки къси ролки, получените базови точки са свързани в нормално затворена, управляващата електрическа верига. С получената разновидност на разгледаната в предната глава при прекъсване в кой да е от шестте контакта се генерира управляващия сигнал SKIP. Предаването на този сигнал към системата за ЦПУ се осъществява със специален интерфейс и оптична връзка.

Друга важна особеност и предимство в разработената конструкция е осигуреният **постоянен ъгъл на наклон на призмите**. Той може да бъде проектиран по такъв начин, че да не оказва негативно влияние на движенията на подвижната базова група при изпълняване на етапа “установяване”. Така оформена, новата конструкция на ТИГ е значително по-независима както от точността на размерите на базовите елементи, така и от техния монтаж. Тя позволява прилагане на по-високи допуски на размерите и разположението. В резултат това й осигурява **предимство** спрямо традиционните модели **по критериите технологичност и себестойност**.

При разработ-ването на отделните детайли и цялостната конструкция на ТИГ е



а)



б)

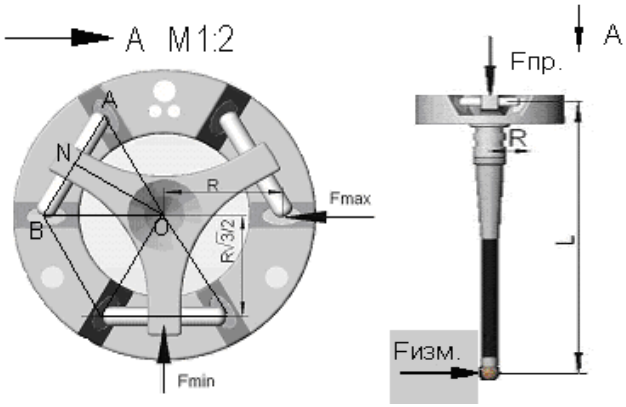
Фиг.3.2 Конструкция на ТИГ с нова схема на базиране

използвана графичната среда на SolidWorks. На фиг.3.2 конструкцията е показана във вариант, подходящ за установяване във вретеното на ОЦ. На сборния чертеж (фиг.3.2а) е показана цялостната конструкция, а чрез обемното изображение се открояват и някои от основните елементи на новото конструктивно решение. И на двете фигури с 1 е означен инструменталния дорник, 2 – оптична система за безкабелно предаване на измервателния сигнал, 3 – междинен корпусен елемент. Към него се установяват всички елементи от механичната система на ТИГ, 4 – подвижна базова група, 5 – неподвижна базова група (пръстен), 6 - капак, 7- накрайник с осезател, 8 – платка с интерфейс, 9 – пружина и система за регулиране на силата й, 10 – предпазно гумено уплътнение. Платката 8, както и електронният блок с батерията 11 се помещават в корпуса 12. ТИГ е свързана с дорника чрез адаптора 13, който позволява центроване положението на накрайника.

След експерименталния прототип са изработени промишлени образци, които са внедрени по различно време в редица фирми. За осезателите се използват материали с висока износоустойчивост и твърдост, напр. от металокерамика или синтетичен рубин. В съавторска разработка на сферичен осезател за ТИГ РУ се предлага една евтина алтернатива от т.нар. ситал. Основните характеристики на получените от ситал осезатели са висока твърдост и износоустойчивост, ниска електропроводимост и магнитни свойства. С предпазна цел в накрайника е предвидено слабо звено, което трябва да се счупи при неправилно измервателно движение. В случая като такъв елемент е използвана цилиндрична тръбичка от закалено лабораторно стъкло.

Теоретично изследване на силата при измерване с новата глава.

Координатните измервания на обработващи центри се изпълняват основно в равнината XY, затова и се разглежда работата на ТИГ при тези условия. Чрез прилагане на статичен силов анализ [36] на състоянието "измерване", показано на фиг. 3.5, се установява връзката между големината и посоката на силата при измерване $F_{изм}$, силата на пружината $F_{пр}$, рамото R и дължината на накрайника L. За опростяване на модела се разглежда вариантът, при който механизмът е във вертикално положение. Така силата на теглото на подвижната базова група и на пружината са еднопосочни. Подвижната базова група се разглежда като идеално твърдо тяло. То изпълнява ролята на лост, чиито опорни точки са в точките на базиране. И в този случай, за да се изпълни статично условие за равновесие, се получава израз, аналогичен на цитирания в гл.2:



Фиг.3.5 ТИГ РУ с равномерно разположени бази в състояние "измерване"

$$F_{изм} .L = F_{пр}.R, \quad (3.1)$$

След преобразуване и анализ на получения израз се установява, че при константни $F_{пр.}$ и L, текущата стойност на $F_{изм.i}$ е пропорционална на R_i:

$$F_{изм.i} = F_{пр}.R_i/L \quad (3.2)$$

При последващия анализ на конструкцията може да се приложи графичен модел (фиг.3.10.б), аналогичен на модела на кинематичната система на ТИГ RENISHAW, описващ изменението на дължината на рамото R_i и съответно промяната в предавателното отношение на лостовата система. Правилният шестоъгълник

ABCDEF е построен, така че върховете му да съвпадат с всички базови точки на механизма при поглед отгоре (изглед А на фиг.3.5). Въз основа на направените теоретични анализи в гл.2 и по-горе гл.3 на лостовата система за всяка от двете конструкции на ТИГ може да се направи съпоставяне на теоретичните раменни модели и характеристики при осъществяване на състояние измерване (фиг.3.11).

$R_i = OA_i = \frac{OL}{\cos(60^\circ - AOA_i)}$ (за фиг.3.10а); $R_i = OA_i = \frac{ON}{\cos(30^\circ - AOA_i)}$ (за фиг.3.10б).

Може да се изчислят и разликите в дължините на рамото за всяка от конструкциите:

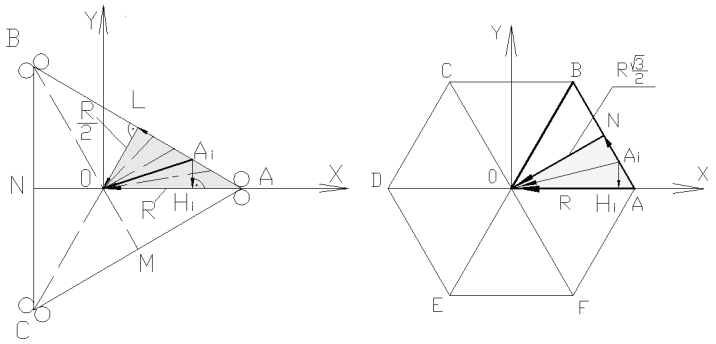
$R_{max} - R_{min} = 0.5R$ (50% за ТИГ МР2);$R_{max} - R_{min} = 0.13R$ (13% за ТИГ РУ)

При сравняването им се вижда, че разликата за ТИГ РУ е около 4 пъти по-малка от тази за RENISHAW. От получения израз и графиката за ТИГ РУ се установява и това, че периодът на изменение на R_i е $\pi/3$ и има четен брой екстремуми за целия диапазонв равнината XY. Последното е основание да се формулира твърдението, че за всеки две диаметрално срещуположни измервания зоните на нечувствителност са еднакво големи. Този факт има голяма практическа стойност при осъществяване на две срещуположни измервания, каквито са голяма част от възникващите измервателни задачи на ОЦ.

Използвайки подобието с МР3 може да се построи и силовия модел на ТИГ РУ. Както и в геометричния модел се получава периодичност $\pi/3$, а силата $\overrightarrow{A_iO}$ има шест максимума по направление на диагоналите в шестоъгълника и минимуми по височините към страните. Следователно силата $\overrightarrow{A_iO}$ ще се променя в границите:

$\overrightarrow{NO} \le \overrightarrow{A_iO} \le \overrightarrow{AO}$

След съпоставянето на двата силови моделаа (фиг.3.10) и на изведените изрази: $F_{изм.min} \le F_{изм.iМР3} \le 2.F_{изм.min}$; $F_{изм.min} \le F_{изм.i,РУ} \le 1{,}15.F_{изм.min}$ се вижда, че при еднакви условия за двете ТИГ (пружинна сила Fпр., размер на разположение на опорите R и дължина на накрайника L) колебанието на силата при измерване за ТИГ РУ е почти 7 пъти по-малко от съответните на МР3. В гл. 2 за МР3 бе експериментално потвърдена установената връзка между изменението на зоната на нечувствителност и изменението на силата при измерване. В такъв случай като се има предвид сходството в принципа на работа между двете конструкции логично е да се предположи, че зоната на нечувствителност за ТИГ РУ ще бъде формирана по аналогични причини и зависимост както за МР3.



а) *б)*

Фиг.3.10 Съпоставяне на силовите модели – а) RENISHAW МР3, б) ТИГ РУ

Експериментално изследване на новата ТИГ

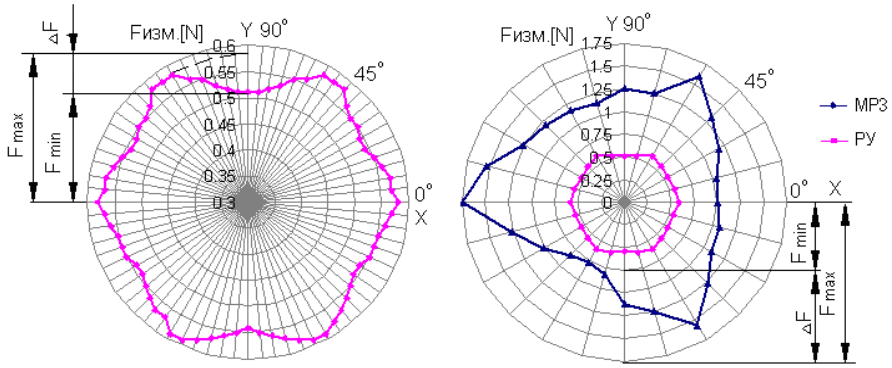
Експериментът, аналогично както и този при изследването на ТИГ RENISHAW, включва две части. Те имат за цел за установяване на основните характеристики на измервателната глава при работа в равнината XY:

1) Големината и изменението на измервателната сила;

2) Големината и изменението на зоната на нечувствителност.

