

**МИННО-ГЕОЛОЖКИ УНИВЕРСИТЕТ „СВ. ИВАН  
РИЛСКИ” – СОФИЯ**  
Миннотехнологичен факултет, катедра „Маркшайдерство и  
геодезия”

---

маг. инж. Весела Валентинова Миланова

**ПРИЛОЖЕНИЕ НА ЖИРОСКОПИЧЕСКОТО ОРИЕНТИРАНЕ В  
МАРКШАЙДЕРСКОТО ОСИГУРЯВАНЕ НА ПОДЗЕМНОТО  
РАЗРАБОТВАНЕ НА НАХОДИЩАТА И ПОДЗЕМНОТО  
СТРОИТЕЛСТВО**



**АВТОРЕФЕРАТ**

на дисертация  
за присъждане на образователната и научна степен „Доктор”

**НАУЧЕН РЪКОВОДИТЕЛ:**  
проф. д-р инж. Момчил Минчев

---

София, 2018

**МИННО-ГЕОЛОЖКИ УНИВЕРСИТЕТ „СВ. ИВАН  
РИЛСКИ” – СОФИЯ**  
Миннотехнологичен факултет, катедра „Маркшайдерство и  
геодезия”

---

маг. инж. Весела Валентинова Миланова

**ПРИЛОЖЕНИЕ НА ЖИРОСКОПИЧЕСКОТО ОРИЕНТИРАНЕ В  
МАРКШАЙДЕРСКОТО ОСИГУРЯВАНЕ НА ПОДЗЕМНОТО  
РАЗРАБОТВАНЕ НА НАХОДИЩАТА И ПОДЗЕМНОТО  
СТРОИТЕЛСТВО**

**АВТОРЕФЕРАТ**

на дисертация

за присъждане на образователната и научна степен „Доктор”

Научна специалност 02.08.01: „Маркшайдерство”  
Професионално направление 5.7: Архитектура, строителство и  
геодезия  
Област на висше образование: 5. Технически науки

**НАУЧНО ЖУРИ:**

доц. д-р инж. Станислав Топалов – председател  
проф. д-р инж. Момчил Минчев  
проф. д-р инж. Методи Маждраков  
проф. д-р инж. Андрей Андреев  
проф. д-р инж. Юрий Дачев

**РЕЗЕРВНИ ЧЛЕНОВЕ НА СЪСТАВА НА НАУЧНОТО ЖУРИ:**

проф. д-р инж. Койно Боев  
доц. д-р инж. Пламен Михайлов

**РЕЦЕНЗЕНТИ:**

доц. д-р инж. Станислав Топалов  
проф. д-р инж. Методи Маждраков

---

Дисертационният труд е с обем 200 страници, включващ основен текст и приложения с резултати от експерименталното изследване и тяхната обработка. Основният текст се състои от: въведение, две основни части- теоретична и практическа с обобщения и изводи; заключение и претенции за приноси; публикации по темата на дисертационния труд- 4 бр.; библиографски списък от 89 бр. източници, в т.ч. 16 бр. интернет ресурси, 23 бр. на кирилица и 66 бр. на латиница. Основният текст е онагледен с 35 фигури, 25 таблици и 93 номерирани формули.

Номерацията на включените в автореферата фигури, таблици и формули съответства на тази от дисертационния труд. В автореферата е актуализиран списъкът с използваната литература.

Докторантът е зачислен за редовна форма на обучение към катедра „Маркшайдерство и геодезия” на Миннотехнологичен факултет при Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски” със заповед № Р-275/12.03.2014 г. по Решение на ФС на Миннотехнологичен факултет от 06.03.2014 г.

Докторантът е отчислен с право на защита със заповед №Р-1143 от 07.12.2017 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита пред научно жури в състав, утвърден със заповед №Р-1145 от 11.12.2017 г.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на открито заседание пред научно жури на 15.03.2018г. (четвъртък) от 17.00 часа в ЗАЛА 204-Б ГЕОТЕХМИН, МТФ на МГУ „Св. Иван Рилски”, София.

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Сектор „Следдипломна квалификация” на МГУ „Св. Иван Рилски”, Ректорат, ет. 3, стая № 79, тел. 02/ 80 60 209, както и на [www.mgu.bg](http://www.mgu.bg)

Автор: маг. инж. Весела Миланова

Заглавие: Приложение на жирокопическото ориентиране в маркшайдерското осигуряване на подземното разработване на находищата и подземното строителство

Текст: 48 стр.

Тираж: 30 бр.

Отпечатано в Издателска къща „Св. Иван Рилски” на МГУ „Св. Иван Рилски”, София

## СЪДЪРЖАНИЕ:

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД.....                             | 7  |
| АКТУАЛНОСТ И ЗНАЧИМОСТ НА ТЕМАТА ЗА НАУКАТА И ПРАКТИКАТА.....                  | 7  |
| ОБЕКТ И ПРЕДМЕТ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО.....                                           | 9  |
| ЦЕЛ И ЗАДАЧИ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО.....                                              | 9  |
| ОБХВАТ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО.....                                                    | 10 |
| МЕТОДИ НА ИЗСЛЕДВАНЕ.....                                                      | 10 |
| ПРИЛОЖИМОСТ И ПОЛЕЗНОСТ.....                                                   | 11 |
| II. ОСНОВНО СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД.....                             | 12 |
| 1. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТ.....                                                        | 12 |
| 1.1. ОСНОВНИ РЕЗУЛТАТИ ОТ ТЕОРЕТИЧНОТО ИЗСЛЕДВАНЕ.....                         | 12 |
| 1.1.1. СЪЩЕСТВЕНИ ИЗИСКВАНИЯ КЪМ ЧУВСТВИТЕЛНИТЕ ЕЛЕМЕНТИ.....                  | 13 |
| 1.1.2. ОПТИЧНИ ЖИРОСКОПИ.....                                                  | 17 |
| 1.1.3. ВИБРАЦИОННИ (КОРИОЛИСОВИ) ЖИРОСКОПИ.....                                | 20 |
| 1.2. ИЗВОДИ КЪМ ТЕОРЕТИЧНАТА ЧАСТ.....                                         | 24 |
| 2. ПРАКТИЧЕСКА ЧАСТ.....                                                       | 26 |
| 2.1. РАБОТНА ХИПОТЕЗА.....                                                     | 26 |
| 2.2. ОСНОВНИ РЕЗУЛТАТИ ОТ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНОТО ИЗСЛЕДВАНЕ.....                    | 27 |
| 2.2.1. ПЛАНИРАНЕ НА ИЗМЕРВАНИЯТА.....                                          | 27 |
| 2.2.2. ЕТАЛОНИРАНЕ НА ИНСТРУМЕНТА.....                                         | 29 |
| 2.2.3. АНАЛИЗ НА ТОЧНОСТТА НА ПОСОЧЕН ЪГЪЛ, ОПРЕДЕЛЕН ПО ЖИРОСКОПИЧЕН ПЪТ..... | 30 |
| 2.2.4. ПРИЛОЖЕНИЕ НА ИЗМЕРВАТЕЛНАТА ПРОГРАМА В РЕАЛНИ УСЛОВИЯ.....             | 33 |
| 2.3. ИЗВОДИ КЪМ ПРАКТИЧЕСКАТА ЧАСТ.....                                        | 38 |
| III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....                                                           | 40 |

|                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------|----|
| IV. ПРЕТЕНЦИИ ЗА ПРИНОСИ.....                                   | 42 |
| V. ПУБЛИКАЦИИ, СВЪРЗАНИ С ТЕМАТА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ<br>ТРУД..... | 43 |
| VI. БИБЛИОГРАФИЯ.....                                           | 44 |

## **I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД**

Дисертационният труд разглежда методите на автономно геодезическо ориентиране и свързаните с него специализирани измервания с особена значимост за минно-добивното строителство, геодезията, подземното строителство, както и за поддържането и експлоатацията на различни инженерни съоразения, изграждане на инфраструктурни проекти, метрополитени, хидротехнически и транспортни тунели. Получаването на стойностите на търсените параметри се основава на жирокопичния ефект, теоретичната основа за който е тясно свързана с дистанционните методи и съвременните технически средства за събиране на геопространствени данни за решение на геодезически, аерогеодезически и топографо-геодезически задачи.

### **Актуалност и значимост на темата за науката и практиката**

Една от най-съществените и отговорни задачи пред геодезистите и маркшайдерите е подсигуряване на единна ориентация на геодезическата мрежа на повърхността и под земята, тогава когато се касае за подземно разработване на полезни изкопаеми и подземно строителство. Развитието на минните работи в дълбочина създава известни затруднения при постигане на необходимата точност при геодезическото привързване на подземните хоризонти и при развитие на минните работи в план и в дълбочина. Наред с осигуряването на единна геодезическа ориентация, основна задача пред маркшайдерите е и периодичният контрол на ориентирането. В повечето случаи жирокопическото ориентиране е разумно решение. Контролът, независимо от регламентирания или препоръчителен характер, е особено важен в действащите минни обекти, където първоначална ориентация е осъществена чрез класически методи. Евентуалните грешки, допуснати при определянето на подземните полигонови посочни ъгли е възможно да се отстранят единствено по автономен способ, чрез определяне на азимути по жирокопичен път.

Наред с това, че методът на жирокопично ориентиране подsigурява висока точност при определяне на азимут, характерни са и някои недостатъци- съществуващите инструменти, включително и най-съвременните модели, се отличават с големи габарити и сложно конструктивно изпълнение, поради наличието на механични роторни жирокопи в конструкцията им.

С развитието и на техниката и технологията се става възможно генериране на жирокопични свойства в различни устройства при това не обезателно конструкция с бързовъртящи се елементи. Още при първоначалната поява на първите демонстрации на лазерни жирокопи очакванията са те да бъдат внедрени като алтернативно решение в конструкцията на инструментите за жирокопическо ориентиране. Към този момент изключително бързото развитие на оптичното производство, нанотехнологиите, микропроцесорната и компютърната техника позволява жирокопичните свойства да се проявяват в различни електрически и оптични устройства. Съвременните изследвания доказват съществени предимства и теоретичната възможност на основата на тях да бъдат създадени жирокопични инструменти и системи, в това число и с подчертано геодезическа насоченост. Въпреки че тази идея е предмет на засилен изследователски интерес в световен мащаб, усъвършенствани модели жирокопични теодолити на този етап не са реализирани. Причините за това са предмет на изследване в теоретичната част на дисертационния труд. Прегледът на публикациите през последните години показва, че приложението на жирокопическото ориентиране в световен мащаб е актуално и е неизменна част от отговорната работа на инженерите. Темата представлява интерес за авторите на множество публикации и е предмет на разработване на редица експериментални и научни изследвания. Успоредно с това, на територията на страната през последните години жирокопично ориентиране се използва твърде ограничено. В случаите, когато нормативите или спецификата на работа го изискват, е прието изпълнението да се възлага на



чуждестранни изпълнители. Причините за това са неясни, но аргументите в тази посока са свързани с необходимост от продължителна подготовка на операторите, липса на съвременна апаратура, тремавост на измервателната програма, несигурност в точността и достоверността на данните, набавени с инструменти от по-старо поколение. Изискванията за еталониране на инструментите, наложени от инструкциите за експлоатация, значително намаляват интереса към приложение на метода за автономно ориентиране. Отговорността за изпълнението на периодично еталониране е продължителен процес, който допълнително затруднява работата на маркшайдерите. Посочените аргументи не влияят върху значимостта и качествата на жирокопическото ориентиране за маркшайдерската дейност. Посочените аргументи не влияят върху значимостта и качествата на жирокопическото ориентиране за маркшайдерската дейност. Те обаче обуславят необходимостта от изследване върху техническото състояние на жирокопическите инструменти и търсене на подход за оптимизиране на реализацията на метода, което предмет на изследване в практическата част на дисертационния труд.

### **Обект и предмет на изследването**

Обект на изследване е методът на жирокопическо ориентиране, а предмет на разглеждане са начините за оптимизиране на практическата реализация на метода, както и перспективите в посока усъвършенстване на инструментите за автономно ориентиране.

### **Цел и задачи на изследването**

Основната цел на настоящия дисертационен труд е изследване и оптимизиране на метода на жирокопическото ориентиране, осигуряващо съвременното ефективно приложение при подземно разработване на находищата и подземното строителство.

За постигане на целта са дефинирани основни задачи в теоретичен и практически аспект, като предмет на изследване на съответните части на дисертационния труд, а именно:

С оглед спецификата на инструментите за жирокопическо ориентиране и предимствата на съвременните жирокопични технологии:

- Да се изучат и анализират съвременното състояние и развитието на основните групи безроторни жирокопи и да се формулира прогноза, относно бъдеща възможност за усъвършенстване на жирокопическата част на апаратурата.

Съобразно някои ограничения, наложени от практическа реализация на метода:

- Да се анализират възможностите за оптимизиране на метода жирокопическо ориентиране и да се изследва ефективността от приложението му в реални условия на измерване.

### **Обхват на изследването**

Изследването обхваща преглед на литературните източници в широк времеви диапазон. В хронологичен ред накратко е проследена появата и развитието на роторния жирокоп с карданно окачване от първото десетилетие на XIX-ти век. В пряка връзка с дефинирането на някои съществени моменти е изследвано развитието на методите на жирокопическо ориентиране на територията на страната и обстоен преглед на наличните научни публикации по темата. Въз основа на публикации от последните години е извършен критичен преглед на най-съвременните жирокопични технологии в световен мащаб.

### **Методи на изследване**

За постигане на целта на изследването и разрешаване на поставените задачи са избрани общонаучни методи на научното познание, в

зависимост от конкретиката на теоретичния и практическия аспект на изследване:

- Теоретичен анализ- проучване и опознаване на предметите на изследване с цел разкриване на същността им;
  - Сравнение- съпоставяне на признаците на сходство и различие на различните обекти на изследване и установяване на основни зависимости помежду им;
  - Синтез- установяване на връзка между определени черти и свойства.
- Използвани са и общи методи на емпиричното изследване - наблюдение, измерване и експеримент.

### **Приложимост и полезност**

Дисертационният труд може да бъде от полза на настоящите и бъдещи специалисти по маркшайдерство и геодезия, както и на специалистите от други научни области, имащи отношение към автономните методи за ориентиране. Резултатите от изследването са приложими при решение на различни задачи, свързани с маркшайдерското обслужване при добива на подземни богатства, както и в условия на подземно строителство при изграждане и поддържане на подземна инфраструктура.

Експерименталната работа е реализирана с жирокопични инструменти за автономно геодезическо ориентиране, налични в катедра „Маркшайдерство и геодезия” към Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски”. При обработката на резултатите от експеримента са използвани софтуерни продукти.

## **II. ОСНОВНО СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД**

### **1. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТ**

Основната задача на теоретичната част е изследване на състоянието и съвременните тенденции в развитието на основните групи безроторни жирокопи и формулиране на прогноза, относно възможността от внедряването им в устройството на жирокопическите теодолити, като алтернатива на механичните ротори.