<u>Първият експеримент</u> е за проверка на теоретично установената връзка между R, L, $F_{пр}$ и $F_{изм}$, получена от зависимост (3). За целта е използвана същата опитна установка и условия, както за изпитване на RENISHAW (фиг.2.5). Разлика има в големината на пружинната сила, броя на контролните точки, броя на повторенията и броя на сериите.

Тези разлики се дължат на факта, че ТИГ РУ работи надеждно с по-малка измервателна сила, а с цел по-подробното изследване на ТИГ контролните точки (през 5°) са трикратно повече. Във всяка контролна точка са направени по 5 повторни измервания в 5 серии. На получените статистически данни от проведеното изследване във всяка серия е изчислена средната стойност за всяка от контролните точки. Получените резултати от всяка серия са обработени статистически с помощта на статистическо приложение на Microsoft Office Excel 2003. Изчислени са средната стойност за всяка контролна точка (фиг.3.11 а) и средноквадратичното отклонение, а също и обобщената средна стойност за равнината XY. Разликата между двете глави е очевидна при еднакъв мащаб (фиг.3.11 а). За оценка на случайната грешка е пресметнато полето на разсейване за доверителен интервал 6.s.



а) *б)*

Фиг.3.11 Измервателно усилие в равнината XY – а) наТИГ РУ; б) на МРЗ и РУ

<u>За втория експеримент</u> експерименталната установка (фиг.2.6) и условията на провеждане и процедурите са същите както при аналогичния експеримент (гл.2, т.2.3) с ТИГ МРЗ. Разлика има в големината на пружинната сила, броя на контролните точки и на повторенията. Броят на контролните точки е три пъти по-голям за да се получи по-прецизна характеристика. В случая измерванията за целия работен диапазон в равнината XY се осъществяват след завъртане на ТИГ през 5° вместо през 15°. За по-коректно отчитане влиянието на случайната грешка повторенията и сериите във всяка точка са десет.

Обработване и анализ на получените експериментални резултати

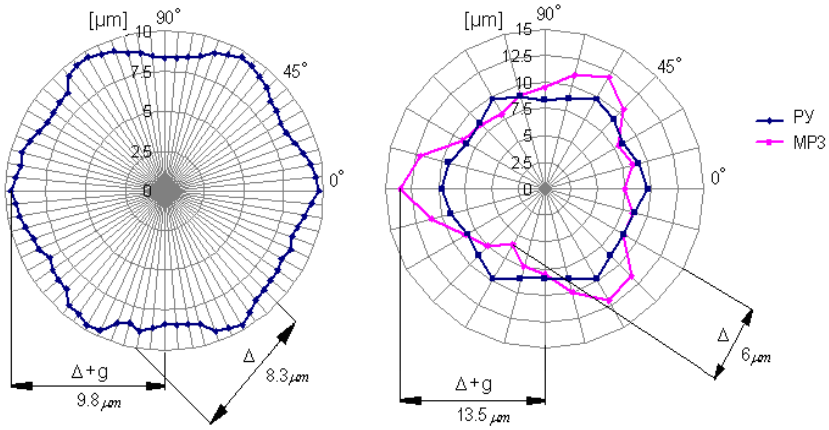
Приема се за вярно твърдението и не се проверява хипотезата, че получените статистически данни от проведеното изследване са с нормално разпределение. Те са обработени с помощта на статистическото приложение на Microsoft Office Excel 2003. Някои от получените резултати се използват като количествени оценки на неопределеността, внасяна от ТИГ.

1) За центъра на групиране във всяка посока (точка) на равнината XY, за всяка j серия, е изчислена средноаритметичната стойност $\overline{Y_j}$ от n измервания (n повторения);

2) Получените средни стойности от всяка серия също са обработени статистически;

3) За центъра на групиране във всяка посока (точка) е изчислена средноаритметичната стойност $\overline{\overline{Y}}$ от средноаретметичните стойности на m серии;

4) По изчислените средни стойности е построена графика под формата на кръглограма (фиг.12 а), сравнена с тази на МРЗ (фиг.3.12,б)



а) *б)*

Фиг.3.12 Зона на нечувствителност в равнината XY
а) наТИГ РУ; б) RENISHAW МРЗ и РУ

5) Като характеристика на неопределеността (зоната на нечувствителност) във всяка точка (посока α_i) за целия диапазон:

- определени са граничните стойности и е изчислен размахът:

$$R_{Y_\alpha} = \overline{Y}max - \overline{Y}min$$

- получена е оценката на средноквадратичната неопределеност чрез изчисленото средноквадратично отклонение:

$$u_C(y) = S(Y_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\overline{Y_j} - \overline{\overline{Y}})^2}{n-1}}$$

6) За оценка на разширената неопределеност (по стандарта GUM) във всяка точка i (посока) е пресметнато полето на расейване при доверителен интервал

$\omega_i = 6.S_i$, и вероятност 99.73%

$U_i = k.u_C(y) = \omega_i = \pm 3.S_i$,

7) За оценка на неопределеността в целия диапазон на равнната XY е пресметната средноаритметичната неопределеност $\overline{\omega}_{тиг} = 1.1\mu m$ от полетата на разсейване във всички точки.

8) На получените експериментални данни също така е направена и проверка за откриване на груби грешки. Първоначално проверката е реализирана само за определени групи данни. Избрани са групите с най-голямо разсейване по оценката на средноквадратичното им отклонение. Това са групите с най-голямо изчислено средноквадратично отклонение. За проверка е използван варианционният критерий на Диксон. Той е удобен и достатъчно мощен за целта:

$$KD = (Y_n - Y_{n-1})/(Y_n - Y_1) < Z_q = 0.4 < Z_q = 0.53,$$

където KD е изчисленият коефицент по критерия на Диксон;
$Y_1, \ldots, Y_{n-1}, Y_n$ – вариационият ред на данните;
Y_n - прверяваният член от вариационния ред;
Z_q - критичната стойност на критерия според съответния брой елементи в реда.

За потвърждаване на първия резултат (втора проверка) е използван и критерият на Романовски, който е удобен за данни с до 20 елемента:

$$KR = \left|\frac{\overline{Y} - Y_i}{S}\right| = 1.56 < \beta_{\alpha,n} = 2.62,$$

където $KR = \beta$ е изчисленият коефициент по критерия на Романовски;

$\overline{Y}$ - оценката на средната стойност (изчислената средноаритметична стойност на вариационния ред);

Y_i - проверяваната стойност;

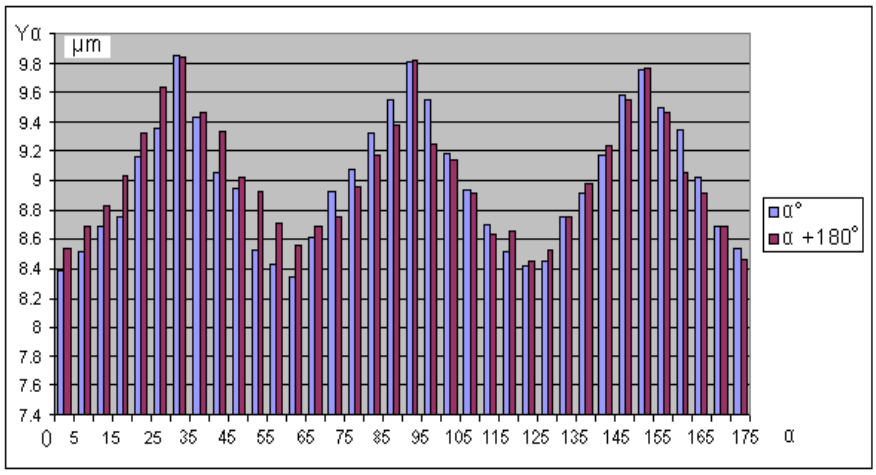
S - средноквадратичното отклонение;

$\beta_{\alpha,n,}$ - критичната стойност.

Заключение: И с двата критерия бе установено, че сред проверяваните стойности на избраните вариационни редове няма такива, които следва да бъдат изключени като груби грешки. Априорно следва да се приеме, че това важи и за всички останали редове от експеримента.

9) За проверка на хипотезата за възможни срещуположни измервания е необходимо да се направи оценка на точността им като се определи каква може да бъде очакваната неопределеност. На фиг.3.13 са представени графично данните, получени от експеримента.

Стойностите за зоната на нечувствителност, в случая са комбинирани по двойки срещуположни точки.