Решението на задачата оформя следния методичен ред:

- Подробен обзор на актуалната литература, синтез и сравнение на наличната информация;
- Основни изискванията към жирокопите, в качеството на чувствителни елементи в конструкцията на жиротеодолитите;
- Изучаване на основните групи жирокопи, конструктивната схема, принципи на действие, физични закони, на които се подчиняват, основни източници на грешки и факторите, влияещи върху тях, характерни предимства и недостатъци, както и областите на приложението им;
- Въз основа на проведеното проучване да се обобщят перспективите, относно бъдещи нововъведения в жирокопическата част на инструментите.

Очакван резултат от теоретичния анализ е да се намерят причините, поради които роторните жирокопи са абсолютно доминираща технология в устройството на жиротеодолитите от появата на първите инструменти до най-усъвършенстваните автоматизирани жирокопични измервателни станции.

#### **1.1. ОСНОВНИ РЕЗУЛТАТИ ОТ ТЕОРЕТИЧНОТО ИЗСЛЕДВАНЕ**

Основен принцип, на който се основават жирокопите е запазване на момента на импулса. За механичните жирокопи при завъртането на

ротационната ос на някакъв ъгъл възниква противоположен момент, големината на който зависи от формата, размерите, масата и ъгловата скорост. Вследствие на центробежните сили, действащи върху ротора е налице жирокопичен ефект.

Подобно на инерцията на въртящите се тела, свойството на светлината в затворен въртящ се контур да съхранява положението си в инерциалното пространство, известно като ефект на Саняк, стои в основата на т.нар. оптични жирокопи. Това свойство се наблюдава както при електромагнитни вълни във въртящ се контур, така и при потоци от елементарни частици, въз основа на което се разработват най-съвременните жирокопични технологии. Разгледани са основните разновидности на оптичните жирокопи, принципът на действие на високотехнологичните ядрени жирокопи. Разгледани са и вибрационните жирокопи, които се подчиняват на принципа за запазване на посоката на вибрациите си при въртене на основата на вибриращото тяло.

#### 1.1.1. СЪЩЕСТВЕНИ ИЗИСКВАНИЯ КЪМ ЧУВСТВИТЕЛНИТЕ ЕЛЕМЕНТИ

Установено е, че жирокопическите измерванията, с цел геодезическо ориентиране и контрол, поставят завишени критерии по отношение на точност и стабилност на данните. Точността на автономните измервания зависи от точността на инструмента, която се задава от качествата на чувствителния елемент. Това е в сила независимо дали принципите на действие се подчиняват на законите на класическата или квантовата механика. Изискването за повтаряеми и стабилни данни налага техническите характеристики на сензорите да отговарят на определени стойности, зададени като функция от търсената точност в периода на измерване.

В същността си ориентирането с автономни сензори е свързано с проследяване и регистриране на информация, носители на която са колебания във времето под формата на колебателно движение на

сигнала. Природата на сигнала, в зависимост от типа технология на жирокопичния сензор, е механична или електромеханична вълна- за роторните и вибрационните жирокопи, или електромагнитна вълна- за оптичните жирокопи и квантовите жирокопи. Независимо от физическата природа, разпространението е с периодичен характер, свързано с редуване на максимални и минимални стойности на параметрите на вълните: честота, напрежение, амплитуда и интензитет. Уточнено е, че условие за качество на информацията е колебанията на вълните да бъдат пропорционални на отклонението от равновесното положение, т.е. трептенията да бъдат хармонични (монохроматични). В работен режим обаче периодичният характер на колебанията се нарушава. Въздействието на различни вътрешни и външни фактори е причина за загуба на енергия и затихване на честотата на разпространение, изразено като допълнително ъглово отклонение на чувствителната ос на жирокопа в работен режим.

В резултат на проучването е установено, че всеки тип жирокоп се характеризира с индивидуален модел на грешките, продиктуван от конструкцията, природата на жирокопичния ефект, спецификата на ЧЕ и др. Някои от тях са чувствителни към наличието на магнитни полета, други не показват такава чувствителност, но генерират високи нива на шум. Въз основа на изученото поведение на отделните групи жирокопи в режим са определени специфични качествени показатели, които са от критично значение за приложението им, като част от процеса на жирокопично ориентиране. На фиг. 10 се посочват основните от тях, терминологията и дефиницията за които се задават [1] от Института на инженерите по електротехника и електроника (Institute of Electrical and Electronics Engineers- IEEE):



Фигура 10. Параметри на грешките, обуславящи разликата между идеално и действително измерване

Дрейфът е определен като отклонение на чувствителната ос на жирокопа при отсъствие на ъглова скорост. При механичните ротори е породен от температурното разбалансиране и усукване в окачването под формата на плавно изменение на равновесното положение на жирокопическото махало, а оттук – и на определеното в резултат на измерванията положение на меридианната равнина. Необходимо е стойността на дрейфа да не излиза извън границите, зададени като функция на точността на ориентирането и продължителността на едно измерване. За жиротеодолити висок клас точност от  $10''$ , постигана чрез 20 минутно следене на прецесионните колебания, дрейфът не трябва да бъде по-голям от  $0.005^\circ/\text{h}$ .

Шумовите компоненти в работен режим са характерни за всички типове жирокопи. Независимо от техния произход и характер, проследяването и регистрирането на информация винаги е съпроводено от паразитни сигнали. Обусловени са от физическата природа на жирокопичния ефект, носителя на кинетичен момент, техническото изпълнение, наличието на различни допълнителни елементи в конструкцията, квантуване на сигнала и преобразуването му от аналогов в цифров формат в системите, които го налагат. Комплексната проява на

различните източници на шум е под формата на допълнително ъглово отклонение на чувствителната ос на жирокопа. Изразява се като случаен дрейф, който е с подчертано недетерминиран характер. Дефиницията, определя този параметър с термина *произволен ъглов ход на жирокопа* (Angle Random Walk- ARW), и описва средното отклонение или грешката от случайните шумове в сигнала. За работния режим на роторния жирокоп шумът в сигнала е причинен от триенето на лагерите в окачването, деформация на корпусните детайли, влиянието на външните магнитни полета или амортизиране на жирокопа. Поради факта, че работния режим на ротора е съпроводен с развиване и поддържане на голяма скорост в процеса на работа, чувствителността към температурните вариации се отразява под формата на разбалансиране. Нивото на случайният шум за механичните жирокопи е с пренебрежимо малки стойности от порядъка на  $ARW_{RG} < 0.0005^\circ/\sqrt{h}$  [2]. За приложение в областта на геодезията, предявеното изискване към тази стойност на е  $ARW_{доп} < 10^{-3}^\circ/\sqrt{\square}$ .

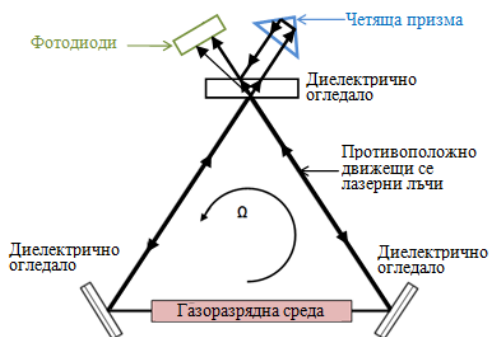
Мащабният коефициент е характерен за всички типове жирокопи и определя отношението на две величини, изменящи се пропорционално една на друга. Определя се в части от милиона (ppm), проценти (%) или единици, в зависимост от конкретния тип величини, чието съотношение изразява. Тази характеристика определя чувствителността на жирокопите, а отношението между нейната стойност и нивото на шум в сигнала определя резолюцията на жирокопа ( $^\circ/s$  или  $^\circ/h$ ). На фиг. 10 коефициентът К е илюстриран чрез апроксимираща линия, която свързва отделните данни от измерването на информативния параметър. Линията на мащабния коефициент при механичните жирокопи съвпада с линията, определяща равновесното положение на чувствителния елемент в работен режим. Това е основна причина предявените изисквания към стойността на този параметър са толкова строги, тогава когато се касае за приложение на жирокопите за автономно геодезическо ориентиране ( $K_{доп} = 1$ ).



### 1.1.2. ОПТИЧНИ ЖИРОСКОПИ

Предвид високите стойности на качествените показатели и предимствата, които предоставят оптичните жирокопи са възможна алтернатива на роторния жироскоп. Групата на оптичните жирокопи обединява две основни разновидности- кръгови лазерни жирокопи (Ring Laser Gyro- RLG) и влакнесто-оптични жирокопи (Fiber Optic Gyroscope- FOG).

Основната концепция при създаване на RLG е генерирането на две вълни, разпространяващи се противоположно в затворен от три или повече огледала контур. Това устройство е изградено като резонатор и при създаване на резонанс на системата, светлината циркулира многократно в затворения контур. При наличие на ъглова скорост  $\Omega$  на резонатора, разликата в дължината на оптичния път  $L$ , изминат от двете вълни, предполага и разлика в честотите им  $\Delta f$ . На фиг. 12 са изобразени основните оперативни елементи в конфигурацията RLG-затворен контур и две монохроматични електромагнитни вълни:



Фигура 12. Схема на лазерен жироскоп с основните конструктивни елементи

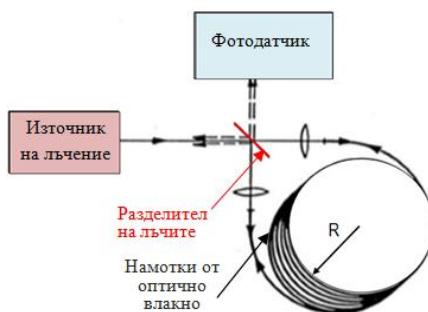
Светлинните лъчи се генерират от лазерното действие на газовия хелий-неонов поток в оптичната кухня. Отражателните повърхности са специално проектирани диелектрични огледала, които отразяват честотата, а предназначението на оптичната призма е за пречупване на един от лъчите. Измерването е възможно чрез комбинирането на лъчите и получаването на интерференчна картина. Фотодетекторът е чувствителен към изменение на честотата  $\Delta f$ , което е информативния параметър и е пропорционален на ъгловата скорост  $\Omega$  на контура.

$$\Delta f = \Delta L \frac{f}{L} = \frac{4Sf}{cL} = \frac{4S}{\lambda L} \Omega, \quad (16)$$

Измерването на фазовото отместване от оптичното устройство се определя въз основата на ъгловата скорост. Отношението, изразено в (16) показва строгата зависимост между стойността на измервания параметър и площта на контура. Установено е, че достигането на високи точностни характеристики обвързват RLG основно с размера на оптичния контур. По този начин тези устройства са изключително точни сензори за специфични приложения, където габаритите на са проблем. За приложение обаче в областта на автономното геодезическо ориентиране това е основен недостатък. Направени анализи, свързани с възможностите на тези жирокопи определят размери с около 30% по-големи [3] в сравнение със съществуващите жиротеодолити към този момент. През 2013 година няколко предприятия в Русия произвеждат жирокомпас на основата на лазерен жирокоп. Оценката на пределно достижимата точност при определяне на азимут е в рамките на минутния диапазон ( $\sim 1.4'$ ), при достатъчно малки габарити на жирокомпасите [4].

Тъй като фазовата разлика (ефектът на Саняк) е пропорционална на скоростта на въртене, чувствителността подобрява като се използват многооборотни намотки, с цел да се увеличи ефективната площ на системата. Това е първоначалната базова мотивация, заложена при появата на FOG. Жирокопичният ефект при FOG се постига във

влакнеста серпентина, основен елемент в общата схема на устройството, показана на фиг. 14: източник на светлина излъчва електромагнитна вълна с определена честота, която се насочва към намотка от оптично влакно. Светлинният лъч първоначално се разделя от сплитер, така че двете половини на вълната се разпространяват в противоположни посоки. При наличие на ъглова скорост на жирокопа около ос, перпендикулярна на равнината на намотката, ефективната дължина на оптичния път на двете вълни се променя по начин, подобен на RLG.



Фигура 14. Схема и основни елементи в устройството на FOG: източник, фотодетектор, намотка от оптично влакно, разделител на лъчите (сплитер).

В съответствие с промяната в дължината  $\Delta L$ , между светлинните вълни се получава фазова разлика  $\Delta\phi$ , зададена от отношението:

$$\Delta\phi = 2\pi \frac{\Delta L}{\lambda} = 2\pi \frac{LD}{c\lambda} \Omega, \quad (24)$$

Основна пречка за създаване на FOG за високоточни приложения е зависимостта от неравномерното температурното колебание по дължината на оптичния кабел. Разпространението на светлинния лъч е свързано със забавяне, поради изменението на температурата в

различните участъци от контура. Установено е, че неравномерното температурно колебание, промяната в скоростта на разпространение на срещуположно движещите се вълни ще бъде различно в различните участъци. Вследствие на това, фазовото отместване, отчетено от фотодетектора е натоварено с грешки, под формата на шум. Шум генерират и активните елементи в жирокопа- детектор и източник на светлина. Комплексното действие на тези компоненти, изразено със стойността на шума е  $ARW_{FOG} = 0.01^\circ/\sqrt{\square} \div 200^\circ/\sqrt{\square}$ . Големият диапазон от стойности е в зависимост от начина на изпълнение, дължината на оптичното влакно, броят на намотките и др. От геодезическа гледна точка, FOG е жирокоп без особен потенциал за приложение. Стойностите на критичните от значение качествени показатели определят тази технология като неприложима за чувствителен елемент в конструкцията на жирокопически теодолити. За това свидетелстват резултати от проведени експерименти с прототипи на инструменти за автономно ориентиране, базиран на FOG. Въпреки сложната измервателна апаратура, внедрена в устройството, точността на определяне на азимут е в градусовия [5, 6] и минутния диапазон [7]. Причина за това е отношението между параметрите (24) и обвързаната с голямата площ на контура повишена чувствителност.

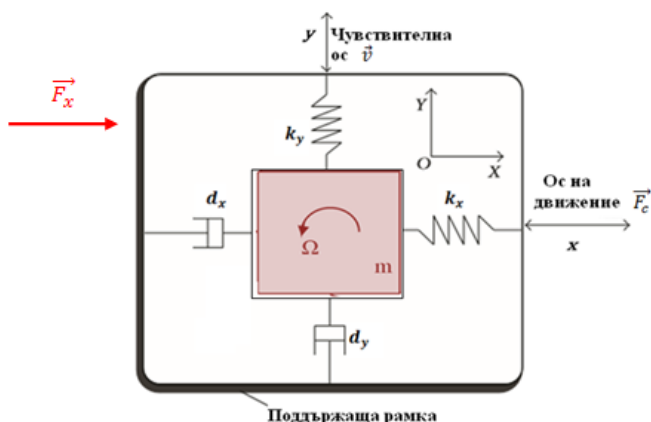
### 1.1.3. ВИБРАЦИОННИ (КОРИОЛИСОВИ) ЖИРОСКОПИ

За разлика от оптичните, едни от най-миниатюрните сензори, генериращи жирокопичен момент са част от групата на вибрационните кориолисови жирокопи (Vibratory Coriolis Gyro- CVG). Появата е свързана с идеята на Фуко за замяна на въртящия се ротор с вибрираща маса, действието на инерционните сили и възникналите ефекти на Кориолис за определяне на ъглова скорост. Към момента съществуват различни конструктивни решения, които се използват в производството на различни видове CVG: в зависимост от начина на окачване, броя на

вибриращите маси и вида на движението на чувствителния елемент. С развитието на микрокомпонентните технологии става възможна и появата на микроелектромеханичните системи с функция на жироскоп (Micro ElectroMechanical Systems – MEMS). При изпълнението им цялостната динамична система е с две степени на свобода (фиг. 17). Силите на Кориолис се появяват вследствие на вибрациите на чувствителния елемент  $m$  и ъгловата скорост на системата  $\Omega$ .