Фиг.3.13 Зона на нечувствителност на срещуположни точки

За оценка на неопределеността $U_{\alpha,\alpha+180}$ при срещупосочни измервания са изчислени:

9.1) Абсолютните разлики между зоните на нечувствителност на всяка двойка срещуположни точки: $\Delta_{i,Y,\alpha} = \left|Y_\alpha - Y_{\alpha+180}\right|$;

9.2) Средната стойност $\overline{\Delta} = 0{,}1\mu m$ от разликите на всички *n* двойки срещуположни точки (в случая n=36);

9.3) Средно квадратичната неопределеност на средните стойности

$u_{S_\Delta} = S_\Delta = 0{,}1\mu$,

Следователно неопределеността при срещупосочни измервания ще се формира от средната разлика между нечувствителността в две срещупосочни измервания, която е 0.1μm, и доверителния интервал при вероятност 99,73% , който е ±0,3 μm при съответния коефициент на покриване, т.е $U_{\alpha,\alpha+180}$ = 0,1±0,3 μm.

10**)** Проверка за установяване на евентуална корелационната зависимост Y=f(F) между зоната на нечувствителност Y и силата при измерване F като за целта е приложен корелационен анализ. При предполагаема линейна зависимост между тях от вида $Y=b_0+b_1F$, степентта на близост помежду им се определя чрез оценка на коефициента на корелация:

$$r = \frac{\overline{F.Y} - \overline{F}.\overline{Y}}{S_F.S_Y} \approx 0{,}84,$$

където F_i е големината на силата при измерване в i –тата точка;

Y_i –големината на зоната на нечувствителност при измерване в i –тата точка;

$\overline{F.Y}$ - средноаритметичното на произведенията на F_i и Y_i;

$\overline{F}$ - средноаритметичното на силата при измерване в равнината XY;

$\overline{Y}$ - средноаритметичното на зона на нечувствителност

S_F - средноквадратичното на силата при измерване в равнината XY;

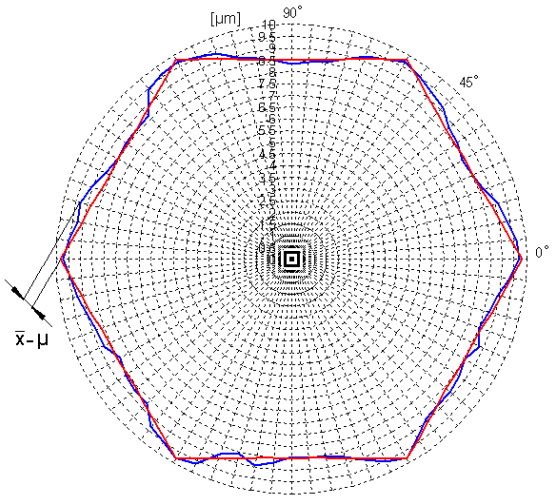
S_Y - средноквадратичното на зона на нечувствителност при измерване в равнината XY;

При оценка на получения резултат и вземане на решение се установява, че изчислената стойност r=0,84 е в граници [0.7, +1]. Това определя взаимовръзката между Y и F като “много силна”. Получената оценка-заключение потвърждава предположението за “фазово” съвпадане и “пропорционалност” между изменението на силата при измерване и зоната на нечувствителност. Логично следствие на това е стремежът към осигуряване на условия за работа с по-малка измервателна сила.

11) Получените опитни резултати за зоната на нечувствителност на ТИГ са сравнени с теоретичните стойности. За тяхното онагледяване са използвани двете кръглограми на фиг.3.15. Правилният шестоъгълник (графиката в червен цвят) е построени по стойностите, изчислени с теоретично изведената зависимост (4). Със син цвят е построена графиката по усреднените резултати – действителните стойности (центрове на групиране) от експеримента. Тя ограничава експериментално установената зона на нечувствителност.

Както от теоретичните и експерименталните данни, така и с помощта на графиките, може да се определят получените отклонения на центрите на групиране $\overline{X}$ от измерванията спрямо теоретичните стойности μ .

11.1)Тези отклонения може да се оценят чрез относителната грешка:



Фиг.3.15 Зона на нечувствителност на ТИГ РУ
Теоретична (червена) и експериментална (синя)

$$Xer = \frac{|\overline{X} - \mu|}{\mu} = \frac{|9.29 - 8.79|}{8.79} \approx 0.06,$$

където μ са истинските стойности (математ. очакване), получени с израза (3.4).

$\overline{X}$ - изчислената средна стойност на центрите на групиране.

Избрани са стойностите за точката с най-голямо изчислено стандартно отклонение.

11.2) Друг критерий за оценка може да бъде коефициентът на вариация, определен за вариационния ред с най-голямо средно квадратично отклонение S:

$$RSD = \frac{S}{\overline{X}}.100 = \frac{0.25}{8.51} = 3\%$$

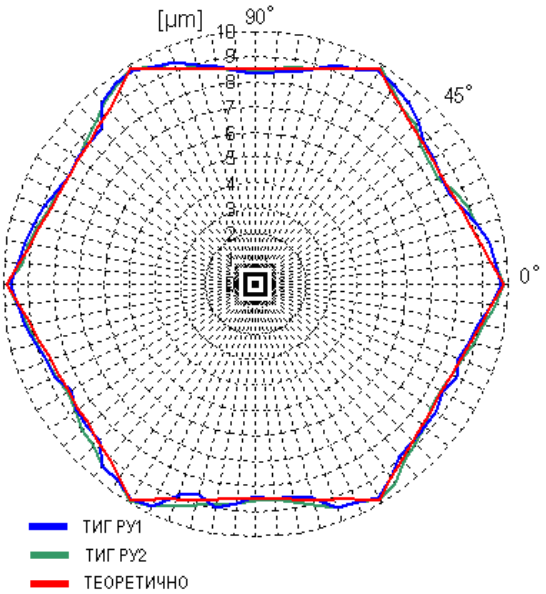
За повечето от останалите редове коефициентът на вариация е около 2% и по-малък.

На фигурата с $\overline{X} - \mu$ е означена максималната получена разлика (максимален размах) между експериметалната и теоретично изчислената стойност.

$R_{max} = \overline{X} - \mu = 0.41\mu.$

Като обобщение на анализа от получените стойности за относителната грешка и за коефициента на вариация може да се приеме, че те показват малка относителна грешка и ниска степен на вариация за изследвания критичен ред. Последното може да се приеме за положителна количествена оценка на съвпадането на експерименталните с теоретичните стойности. Това в достатъчна степен може да гарантира желаната възпроизводимост на резултатите при използване и на други образци на ТИГ.

12) Освен на до тук разгледания образец ТИГ РУ1 експериментално изследване на зоната на нечувствителност е направено и за още един образец ТИГ РУ2. Получените резултати за него са представени графично с кръглограма на фиг.3.16. За сравнение са добавени и кръглограмите от експерим-талното изследване на ТИГ РУ1 и от теоретичните пресмятания по зависимост (3.4). Въз основа на визуално графичното сравняване между ТИГ РУ1 и ТИГ РУ2 може да се заключи, че между двата образеца има висока степен на сходство в характеристиките им. Това дава основание да се приеме, че с новото конструктивно решение на ТИГ се осигурява нужната възпроизводимост и предвидимост на метрологичните й характеристики.



Фиг.3.16 Сравнение на зоните на нечувствителност

Изводи

1. Предложена и обоснована е нова оригинална схема за базиране, която осигурява равномерно ъглово разположение на базовите точки, за разлика от известните образци, при които се прилага т.н. групово базиране в по две двойки близко разположени точки през 120°.

2. Съгласно тази схема на базиране са конструирани изработени и изследвани няколко образци ТИГ, които осигуряват съществени предимства спрямо главите с кинематична съпротивителна система на световния лидер в тази област – RENISHAW.

3. Теоретично е доказана графична ъглова характеристика за силата на измерване и зоната на нечувствителност с форма на равностранен шестоъгълник. Тази форма е значително по-близка до желаната идеална – кръгла, в сравнение с “триъгълната” на RENISHAW.

4. Осигурената диаметрална срещуположност (близки стойности на срещуположните зони на нечувствителност) в целия диапазон при измерване в равнина 0XY с ТИГ РУ позволява отпадане на необходимостта от калибриране за половината от посоките на измерване.

5. Експериментално е потвърдена “шестоъгълната” форма на графиката за изменение на измервателната сила. При средна стойност на силата 0,54N разликата между максималната и минималната й стойност е 0,08N, което представлява около 13%. Или това колебание спрямо RENISHAW MP3 (75% вж. гл.2) е намалено процентно над 6 пъти. Освен това средната стойност на измервателната сила е намалена от 1,2N на 0,54N.

6. Също експериментално е установено, че разликата между максималната и минималната стойност на зоната на нечувствителност е 1,4μm, при средна стойност 9,8 μm, В процентно изражение тази разлика спрямо МРЗ (80%) означава намаляване над 6 пъти.

7. Получена е средноаритметична стойност на полето на разсейване на случайната грешка за целия диапазон (0°÷360°) 1,1μm, което е с около 25÷50% по-малко отколкото при измервателна глава МРЗ.

8. Експериментално е доказано и може да се приеме, че за всички диаметрално противоположни точки зоните на нечувствителност имат на практика еднаква големина с неопределеност в границите 0,1±0,3μm.

9. Като допълнително предимство на новата глава спрямо известните модели може да се посочи нейната технологичност, себестойност и надеждност.

4. ИЗСЛЕДВАНЕ ВЛИЯНИЕТО НА КОНСТРУКТИВНИ ПАРАМЕТРИ ВЪРХУ СИЛАТА НА ИЗМЕРВАНЕ

Изследване влиянието на ъгъла на неподвижната база за осигуряване на състояние „измерване”

Като се отчетат конструктивните особености на ТИГ РУ следва, че за изпълняването на всяко от работните състояния **(измерване, установяване, готовност)** се налагат *противоположни изисквания към силата на пружината*. Увеличаването на пружинната сила има и явно негативно влияние, тъй като води до нарастване на зоната на нечувствителност, намаляване точността на ТИГ и по-интензивно износвне. Следователно решаването на този проблем поставя задачата за определяне на минимална пружинна сила, която да е достатъчна за осигуряване на надеждно установяване и поддържане на готовност.