Поради действие на външна сила  $F_x$ , масата извършва движение с линейна скорост  $\vec{v}$  по ос  $x$ . При въртене на жироскопа с ъглова скорост  $\Omega$ , в резултат на ефекта на Кориолис възниква движение под формата на отклонение по ос  $y$ . Силата на Кориолис се измерва чрез регистриране на стойността на отклонението на масата, спрямо електроди, фиксирани неподвижно на поддържащата рамка на жироскопа. Разликата в честотите на трептене са пропорционални на ъгловата скорост на жироскопа.

$$\vec{F}_C = 2m(\vec{v} \times \vec{\Omega}), \quad (26)$$



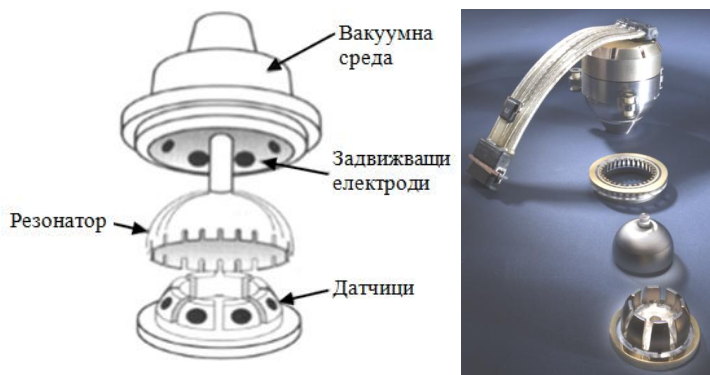
Фигура 17. Схема на CVG- чувствителен елемент с маса  $m$  и еластично окачване:  $\Omega$ - ъглова скорост на въртене на жироскопа, ос  $x$  и  $y$ - съответно ос на движение и чувствителна ос, коефициенти на еластичност ( $k_x, k_y$ ) и коефициентът на затихване ( $d_x, d_y$ ).

MEMS технологията притежава редица предимства: незначителни размери и тегло на жирокопите, и по-ниска консумация на енергия в сравнение с роторните и оптичните жирокопи. MEMS са с много добра устойчивост и издръжливост и като цяло предлагат по-ниска цена от всички други жирокопични технологии. Те намират приложение в най-разнообразни области на науката и технологиите. Въпреки това, за геодезически цели MEMS към този момент е неприложим. Стойностите на качествените показатели, които предоставят са доста далеч от покриване на изискванията за автономно жирокопично ориентиране. Анализът показва, че основното предимство на MEMS жирокопите е причина и за основният недостатък на технологията. Поради характера на микрокомпонентната технология производството е свързано с редица несъвършенства в конструкцията. Освен това наличието на електронни и механични елементи е причина работният режим на жирокопа да е съпътстван от високи нива както на термален, така и на механичен шум. Комплексното им влияние е под формата на грешка, нарастваща пропорционално на квадратния корен от времето и е причина за силно изменение на вибрационните честоти. Резултатът е подчертано затихващ характер на колебанието на механичните вълни. През последните години MEMS висок клас точност показват [8] стойност на дрейфа от порядъка на  $10^\circ/\text{h}$ , при употребата им като самостоятелни сензори, шум в сигнала от порядъка на  $ARW_{\text{MEMS}} = 0.12^\circ/\sqrt{\text{h}}$  и мащабен коефициент, заемащ стойности от порядъка на  $K_{\text{MEMS}} = 300 \div 500$ .

Към момента прототипи на жирокопичен компас, основани на MEMS технологията и в комбинация с други сензори, предоставят точност при определяне на азимут от порядъка на  $0.66^\circ$  [9] до  $0.2^\circ$  [10]. За подобряване на точността е използван Калман филтър за корекция на данните, обединяващ ключовите за точността фактори. По този начин се осигурява

форма на самостоятелно калибриране на сензора и подобряване на точността на определяне на азимута [11, 12].

Разгледана е и една от най-успешните реализации на вибрационните жирокопи е HRG (Hemispherical Resonating Gyroscope) технологията. Поради огромния брой потенциални приложения, изследванията върху този тип жирокопи са активни в продължение на много години, но само в специфични области на приложение [13]. Изображение и схема на един от най-успешните реализации е показан на фиг. 19. Прецесионните трептения се осигуряват от стояща вълна, под действие на външен момент, причинен от електростатични сили. Силите се генерират от електроди, разположени по периферията на корпуса на жирокопа. Под действието на ъглова скорост възниква кориолисово ускорение, което упражнява ъглов момент и е причина за преместване. Информацията за ъгловата скорост се получава от прецесията на възлите на вълната, по отношение на ос, фиксирана към корпуса на жирокопа. Вибрациите по двете взаимно перпендикулярни оси се менят около периметъра на цилиндъра по синусоиден закон.



Фигура 19. Конструктивни елементи в устройството на HRG- схема и изображение: <https://airandspace.si.edu>

Липсата на механични части, ниските енергийни изисквания и минималните нива на шум превръщат HRG в най-чувствителния съвременен вибрационен сензор. В работен режим конструкция на жироскопа е подложена на минимално механично износване и по този начин гарантира дълготрайни експлоатационни качества. HRG е единствената жирокопична технология, която на практика не се нуждае от поддръжка. Наред с всички тези предимства, HRG предоставя най-добрите стойности на основните качествени показатели, разгледани към момента. Данни [14] посочват стойности за шум на HRG в диапазона  $ARW_{HRG}=0.0006^{\circ}/\sqrt{\square} \div 0.00006^{\circ}/\sqrt{\square}$ , дрейф  $0.005^{\circ}/h$  до  $0.0005^{\circ}/h$  и мащабен коефициент в граници от  $K_{HRG}=1 \div 100$ , в зависимост от класа точност на жироскопа.

Посочените качествени показатели отлично кореспондират със стойност, необходима за реализация в най-високоточните класове потребление. Ето защо този тип жирокопи намират място в сателитните системи за насочване, в сферата на космическите технологии.

В ролята на високотехнологичен и високоточен жироскоп, употребата на HRG е привлекателна възможност за много производители. Като представител на високите технологии, съществен недостатък е свързан с изключително скъпия процес на проектиране и производство. Този факт ограничава експерименталните изследвания от приложението му в различни потребителски сфери, въпреки че от геодезическа гледна такива експерименти биха представлявали огромно любопитство.

## 1.2. ИЗВОДИ КЪМ ТЕОРЕТИЧНАТА ЧАСТ

От проучването в теоретичната част на дисертационния труд, в отговор на поставената задача и в съответствие с етапите на решение произтичат следните изводи:



- Внедряването на FOG в конструкцията на жirosкопическите компаси е налице, в приложения които не изискват висока точност. Досегашните изследвания на прототипи на инструменти за геодезическо ориентиране, базирани на FOG са безрезултатни, а интересът от търсене на бъдещи варианти не е сред приоритетите на производителите.
- Резултатите, предоставени от RLG свидетелстват за изключителна прецизност и високи точностни характеристики на устройството за стационарни измервания. Ограничението, наложено от геометричния фактор, който обвързва постиганата точност с размерите на устройството, възпира приложението му в конструкцията на портативни устройства.
- Паразитния сигнал, съпътстващ работния режим на MEMS устройствата е критичен показател за достигане на високи точности. Поради редица слабости, продиктувани основно от технология на изпълнение, достигнатите нива в развитието към този момент не позволява приложението им за прецизни геодезически измервания.
- До момента приложението на механичния роторен жirosкоп в устройството на жirosкопическите теодолити остава без аналог по отношение на оптимално съчетание между точност, надеждност, цена и размер.

## 2. ПРАКТИЧЕСКА ЧАСТ

Наложените от инструкциите правила за реализиране на метода и известните ограничения, които те налагат са свързани с предмета на разглеждане практическата част на дисертационното изследване. Основната задача е да се анализират възможностите за оптимизиране на метода жирокопическо ориентиране и да се изследва ефективността от приложението му в реални условия на измерване. Очакваните резултати от емпиричното изследване са създаване на методика, осигуряваща бързо, надеждно и ефективно извършване на жирокопическо ориентиране и доказване на преките ползи от приложението ѝ в практиката.

### 2.1. РАБОТНА ХИПОТЕЗА

Въз основа на перспективни научни разработки, свързани възможността за оптимизиране на процеса на еталониране са разглеждани и преди [15] е повдигната работна хипотеза. Редуването на еталонни и работни измервания в определен ред, и определяне на конкретна поправка към инструмента за всеки обект, израз на текущото състояние на инструмента, позволява значително съкращаване на операторската работа. Това е и способ за непосредствен контрол върху резултатите и относителна независимост от наличието на високоточни еталонни азимути.

Формулираната работна хипотеза е, че поправката  $\Delta$ , спазвайки преписания от производителя технологичен ред, остава без значими изменения по време на работата на даден обект, особено когато се касае за транспортиране в рамките на страната. Възможно е жирокопическото ориентиране да се оптимизира чрез редуване на еталонни и работни измервания по определена схема, която дава

възможност за определяне на конкретна корекция към стойността на инструментална поправка за всеки обект. По този начин се предоставя реална възможност за повишаване на точността на метода, непосредствен контрол на резултатите и относителна независимост от наличието на високоточни еталонни азимути. Жироскопическото ориентиране се адаптира към практическите потребности по места—извършва се в конкретната координатна система и не се затруднява в случаите, при които координатните системи на повърхността и под земята се различават, а връзката им с държавните координатни системи не е известна с достатъчна точност.

За проверката работната хипотеза е планиран експеримент. Етапите от реализицията на експерименталното изследване са подредени в следния ред:

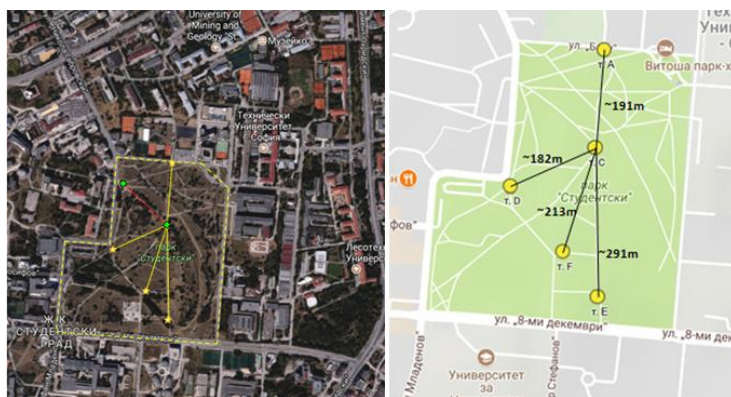
- Да се докаже относителната неизменност в стойността на инструменталната поправка на използваната жироскопична апаратура, както и техническата ѝ пригодност.
- Да се изследва оптимален вариант от редуване на измервания, от гледна точка точността на посочения ъгъл и времето за извършване на жироскопичния контрол.
- Да се провери ефективността от приложението на измервателната програма в реални условия.

## 2.2. ОСНОВНИ РЕЗУЛТАТИ ОТ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНОТО ИЗСЛЕДВАНЕ

### 2.2.1. ПЛАНИРАНЕ НА ИЗМЕРВАНИЯТА

Експерименталният полигон е съставен от пет на брой точки- А, С, D, Е, F е развит на територията на парк „Студентски”, София. Едната от точките (т. С) заема централно място и служи за еталониране на инструмента, а останалите са разположени периферно— за имитиране на

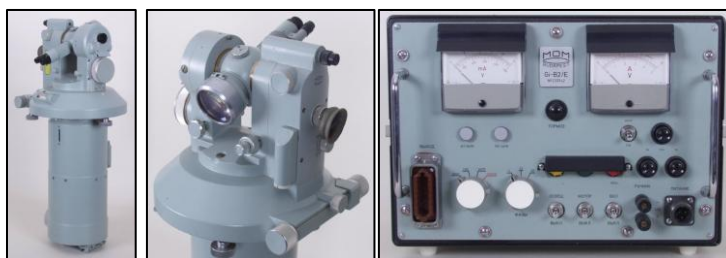
работни измервания в различни минни изработки (фиг. 25). Местата на точките са подбрани по начин, който осигурява максимална отдалеченост и двустранна видимост между тях. По този начин визуирите са с дължина между 182 m и 291 m.



Фигура 25. Сателитен изглед и карта на полигона за експерименталните измервания  
Изображения: ©2017 Google Maps.

Геодезическите координати на всички точки са определени предварително в система БГС2005, с помощта на ГНСС измервания. Тези координати са използвани като еталонни за целите на експеримента.

Измерванията са реализирани с класически тип инструмент-жиротеодолит Gi-B2 (фиг. 26), производство от края на 1970-те години (Magyar Optikai Művek- MOM). Следенето на прецесионните колебания е автоматизирано, но недостатък е ръчното извършване на всички други операции, както и значителните размери и тегло на инструменталния комплект (~63 kg). По отношение на качествата на оптико-механичната система, инструментът е предназначен за извършване на прецизни измервания с паспортната точност ( $1\sigma=0.0031gon=10''$ ) на еднократно определен азимут.



*Фигура 26. Жиротеодолит Gi-B2*

*Общ изглед (теодолит и жироблок), теодолитна част (алидада, зрителна тръба, автоколиматор, микрометрични и затегателни винтове), блок за захранване*

*Точност на определен азимут 10" (0.0031 gon)*

Измервания са извършени в периода 20.08- 04.09.2014 година, в рамките на дванадесет дни, които включват общо 47 жироскопични измервания от пет станции и хоризонтално измерване на посоки в три гируса за определяне на ъглите между страните от полигона.

## 2.2.2. ЕТАЛОНИРАНЕ НА ИНСТРУМЕНТА

За да се изследва стойността на инструменталната поправка, в началото и в края на експеримента е извършен процес на еталониране, според предписанията на инструкциите за проверка и еталониране на поправката на жиротеодолит GiB2. За първоначалното еталониране е избрано направление C-A, процесът включва последователна реализация на девет измервания, проведени на 20.08.2014г. Второто еталониране е извършено на 04.09.2014г. в осем прийома на направление C-F.