Определянето на минимална сила при измерване се свежда до решаване на задача от статиката [35], като за целта е разработен модел, показан на фиг.4.1 За него се прилага статично условие на равновесие на всички действащи сили и моменти. ТИГ е в състояние, съответстващо на готовност, т.е. не е настъпило нарушаване на базирането в нито една от шесте контактни точки – A,B,C,D,E,F, при което се отчита само силата на пружината. При измерване в посока +Z, съгласно теоретичния анализ от т.3, следва да се получи най-голяма измервателна сила за да се преодолее силата на пружината и съпротивителните сили на триене в контактните точки. Въвежда се пространствена, правоъгълна координатна система OXYZ в центъра на неподвижната база, като направлението на ос X съвпада с контактни точки A и D, ос Y е ос на симетрия за двойките точки B-C и E-F, а ос Z е по оста на накрайника с положителна посока срещу пружината. Всички шест контактни точки са равномерно разположени по окръжност с радиус r, лежат в равнината XY и са с координати:

$$(x_a = R\ ,\ y_a = 0,\ z_a = 0);\quad (x_b = \frac{R}{2},\ y_b = \frac{\sqrt{3}}{2},\ z_b = 0);\ (x_c = -\frac{R}{2},\ y_c = \frac{\sqrt{3}}{2}R,\ z_c = 0\ )$$

$$(x_d = -R, y_d = 0, z_d = 0);\ (x_e = -\frac{R}{2}, y_e = -\frac{\sqrt{3}}{2}R, z_e = 0);\ (x_f = \frac{R}{2}, y_f = -\frac{\sqrt{3}}{2}R,\ z_f = 0)$$

където R е радиусът на окръжността, върху която лежат допирните точки.

С α, β и γ са означени наклонените равнини, които се получават по стените на базовите призматични канали на пръстена, като съгласно построението ос X и точки A и D лежат на равнината α.

Изведени са директорните косинуси на нормалите към трите равнини:

$$\alpha \rightarrow n_\alpha\,(0, \cos\delta,\ \sin\delta);\quad \beta \rightarrow n_\beta\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\cos\delta - \frac{1}{2}\cos\delta o \sin\delta\right);\quad \gamma \rightarrow n_\gamma\left(-\frac{\sqrt{3}}{2}, -\frac{1}{2}\cos\delta, \sin\delta\right),$$

където δ е ъгълът между коя да е нормала и равнина XY (както и между коя да е базова повърхнина и ос Z).

С $F_{пр.}$ е означена силата на пружината, като тя действа обратно на положителната посока на ос Z, N_i е нормална реакция в коя да е допирна точка, като всички сили N_i са равни, а μ_0 е коефициент на триене при стремеж за плъзгане (покой);

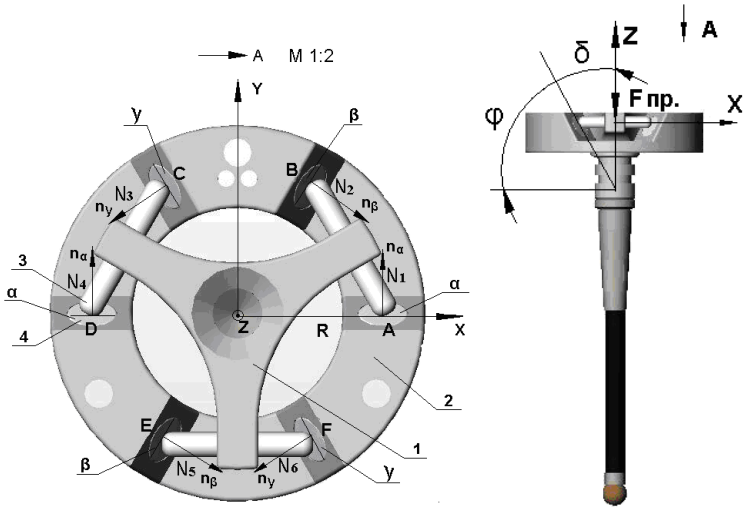
Разглежда се условие за равновесие на системата по ос Z:

$$\sum F_{Zi} = 0 \qquad \rightarrow \qquad -F_{пр.} + 6N_i \sin\delta + 6T_i \cos\delta = 0 \qquad (4.2)$$

След преработване на израза 4.2 се определят нормалните реакции N_i (за i=1,….,6)

$$N_i = \frac{F_{пр.}}{6\left(\sin\delta + \mu_0 \cos\delta\right)} \qquad (4.3)$$

От горния израз се вижда, че N_i ще е минимална, когато знаменателят има максимална стойност. След намиране на неговата първа производна: $\left(\sin\delta + \mu_0 \cos\delta\right)' = 0$ $\rightarrow$ $\cos\delta - \mu_0 \sin\delta = 0$,(4.4 и 4.5) може да се определи стойността δ_1 на ъгъла δ във фукция от коеф. триене: $\delta_1 = \mathrm{arctg}(1/\mu_0)$



Фиг. 4.1. Силов модел на ТИГ РУ

Минимална сила при измерване и съответно минимална сила на пружината се получава при конструкция на ТИГ с наклон на базите, равен на ъгъла на триене. Ако се приеме, че за използваните базови елементи коефициентът на триене е в границите μ_0 = 0.1÷ 0.2, то за ъгъла на наклон се получава: δ = 84°÷78°. Съответно за наклона на базите спрямо основата на призматичните канали: φ = 90° - δ = 6°÷12°

Изследване влиянието на ъгъла на неподвижната база за осигуряване на състояние „установяване”

Направените при предходните анализи изводи определят необходимостта да се изследва влиянието на наклона на неподвижната база за осъществяване на състояние установяване. Както вече бе изяснено при осъществяване на измерване базирането в ТИГ се нарушава в една или повече точки. След това под действие на силата, създадена от пружината подвижната базова група изпълнява състояние “установяване”. В такъв случай следва да се разгледа състоянието след като базирането е осъществено в пет точки, а в шестата все още не е, но предстои. Необходимото за целта движение, което би се извършило вероятно представлява сумарно движение или последователни макро- и по-скоро микротранслационни и ротационни движения до постигане на пълно базиране.

Особената конструкция на механизма на ТИГ обаче затруднява анализирането на това състояние както с методите на статиката, така и на кинематиката. Причина е в

статичната неопределимост на получената система, а също и поради това, че в контактните точки между подвижната и неподвижната група не възникват повтарящо се еднозначно определи двоици – плъзгащи или въртящи и т.н. и се получава и т.нар. геометрична неопределеност. Като резултат, в зависимост от конкретната ситуация, финалните микродвижения на подвижната базова група при установяване са разнообразни и могат да бъдат чисто транслационни, а при други условия - ротационни, или съчетани. Може обаче, да се приеме условието, че за да възникнат такива движения спрямо рзглеждано вероятно направление и посока е необходимо наличието на неуравновесени сили. Ако се отчете връзката базиране - отнети степени на свобода (движения) следва да се заключи, че при оставаща само една степен на свобода възможното движение би могло да бъде или транслация, или ротация. В случая обаче за тази система от една страна това не би могло еднозначно да се определи, а от друга в процеса на базиране вида на движенията би могъл дори да се изменя и редува поради непрекъснато изменящите се условия.

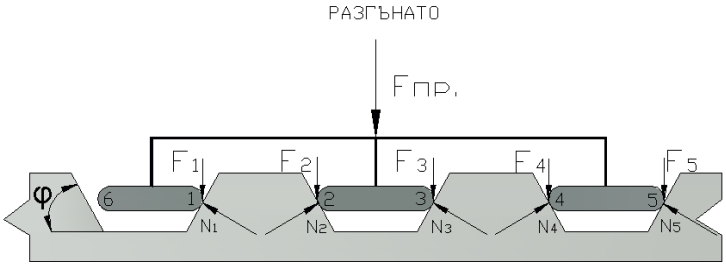
Изследване на модел на ТИГ РУ

А) Без отчитане влиянието на триенето

Чрез подходящо редуциране според (фиг.4.2 и 4.3) на N_i във всяка точка и опростяване на началните изрази може да се представят съответните проекционни съставни:

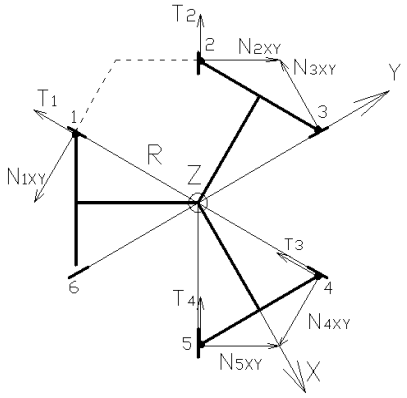
$$\Sigma F_{ui} = 0 \rightarrow N.\sin\varphi = 0 \qquad \Sigma F_{vi} = 0 \qquad \Sigma F_{zi} = 0 \rightarrow 5N.\cos\varphi - F = 0$$

$$\Sigma M_{ui} = 0 \rightarrow N_{z3}.\cos\varphi.R = 0 \qquad \Sigma M_{vi} = 0 \qquad \Sigma M_{z} = 0 \rightarrow N_{uv3}.\sin\varphi.R = 0$$



Фиг.4.3 Разгъвка на силовия модел на базиращата система в ТИГ РУ

Анализът на горните изрази закономерно показва, че ако се изключи влиянието на триенето в контактните точки механизмът не може да бъде в показаното състояние Това означава, че при отсъствие на съпротивление от триене и ако φ>0 не е необходима допълнителна сила, която да предизвиква движение за установяване. Подвижната базова група ще се самоустановява, когато е в това (вертикално) положение. И обратно, последното означава, че при наличие на триене ще са необходими подходящи и достатъчно големи активни сили и моменти и наклон φ, които да създадат условия за осъществяване на установяващо движение от подвижната базова група.



фиг. 4.4 Модел на установяване с отчитане на триенето

Б) С отчитане влиянието на триенето

За да е съответстващ на реалните условия моделът на ТИГ трябва да се отчита влиянието на наклона φ и на съпротивителните сили и моменти на триене. Очаква се въздействието на последните да се изразява във възпрепятстване на движенията, насочени към базиране на подвижната базова група.

Разглежда се положението (фиг.4.4), при което подвижната група има контакт в пет точки, а за базиране в шестата е необходимо микропреместване. Анализират се условията само за осъществяване на някои възможни единични, елементарни движения – транслации или ротации.

Условия за транслация

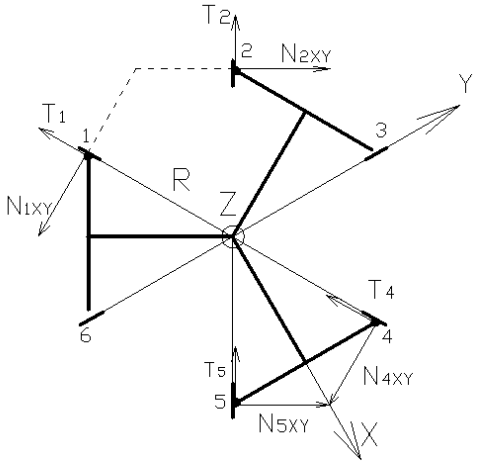
Условие 1. Предполага се, че в случая единствено възможното микродвижение за осъществяване на базиране в шестата точка е с посока, съвпадаща с положителната посока на ос X в равнината XY на въведената координатна система.:

$$\frac{1}{2\sqrt{3}-\cos\varphi} > \mu_0 \qquad (4.15)$$

Условие 2. За модела, показан на фиг.4.4 се приема, че първоначално подвижната група е базирана само в точки 1, 2, 4 и 5 както е показано на фиг.4.5. Предполага се, че е възможно транслационно движение в посока +X при наличие на неуравновесенасила в тази посока.

$$\frac{\sin\varphi}{\sqrt{3}} > \mu_0 \qquad (4.16)$$

Условие 3. След транслационното преместване на подвижната група в посока +X може да се предположи, че ще възникне контакт със стена от призмата на неподвижната база в точка 3. Следва да се отчете, че проекциите по ос Y на нормалните реакции в точки 1÷5 взаимно се уравновесяват, а при сумиране на проекциите им по ос X в точка 3 остава да действа неуравновесена стойност F_{x3}. $\cos\varphi > \sin\varphi.\mu_0$



Фиг.4.5 Условие за транслация в посока + X. Начално състояние

$$\frac{1}{\mathrm{tg}\varphi} > \mu_0 \qquad (4.19)$$

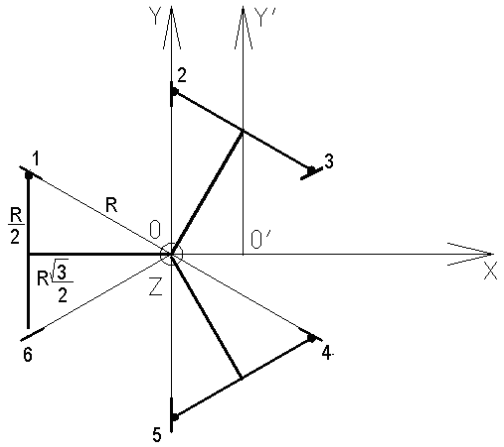
Условия за ротация Ако се разгледа модела, показан на фиг.4.6 и се приеме, че възможните движения на подвижната група са само ротации, то най-вероятно те биха се осъществили спрямо ос X или спрямо ос Y´. Приема се че: $F_i = F_{1,2,3,4,5} = F_{пр}/5$.В такъв случай може да се разгледат два варианта.

Условие 4. При първия се приема, че нормалните реакции са също равни въз основа на предположението, че всеки две от петте точки се разглеждат като точки от тяло, подпряно в две точки на призмата (фиг.4.5).

$$\frac{\cos\varphi}{7} > \mu_0 \qquad (4.20)$$

Условие 5. Ако се разгледа условието за равновесие спрямо ос Y´

$$\frac{3.\cos\varphi}{7} > \mu_0 \qquad (4.21)$$



Фиг.4.6 Изпълнение на установяване чрез ротация

При втория вариант само два от лъчите на подвижната група се разглеждат като тяло,

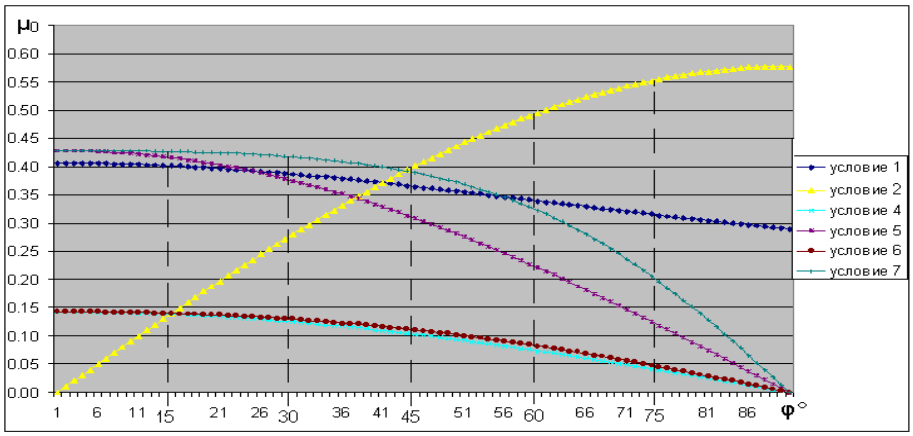
подпряно в две точки. Това са лъчите в частта от подвижната група, осъществяваща контакт в точки 2,3,4 и 5.

Условие 6. Спрямо ос X от условието, което се задава: $\sum Mx = 0$ следва че:

$$\frac{\cos\varphi}{6+\cos^2\varphi} > \mu_0 \qquad (4.22)$$

Условие 7. Спрямо ос Y´ от условието за равновесие: $\sum My' = 0$ следва, че:

$$\frac{3.\cos\varphi}{\left(4+3.\cos^2\varphi\right)} > \mu_0 \qquad (4.23)$$



фиг. 4.7 графично представяне на връзката между φ и μ_0

За удобство при анализа и онагледяване на изведените по-горе условия е използвано графичното им представяне, показано на фиг.4.7. Условие 3 не е представено, поради това че при стойности на φ под 84° μ_0 нараства много стръмно и приема големи стойности (до μ_0=57 при φ=1°). В заключение от направения анализ може да се обобщи следното:

1. Увеличаването на наклона на призмите води до по-глеми сили и улесняване на състояние установяване, но и до повишаване на триенето, което го затруднява;

2. Като се имат предвид резултатите от двете състояния може да се определят максимални граници за наклона на призмите φ =10°÷60°;

3.Като най-подходящ наклон може да се посочи ъгъл 45°;

4.Поради установената статична неопределимост на механизма и въведените в тази връзка допускания получените решения могат да бъдат приети само след съответна експериментална проверка.

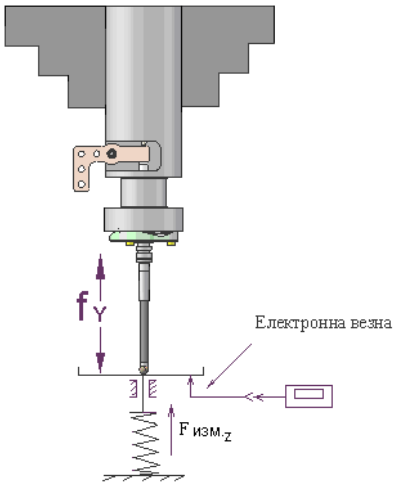
Експериментално изследване влиянието на наклона на неподвижните бази върху силата на измерване

За осъществяването на експеримента е конструирано, изработено и след подходящо тариране е използвано специално приспособление, показано на фиг.4.10. Проведени са експерименти, целта на които е да се изследва изменението на измервателната сила. При провеждането им управлявани фактори са:

А) големината на пружинната сила;

Б) скоростта на движение при измерване;

В) Ъгълът на наклон на повърхнините на неподвижната база, като за целта предварително са изработени четири образеца на неподвижна база с различен наклон φ, кратен на 15° (съответно 60°, 30°, 45° и 15°). По критерий надеждна работа на ТИГ желан резултат е получен при сила на пружината $F_{пр}$=1,6N



фиг. 4.10 Схема на установката-вертикално работно положение

За отчитане на силата при измерване $F_{изм}$ в качеството на силомер е използвана електронна везна (фиг.4.10), която предварително е калибрирана и периодично проверявана преди началото и след края на всеки експеримент. Експерименталното изследване е осъществено в два етапа.