Сравнението на жироскопичния азимут  $A_{ij}^G$  и едноименния, получен от изходните координати на точките  $A_{ij}$ , определя величината на инструменталната поправка от всяко измерване:

$$\Delta = A_{ij} - A_{ij}^G, \quad (55)$$

Стойността на геодезическия азимут е получен от посочения ъгъл, изчислен от ГНСС координатите, и стойността на меридианната конвергенция на станцията  $\gamma_i$ :

$$A_{ij} = \alpha_{ij} + \gamma_i, \quad (56)$$

Изчислени са средните стойности за инструментална поправка, както и средните квадратични грешки при първото и второто еталониране:

*Таблица 3. Анализ на резултатите за поведението на инструменталната поправка на жироитеодолит GiB2*

| Дата       | Паспортна ст-ст | Ст-ст от еталонирането | Ср.кв. гр. | Средна стойност |
|------------|-----------------|------------------------|------------|-----------------|
| 20.08.2014 | 90° 00' 11"     | 90° 00' 17"            | 9.6"       | 90° 00' 19.5"   |
| 04.09.2014 |                 | 90° 00' 22"            | 10.4"      |                 |

Установено е, че получените резултати са показателни за относителната неизменност на поправката на инструмента в периода на измерванията, както и за пълното техническо и методическо съответствие на експерименталните данни. Това дава основание да се твърди, че спазвайки предписанията на производителя по време на работа жирокопическата поправка остава без съществени изменения.

### 2.2.3. АНАЛИЗ НА ТОЧНОСТТА НА ПОСОЧЕН ЪГЪЛ, ОПРЕДЕЛЕН ПО ЖИРОСКОПИЧЕН ПЪТ

За да се установи оптималната схема на редуване на работни и еталонни измервания, от гледна точка съотношението между точност и време, е необходимо да се изследва броят прийоми и начинът на

определяне на посочения ъгъл- в право или в право и обратно направление. За целта експерименталните резултати са обработени по няколко начина.

Първоначално е изследван вариант, при който стационарирането е на една от точките и анализът е въз основа на разлики в двойните измервания. Изследвана е постигнатата точност на посочения ъгъл при реализацията на едно ( $k=1$ ) и на две последователни ( $k=2$ ) жирокопични измервания. Анализът на точността е на база изчислени разлики в двойни измервания  $\delta_i^k$ :

$$\delta_i^k = \alpha'_{ij} - \alpha''_{ij}, \quad (70)$$

Където:  $k$ - индекс, носещ информация за броя жирокопични измервания ( $k=1, 2$ );  $\alpha'_{ij}$  и  $\alpha''_{ij}$ - сравнени стойности на посочения ъгъл, получени от различните жирокопични измервания.

В изчисленията участват измерванията на всички станции от експерименталния полигон комбинирани на принципа всяко със всяко. За оценката на точността е изчислена ср. кв. грешка в посочения ъгъл за двата случая:

$$m_{\delta_i^k} = \sqrt{\frac{[\delta_i^k \delta_i^k]}{2n}}, \quad (71)$$

Вторият вариант изследва точността в случай на стационариране на две от точките, т.е. при определяне на посочен ъгъл в право и обратно направление. Анализът е въз основа на вероятностни грешки, които са изчислени последователно за случаите на единично ( $k=1$ ) и двукратно ( $k=2$ ) жирокопично измерване от всяка станция. Вероятностните грешки  $v_i^k$  са изчислени като отклонение на всяко измерване  $\alpha_{ij}$  от получената средна стойност  $\bar{\alpha}_{ij}$ :

$$v_i^k = \bar{\alpha}_{ij} - \alpha_{ij}, \quad (77)$$

В изчисленията участват измерванията на всички станции от експерименталния полигон комбинирани на принципа всяко със всяко. Изчислена е ср. кв. грешка в посочен ъгъл в двата случая:

$$m_{v_i^k} = \sqrt{\frac{[v_i^k v_i^k]}{n-1}}, \quad (78)$$

В табл. 16 са обобщени експерименталните резултати от прилагане на различните измервателни схеми.

*Таблица 16. Обобщение на резултатите от анализа на точността на посочения ъгъл, получен от различните начини на измерване*

| Посочен ъгъл, изчислен от: |              | Стойност на ср. кв. грешка на посочен ъгъл |
|----------------------------|--------------|--------------------------------------------|
| Брой измервания            | Азимут       |                                            |
| 1                          | Една станция | 10.2"                                      |
| 2                          | Една станция | 6.6" (34%)                                 |
| 1                          | Две станции  | 5.5" (45%)                                 |

Анализът на резултатите, въз основа на ср. кв. отклонения сочи следното:

- Най-благоприятната схема на измерване от гледна точка на време е тази, при която на всяка стъпка от ориентирането се извършва по едно измерване, от една станция. В този случай жирокопично ориентиране може да се извърши в рамките на работен ден и да се очаква точност при определяне на азимут в рамките на точността на инструмента.
- Определянето на посочен ъгъл въз основа на азимут, определен в право и обратно направление осигурява постигане на точност от порядъка на  $\pm 5.5''$ , но и увеличаване на времето за измерване, поради необходимост от две стационарания на техниката. От друга страна при реализацията на едно стационариране и извършване на две последователни измервания се очаква постигане на приблизително същата точност, с близо 40% над специфицираната за инструмента и двойно по-бърза реализация. Контрол на ориентирането извършен по този начин предоставят



възможност за определяне на минимални отклонения в единната геодезическа ориентация на обекта.

#### 2.2.4. ПРИЛОЖЕНИЕ НА ИЗМЕРВАТЕЛНАТА ПРОГРАМА В РЕАЛНИ УСЛОВИЯ

За да се изследва ефектът от прилагането на методиката в реални условия е извършен контрол на ориентирането на изработки на различна дълбочина в условия на подземно разработване на полезни изкопаеми (р-к „Челопеч” и р-к „Кошава”) и подземно строителство (метростанция „Витоша”). При всеки обект възприетите за работа координатни системи се различават, различен е и методът на първоначално геодезическо ориентиране на първата страна от подземните полигонови ходове. Приложената методика на работа е в съответствие с възприетата при експерименталния полигон. Предвижда се последователното извършване на работни измервания под земята и еталонни измервания на повърхността, преди и след работните. Реализирани са схеми от измервания, различаващи се по брой прийоми и начин на определяне на азимут- в право или в право и обратно направление. Основна задача е проверка на получените от анализа резултати, чрез прилагане на предложената схема в реални условия на измерване. Факторите, оказващи влияние върху избора на измервателна програма (табл.16) са наложени най-вече от конкретиката на обекта, както и от лимитираното време за престой.

За осъществяване на измерванията са използвани двата модела жирокопични инструменти, налични в катедра „Маркшайдерство и геодезия” на МГУ. Освен жиродеодолит GiB2, ефектът от методиката е изследван и при апаратура от по-нисък клас точност- комплект жирокопична приставка Wild GAK1 (30") и теодолит Wild T16. Техническото състояние на този инструмент е доказано в разработването на магистърската теза на докторанта и е потвърдено в настоящето изследване.

## АНАЛИЗ НА СЪОТВЕТСТВИЕТО НА ДАННИТЕ ОТ ДВАТА ИНСТРУМЕНТА

Експерименталните измервания на територията на рудник „Челопеч” са две, през определен период от време- първоначално на 11.12.2014 г. и повторно в периода 18-24.08.2015 г.

За да се потвърди техническото състояние и достоверността на данните, получени с жирокопична приставка GAK1 е контролирана стойността на еталонната поправка на инструмента при първия и втория експеримент. Резултатите в табл. 23 с достатъчна категоричност потвърждават неизменността в инструменталната поправка на жирокопична приставка GAK1.