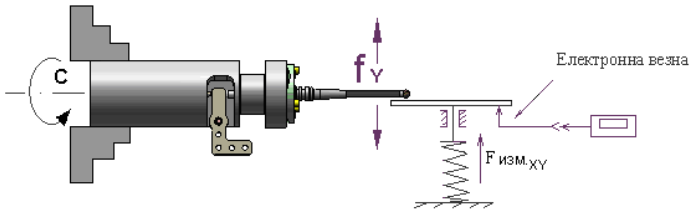
1. Първоначално е изследвана силата $F_{изм.Z}$ при измерване в направление, съвпадащо с оста на накрайника, като изследваните елементи на ТИГ са във вертикално положение, както е показно на фиг. 4.10. За целта специалното приспособление е установено към масата на машината (МС 032) чрез универсален тричелюстен патронник. Измервателното движение се осъществява по ос Y със супорта на машината, а големината на подавателната скорост е 3mm/min за да бъдат условията на натоварване близки до статичните. Данните от измерванията на силата $F_{изм.Z}$ за всеки наклон на неподвижната база са получени след изчисляване на средната стойност от петнадесет повторни измервания и са представени в табл. 4.8.

Таблица 4.8

Наклон φ на базата	15°	30°	45°	60°
Fизм.z., [N]	1.63	1.76	2.07	2.77

Анализът на получените резултати установява съвпадащо с теоретично предвиденото нарастване на осевата измервателна сила в съответствие с нарастване на наклона. Най-голяма осева измервателна сила е отчетена при образец с наклон на базите 60°, а най-малка осева измервателна сила при образец с наклон на базите 15°.

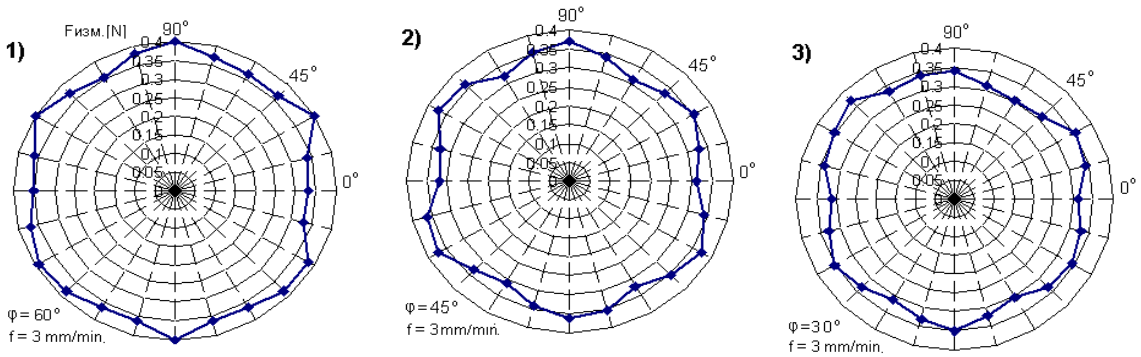
2. Във втората част на експеримента е изследвана силата на измерване $F_{изм.}$ в равнината XY при хоризонтално работно положение на ТИГ (фиг.4.11).



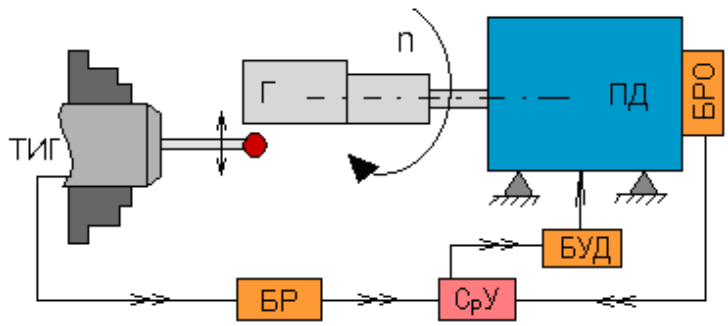
Фиг. 4.11 Измерване в равнината XY при хоризонтално положение на оста на ТИГ

Данните за отделните елементи на ТИГ са: подвижна база - 14,5g; накрайник стоманен, цилиндричен, с дължина 50mm. и тегло - 8,4g; плунжер с пружина – 10,3g;

За начално ъглово положение на неподвижната база при изследване в равнината XY на ТИГ е прието положението, при което измервателната сила е насочена срещу двойка базови точки. Следващите измервания се правят след завъртане на приспособлението през 15°. Изпълняват се по 5 повторения във всяка точка. Скоростта на подавателното движение при измерване е 3mm/min, 30mm/min и



Фиг. 4.12 Част от получените кръглограми за измервателна сила в равнината XY при различеннаклон на базите и подавателната скорост



Фиг.4.13 Изпитване на базиращите елементи

300mm/min. За удобство при отчитане на показанията на силомера е предвидена пауза (времезадържане) 3s. Измерванията се осъществяват със стоманен сферичен осезател. Резултатите са представени таблично в приложенията и графично чрез кръглограмите на фиг.4.12, построени по изчислените средноаритметични стойности на измервателната сила.

Изследване влиянието на пружинната сила върху контактните напрежения

Имайки предвид базовите елементи в ТИГ РУ следва, че зоните на контакт са с малка площ, възможни са високи стойности на налягането и критични контактни напрежения. За избраните размери и материал (Р18) може да се пресметне максималното налягане P_6 и P_5 във всяка контактна точка (за 6 и 5 точки при двете състояния), прилагайки известната зависимост на Херц:

$$P = \sqrt[3]{\frac{3.N_i.E^2}{2.\pi^3.R^2.(1-\nu^2)^2}}, \qquad P_6 \approx 886\text{MPa}, \qquad P_5 \approx 938\text{MPa} \qquad (4.24)$$

При сравняване на получените от изчисленията две стойности с допустимата може да се установи, че в случая условието е изпълнено: $P_5, P_6 < P_{доп.} = 1200\text{MPa}$

Експериментално изследване влиянието на контактните напрежения

За целта е разработена подходяща опитна установка, показана на фиг.4.13. На нея с Г е означена ротационна гърбица, която е сглобена с помощта на цилиндрична сглобка с изходящия вал на постояннотоковия двигател ПД. Чрез работния профил по периферията на гърбицата Г, задвижвана ротационно от ПД, се реализира еднопосочно циклично въздействие върху накрайника на ТИГ. Това въздействие съответно предиз-виква циклично отклонение на накрайника. Така многократно се имитират движенията на подвижната базова група при еднопосочно измерване.

Кинематичната съпротивителна система на ТИГ е свързана с брояч на циклите БР. Чрез блока за управление на двигателя БУД се задава подходяща, постоянна честота на въртене **n**. В случая тя осигурява около 20 измервателни цикъла на ТИГ за минута. Честотата на въртене и размерите на работния профил на гърбицата са подбрани така, че въздействието върху накрайника на ТИГ да съответства на измервателна скорост (подаване) 30mm/min. Сравняващото устройство СУ сравнява сигналите, постъпващи от външния брояч на импулси с тези от фабрично вградения БРО в постояннотоковия двигател. Експериментът спира при всяко възникнало задържане, което се установява от СУ по разликата между сигналите от броячите и в резултат се отчита един отказ. Опитната установка позволява провеждането на експеримента да се осъществява без прекъсване като се включи брояч на отказите.

Опитите са проведени при хоризонтално положение на ТИГ, съответстващо на най-неблагоприятното и същевременно най-характерното й работно състояние при извършване на КИ върху обработващи центри

Изследвани са три вида образци на ролки, изработени от закалена стомана Р18:

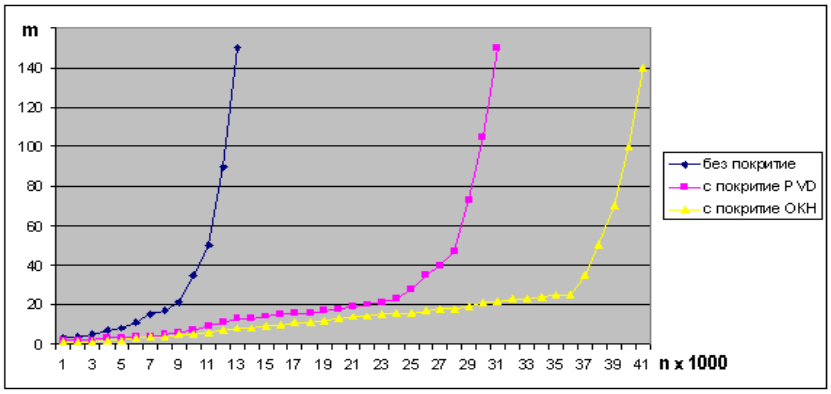
1- без покритие;

2- с вакуумно покритие (по метод PVD) от титаниев нитрид;

3- с вакуумно оксикарбонитриране (ОКН).

На фиг.4.14 са представени графики на получилите се натрупани откази във работата на трите вида изследвани образци на базовите елементи. Образец 1 натрупва около 150 отказа в рамките на 11 хил. цикъла. При образец сериозно влошаване на надеждността на работа на ТИГ (над 140 отказа) настъпва след около 31 хил. цикъла. За образец 3 с ОКН този брой откази се получава след 40 хил.цикъла. Съответно около 23 отказа се получават съответно при 9 хил , 23 хил. и 36 хил. цикъла.

Следователно от трите експериментално изследвани образци най-удачно се оказва покритието, получено по метода на вакуумно оксикарбонитриране, характеризиращо се с най-висока износоустойчивост и работоспособност при минимален брой откази.

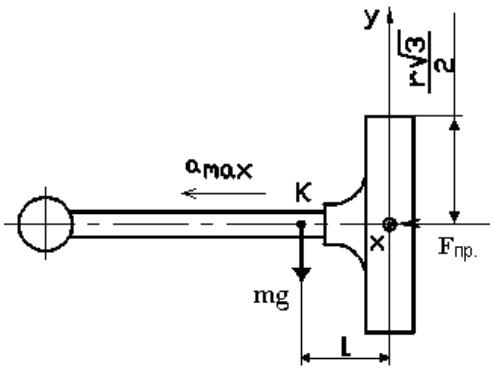


Фиг.4.14 Брой на отказите във функция на работните цикли

Изследване влиянието на масата и ускорението върху пружинната сила

Състоянието "готовност" на ТИГ изисква подвижният елемент да остава устойчиво в базирано положение дори когато измервателната глава при работа заема най-неблагоприятната позиция в пространството. Такъв е случаят, когато оста на ТИГ е хоризонтална, а металорежещата машина е в режим на линейно, ускорително движение (започва бърз ход) по хоризонтална работна ос Z. Разглежданите условия се илюстрират с показания на фиг. 4.16 модел и се задават с израза: $F_{пр.} > m\left(\frac{2gL}{r\sqrt{3}} + a_{max}\right) = 0.564N$ (4.27)

От зависимост (4.27) следва, че сумарната маса на подвижния елемент, конструкционните му размери и ускорението на машината задават един от критериите за минимална големина на пружинната сила. Установената експериментално в гл.4 големина на пружинната сила $F_{пр.}$ = 1.6N е достатъчна за осигуряване на това условие. При такива стойности на входните величини е допустимо до два пъти по-голямо ускорение от приетото.



фиг. 4.16 Схема за определяне на силата $F_{пр.}$ при "Готовност"

Изследване огъването на измервателния накрайник

Определянето на големината на огъването на накрайника се свежда до решаване на задача от съпромат. Накрайникът се разглежда като запъната греда, в края на която е приложена напречна сила. За конкретните стойности при плътен цилиндрична накрайник от стомана, използван при експериментите се получава:

$$f = \frac{F_{изм.}.b^3}{3EJ} \approx 8\mu m \qquad (4.29)$$

Тази стойност съответства на експеривентално получената средна стойност на постоянната грешка в зоната на нечувствителност От получения числен резултат се установява, че огъването на накрайника има основен дял при формиране на систематичната съставна в зоната на нечувствителност.

Изводи

1. Аналитично е установена връзка между наклона на стената на призмите и измервателната сила при изпълняване на състоянието “измерване” (начален момент). Намаляването на наклона на неподвижните бази води до намаляване силата при измерване. Най-малка големина на силата се получава при наклон, равен на ъгъла на триене. При стойности на коефициента на триене при стремеж за плъзгане μ_0 = 0.1÷ 0.2 ъгълът на наклон на призмите следва да бъде φ= 6° ÷ 12°

2. Анализът на състоянието ”установяване” (възстановяване) е сложен поради статичната неопределеност и многовариантност на възможните елементарни транслации, ротации и комбинации от тях. Затова е използван опростен модел с 5 контактни точки, от които са изведени 7 условия за постигане на контакт в шестата базова точка. Увеличаването на наклона води до улесняване на състоянието “установяване”, но и до по-големи опорни реакции, респ. триене, което го затруднява.

3. Както се вижда от горното ъгълът на наклона на призмата има противоречиво влияние – при състояние “измерване” той трябва да е малък, а при “установяване” – голям. Като се отчете изискването за удовлетворяване на двете състояния, съобразено и с коефициента на триене при стремеж за плъзгане μ_0, теоретично може да се зададе ъгъл на наклона в широкия диапазон 12° - 75°.

4. С помощта на специално приспособление, което позволява тариране на силата на пружината, са проведени множество експерименти за определяне силата на измерване при 4 сменяеми елемента неподвижна база с ъгли на наклон на призмите 15°,30°,45° и 60°. Отчитана е и надеждността на работа според броя на отказите.

5. При измерване по ос Z, съвпадащо с оста на накрайника е установено, че с нарастване на ъгъла на наклона на неподвижната база от 15° до 60°, измервателната сила нараства от 1,63N до 2,77N, което потвърждава теоретичния резултат.

6. При измерване в равнина XY (радиално) и ъгъл на наклон на призмите 15° възникват най-голям брой откази. Поради това този образец е отхвърлен и с него не е проведен пълен експеримент. С висока надеждност се характеризират образците с наклон 45° и 60°, което ги налага като подходящи по този показател.

7. По критерия минимална измервателна сила при измерване в равнина XY, вариантът с ъгъл на наклон на неподвижната база φ = 45° е за предпочитане. При него е регистрирана минимална измервателна сила 0,45N, което е потвърждение на теоретичния резултат и е с около 33% по-малко от силата при образеца МР3(0,75N).

8. С помощта на подходяща опитна установка и изпълнени множество работни цикли е изследвано влиянието на цикличното, контактно въздействие върху износването на базиращите елементи. Използвани са 3 образци от закалена стомана – без покритие, с покритие от титанов карбид и с оксикарбонитриране. При първия е констатирана надеждна работа до около 9000 циклови повторения, при втория – 23000 и при третия – 37000. Или чрез вакуумно оксикарбонитриране срокът на експлоатация се увеличава близо 4 пъти в сравнение със закалени, но без покритие..

9. Анализът на влиянието на теглото на подвижната база и ускоренията на машината показва, че подвижната база, включително с накрайник и осезател, трябва да е с минимално тегло, а динамичните сили трябва да се (неутрализират) осигурят от пружината. Изчислената необходима сила на пружината при конкретните условия е

$F_{пр.}$ >0,564N, което означава че експериментално установената $F_{пр.}$ = 1,6N е достатъчна за осигуряване на това условие.

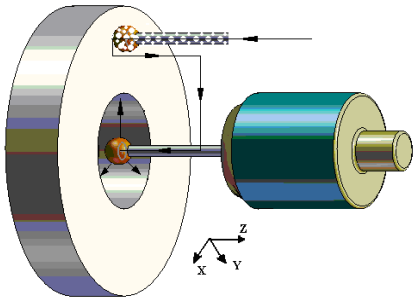
10. Аналитично и експериментално е установено, че огъването на накрайника има основен дял при формиране на систематичната грешка. При стоманен накрайник с дължина 50 mm е изчислено огъване 8μm, което съвпада със средната стойност на систематичната грешка, а при накрайник от стъклена тръбичка огъването е 13μm.

5. ПОВИШАВАНЕ ТОЧНОСТТА НА ИЗМЕРВАНЕ ЧРЕЗ КОМПЕНСИРАНЕ НА СИСТЕМАТИЧНИТЕ ГРЕШКИ

Отчитайки теоретично изведените и експериментално потвърдени характеристики на ТИГ РУ стават възможни опростени процедури за установяване на зоната на нечувствителност

Компенсиране на систематичните грешки чрез калибриране

На фиг.5.1 са показани основните стъпки при осъществяване на първоначално настройване, имащо за цел определяне на несъосността и центъра на сферичния осезател с оста на вретеното на машината, както и габаритите на инструменталния комплект. След това възможностите са:

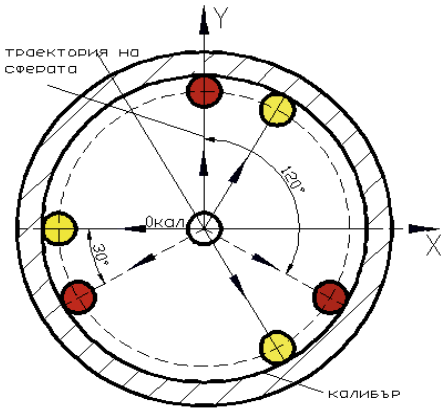


Фиг.5.1. Настройване на ТИГ със сферичен накрайник

Двустепенно калибриране за определяне зоната на нечувствителност за не повече от 6 конкретни или типични работни точки. За измервания на ОЦ работните точки се избират да съвпадат с четирите посоки на измерване по координатните оси X и Y на машината, плюс посоките за триточково измерване на окръжност. С такова калибриране се определя големината на зоната на нечувствителност за предварително избрани посоки на измерване. Резултатът се използва за внасяне на поправка чрез коригиране на радиуса на сферата със стойноста на конкретната зона на нечувствителност:

$$R_{усл.i} = R_{сф.} - (\Delta+g)_i \qquad (5.4)$$

Работно двустепенно калибриране за определяне средна стойност на зоната на нечувствителност в равнината (фиг.5.6) се използва в случаите когато неопределеността на измерванията, внасяна от този подход не е значима. Чрез ориентирано определяне на зоната на нечувствителност по три максимума и три минимума от характеристиката на ТИГ се изчислява и се работи със средна стойност на условния радиус на сферата:



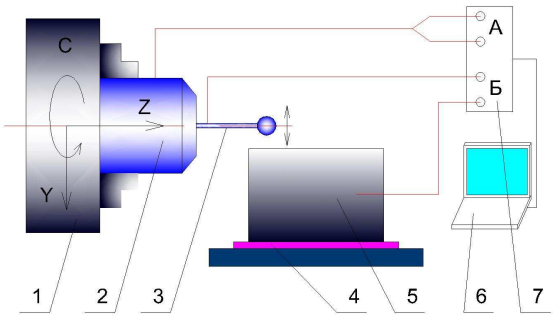
Фиг.5.6. Определяне на средна стойност на зоната на нечувствителност

$$\overline{R}_{усл.} = \frac{\sum_{i=1}^{n} R_i}{n} = \frac{R_{усл.1,1} + R_{усл.1,2} + R_{усл.1,3} + R_{усл.2,1} + R_{усл.2,2} + R_{усл.2,3}}{6} \qquad (5.6)$$

Компенсиране на систематичната грешка по сигнал от докосване

Използвана е налична адаптивна система за управление по докосване. Необходимо е накрайникът на ТИГ и измервания обект да са електропроводими и да са свързани в отворена електрическа верига, която се затваря от механичния им

контакт при измерване. Полученият сигнал се използва като сигнал за SKIP от ЦПУ на мащината. В случая необходимата сила е многократно по-малка, от там и зоната на нечувствителност на ТИГ.



фиг. 5.8. Принципна схема на опитната установка

На фиг.5.8 е показана принципната схема на експерименталната установка. С поз.2 е означена измервателната глава, която се установява с помощта на универсален, тричелюстен патронник 1 към маса С на обработващ център МС032. Така се осигурява възможност чрез завъртане на масата по ос С (през 5°) измервателните глави да бъдат изследвани в различна посоки на задействане в равнината XY.

Изследването е изпълнено с две измервателни глави – едната е RENISHAW MP3, а другата е ТИГ РУ. На дата вида измервателни глави е зададена минимално допустима стойност на измервателното усилие, осигуряващо надеждната им работа и е използван един и същи стоманен накрайник 3 с дължина 50mm и със сферичен стоманен връх. Измервателното преместване се осъществява по ос Y на машината, а подавателните скорости са – 3, 30, 300 и 3000mm/min. Измерваният обект 5 е установен върху корпуса 4 на машината. Сигналът от докосване се предава при затваряне на електрическата верига, свързана към вход “Б” на аналого-цифровия преобразувател 7. Сигналът от прекъсване в кинематичната съпротивителна система на ТИГ е включен към вход “А”. След подходящо преобразуване и обработване двата сигнала се предават към персонален компютър 6. Полученият краен резултат е файл със запис на електическите сигнали по двете вериги, представен под формата на времедиаграма, по която се отчита времезакъснението на сигнала от КСС.

Изводи

1.Проведените изследвания и анализът на получените резултати показват, че съществуват значителни възможности за повишаване точността на измерванията с ТИГ чрез компенсиране на систематичните грешки, като за целта се прилага калибриране или се използва сигнал за докосване на осезателя до контролираната повърхнина;

2. Със специално разработени алгоритми и макропрограми за системи FANUC е възможно опростено и икономично двустепенно калибриране на не повече от шест точки (посоки) от главата в три възможни варианта – произволно, типично и усреднено;

3. Чрез усреднено калибриране се определя средна стойност на зоната на нечувствителност. То е приложимо само ако делът от ±7% на закономерната грешка на ТИГ РУ е допустим;

4. С произволно или типично калибриране се отчита и компенсира сумарната систематична (постоянна и закономерна) грешка за конкретни (произволни или типични) работни точки. Такова работно калибриране се налага ако посоките на следващото измерване са известни и е необходима по-висока точност;

5. Измерванията при използване на сигнал от система за докосване намаляват съществено дела на систематичната закономерна грешка на ТИГ. Метрологичната й характеристика става по-близка до кръглата форма, а колебанието на сигнала от докосване е в много малка площ, клоняща към точка, поради което отпада

необходимостта от работно калибриране! Осъществяването на измервания по сигнал от “докосване” не налага допълнителни изисквания и съществени изменения в конструкцията на ТИГ и системата за координатни измервания;

6. Поради еднократните (при експеримента) измервания по сигнал от докосване във всяка точка (през 5°), случайната грешка не може да се изключи. Независимо от това, обобщено може да се заключи, че при подавателна скорост 300mm/min общата закономерна и случайна грешка при ТИГ RENISHAW MP3 е от порядъка на 9-10μm, а при ТИГ РУ тя е сведена до 4μm, т.е. намалението й е над 2 пъти.

ПРИНОСИ:

1. Предложена е оригинална схема на базиране и разработена съгласно нея нова конструкция трикоординатна измервателна глава, която благодарение на равномерното разположение на базовите точки осигурява значително намаляване на колебанията на зоната на нечувствителност и измервателната сила в радиално направление в сравнение с известните образци в света.

2. Получените резултати при задълбочено изследване на измервателна глава MP3 с т.н. групово базиране през 120°, продукта на един от световните лидери RENISHAW , дават основание да се посочат нейни съществени несъвършенства: колебание на зоната на нечувствителност в радиално направление от 80%; изменение на измервателната сила до 75%; несиметричност при срещупосочни измервания; вероятна невъзможност за възстановяване на контакта в шест точки след измерване.

3. Разработени са подобни, теоретични, силови модели на базирането на тяло в шест точки по три радиално, (циклично или равномерно) разположени призми, чрез които се обяснява изменението на големината на силата, необходима за извеждане му от базирано състояние при радиално въздействие и с чиято помощ са анализирани частните случаи конструкции на ТИГ РУ и MP3.

4. Разработени са графични силови модели на базирането, с помощта на които е доказано, че новата глава ТИГ РУ осигурява изменение на измервателната сила, както и на зоната на нечувствителност, по кръглограма тип правиллен шестоъгълник, която в сравнение с равностранния триъгълник на глава MP3, е много по-близка до желаната “идеална” – окръжност.

5. Теоретично е установено и експериментално е доказано, че при глава РУ колебанието на измервателната сила и на зоната на нечувствителност е сведено до 13-14% спрямо средните стойности, което съпоставено с (75-80%) глава MP3 представлява шесткратно намаление.

6. Постигнатата диаметрална симетричност на зоната на нечувствителност осигурява висока точност при срещупосочни измервания и позволява значително опростяване на процедурите при калибриране на главата.

7. Осигуреният постоянен ъгъл на наклон на призмите е предпоставка за по-висока надеждност на глава РУ в сравнение с MP3, при която контактът на 3 ролки по двойки сачми обуславя вероятност от т.н.”задържане”, или невъзможност за възстановяване на базиращата система след измерване.

8. Теоретично и експериментално е доказано, че ъгълът на наклон на призмите, при изследване в интервала 15°-75° през 15°, има противоречиво влияние – при състояние начало на измерване той трябва да е малък, а при установяване– голям. От изискването за удовлетворяване на двете състояния, а също условията за минимална измервателна сила и висока надеждност е приет ъгъл на наклона на призмите 45°.

9. С помощта на специално разработени алгоритми и макропрограми за система FANUC е осъществено настройване и калибриране на главата в три възможни

варианта (произволно, типично и усреднено), съгласно изискванията за измерване. Анализът на получените резултати показва, че с калибрирането практически почти напълно се изключват постоянната и закономерната грешка.

10. Експериментално е доказано, че при използване на сигнал за докосване съществено се намалява закономерната грешка на измервателната глава, като метрологичната й характеристика се получава много близка до кръглата форма, а колебанието й е в много малка площ, клоняща към точка., при което може да отпадне необходимостта от работно калибриране.

11. Създадено е специално приспособление, което позволява тариране на силата на пружината, с помощта на което на реализирана опитна установка са проведени множество експерименти при различен ъгъл на наклон на призмите.

12. Получени са експериментални резултати относно значението на грапавостта и качеството на контактните повърхнини, теглото на подвижната база и ускоренията на машината и огъването на накрайника, които са използвани за подобряване технологичността, надеждността и дълготрайността на конструкцията на измервателната глава.

13. Работоспособността и експлоатационните качества на ТИГ РУ са потвърдени и доказани чрез внедряване и експлоатация в производствените условия на фирмите ATLASCOPKO Lifton , ПИХ Индъстри, ГРИФОН – Русе и др.

НАУЧНИ ПУБЛИКАЦИИ, СВЪРЗАНИ С ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Zamfirov Iv. D.Dimitrov, A new desing for a tree dimensional touch-trigger probe, XX Congress of Chemists and Technologists of Macedonia, 17-20 sept.,2008, №M09-04-E.

2. Димитров Д. Статичен силов анализ на трикоординатна измервателна глава, сп. Машиностроене и машинознание, книга 6, Варна, 2011, стр. 49-51.

3. Димитров Д., С.Колева, В.Карачорова. Изследване влиянието на определящи фактори от трикоординатна глава върху силата на измерване, Научни трудове на РУ ”Ан.Кънчев”- Русе, т.49, сер.2, , Русе, 2010, стр.87-91.

4. Димитров Д., Св. Колева, М. Енчев, В. Карачорова. Компенсиране на систематичните грешки на трикоординатна измервателна глава чрез тариране, Научни трудове на РУ ”Ан.Кънчев”- Русе, т.50,сер.2, Русе, 2011, стр.69-72.

Abstract

The possibilities and the equipment for coordinate measurements using machine centers are analyzed. The solution which is chosen as the most suitable is the use of three-coordinate (3-D) measuring touch-trigger probes RENISHAW MP3 type. Some significant metrological disadvantages caused by the applied base system have been confirmed through own research of such measuring heads. Thus, a new original scheme and a new design of a measurement head are proposed. It has been theoretically and experimentally proven that the new design provides a multiple-fold decrease of the zone of lack of sensitivity. The influence of some basic design parameters of the head on the improvement of manufacturability, reliability and exploitation has been researched. A simplified calibration in several variants, corresponding to the measurement tasks, has been proposed for improving the measurement accuracy.

The exploitation quality and the efficiency of the new heads have been verified in manufacturing conditions at several companies.