*Таблица 23. Неизменност на инструменталната поправка на жирокопична приставка GAK1*

| Дата,<br>дд/мм/гггг | Еталонно<br>измерване | Средна от двете<br>измервания<br>[gon], ["] |
|---------------------|-----------------------|---------------------------------------------|
| 11.12.2014 г        | E1                    | -0.0124                                     |
|                     | E2                    | (-40.2")                                    |
| 18.08.2015 г.       | E1                    | -0.0126                                     |
|                     | E2                    | (-40.8")                                    |

С цел взаимен контрол, първоначалното жирокопично ориентиране на рудник „Челопеч” е извършено чрез последователни измервания с двата инструмента. Сравнени са стойностите на посочните ъгли на еталонното и работно направление, определени от жирокопичните измервания с жиротеодолит GiB2 и жирокопична приставка GAK1. Извършена е съпоставка между стойностите за отклонението на геодезическата основа. Чрез разликата между крайните резултати е изследвано съответствието и състоятелността на данните.

Установено е, че въпреки разликата в класа точност крайните резултати за отклонението на геодезическата мрежа на рудник „Челопеч” с GAK1

и GiB2 са много близки, съответно 12" и 4". Това свидетелства, че при нормална експлоатация на инструментите, данните получени в реални условия на измерване, следва да се приемат за състоятелни и коректни.

## АНАЛИЗ НА РЕЗУЛТАТИТЕ ОТ ПРИЛОЖЕНИЕТО

Данните от проведените на обектите измервания според предложената методика са обработени по начин, който позволява анализ на ефективността от приложението. С цел обосновка на анализа, първоначално е извършена оценка на вътрешната сходимост на резултатите. Априорно е възприето, че измерванията с отделните инструменти са извършени с една и съща точност.

Резултатите от измерванията са оценени по точност въз основа на отклонения, според схемата от измервания, възприета на всеки обект. В табл. 21 и табл. 22 е предоставена е информация за броя на прийомите при всеки вид измерване- работно Р и еталонно Е, както и начинът на редуването им.

Таблица 21. Анализ от приложението на методиката в реални условия на измерване- оценка на вътрешната сходимост на резултатите по отклонения от средно аритметичната стойност

| Обект     | Схема от редуване на измерванията | Инструмент | Вид измерване | Отклонения<br>$v_i = \alpha'_i - \bar{\alpha}$ |
|-----------|-----------------------------------|------------|---------------|------------------------------------------------|
| „Челопеч“ | 4E-4P-4P-4E                       | GAK1       | E1            | 0.4"<br>-9.7"<br>19.2"<br>13.8"                |
|           |                                   |            | E2            | 3.1"<br>-11.7"<br>-1.5"<br>-13.6"              |
|           |                                   |            | P1            | 2.7"<br>13.5"<br>-7.1"<br>-9.1"                |
|           |                                   |            | P2            | -37.8"<br>33.1"<br>-26.0"<br>30.7"             |

Таблица 22. Анализ от приложението на методиката в реални условия на измерване- оценка на точността спрямо разлики на двойни измервания

| Обект    | Схема редуване на измерванията | Инструмент | Вид измерване | Отклонения<br>$\delta_i = \alpha'_i - \alpha''_i$ |
|----------|--------------------------------|------------|---------------|---------------------------------------------------|
| „Кошава“ | E-P-E                          | GiB2       | E             | 1.0"                                              |
| „Витоша“ | E-2P-E                         | GiB2       | E<br>P        | -3.9"<br>0.0"                                     |

Измерванията в р-к „Челопеч” са реализирани в по два прийома- в право и обратно направление за всеки вид измерване. Оценката е въз основа на изчислени вероятностни грешки  $v_i$  за всяко измерване  $\alpha'_i$ , спрямо средната аритметична величина  $\bar{\alpha}$  (табл. 21). В последната колона на табл. 22, резултатите от GiB2 за р-к „Кошава” и метростанция „Витоша” са оценени по точност въз основа на разлика  $\delta_i$  в двойните  $\alpha'_i$  и  $\alpha''_i$  измервания Използвани са следните работни формули:

$$v_i = \alpha'_i - \bar{\alpha}, \quad (89)$$

$$\delta_i = \alpha'_i - \alpha''_i, \quad (90)$$

За оценка на точността са изчислени стойностите на средните квадратни грешки на измерванията, съответно с жиро스코пична приставка GAK1 и жиротеодолит GiB2:

$$m_{GAK1} = \sqrt{\frac{[vv]}{n-1}} = 18.7'', \quad (91)$$

$$m_{GiB2} = \sqrt{\frac{[\delta\delta]}{2n}} = 1.6'', \quad (92)$$

Получените резултати свидетелстват, че отклоненията са в рамките на паспортна точност на инструментите, а повечето случаи са дори значително по-ниски от тази граница. Това е доказателство за формулираната в работната хипотеза възможност за повишаване на точността на метода при определяне на поправка към еталонната стойност на инструментите за всеки обект.

## ОБОБЩЕНИЕ НА РЕЗУЛТАТИТЕ

Въз основа на поставените задачи и получени резултати е установено, че:

Изследването относно пригодността на налична апаратура доказва отличните качества на използваните инструменти жиротеодолит GiB2 ( $\sigma=\pm 10''$ ) и жирокопична приставка Wild GAK1 ( $\sigma=\pm 30''$ ). Доказано е, че въпреки производството по-старо поколение, получените данни сочат за състоятелност, коректност и надеждност на резултатите. Изложената методика на работа предоставя възможност за избор на оптимална схема от измервания, спрямо търсената точност и времето за реализиране. По този начин е осигурено извършване на жирокопично ориентиране в рамките на по-малко от един ден и от един оператор. Начинът на обработка на данните, чрез определяне на конкретна поправка към инструментите за всеки обект, гарантира повишаване на точност и своевременен контрол над резултатите. Проверката на предложената методика потвърждава високата ефективност при реализацията ѝ в реални условия на минни и строителни обекти.

## 2.3. ИЗВОДИ КЪМ ПРАКТИЧЕСКАТА ЧАСТ

Обобщените резултати от извършеното експериментално изследване са основа, на която стъпват следните изводи:

- Доказана е неизменност на инструменталната поправка на използваната апаратура. Установените отклонения в стойността ѝ по време на експеримента са  $\pm 5''$  за жиротеодолит GiB2 и  $\pm 0.6''$  за жирокопична приставка GAK1. Това потвърждава формулираното в работната хипотеза, че спазвайки преписания от производителя технологичен ред, поправката остава без значими изменения по време на работата на даден обект.

- От анализа на точността на посочния ъгъл, определен по жироскопичен път е установено, че оптималната схема на измерване е еднократно стационариране и реализация на две последователни жироскопични измервания. По този начин се очаква точност, с близо 40% над специфицираната за инструмента и реализиране на измерване в рамките на един-два часа.
- Предложената схема от редуване на измервания позволява еталониране на инструмента спрямо текущото му състояние на конкретния обект. По този начин жироскопическото ориентиране се оптимизира значително в сравнение с заложените в инструкциите изисквания. Извършеното експериментално изследване доказва, че това е ключов фактор за достигане на по-добра точност от специфицираната в техническата характеристика на инструментите.
- Извършена е проверка на предложената методика посредством жироскопичен контрол на ориентирането на реални минни и строителни обекти. Получените средни квадратични грешки на измерванията в реални условия са съответно 1.6" за жиротеодолит GiB2 и 18.7" за жироскопична приставка GAK1. Резултати от анализа на точността потвърждават убедително надеждното приложение методиката в условия на подземен добив и при изграждане на изработки, част от подземната инфраструктура.

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целта на дисертационния труд е ориентирана към проблем, който се откроява с особена важност и актуалност в съвременната маркшайдерска и геодезическа практика, а именно приложението на метода на жироскопическо ориентиране. Необходимостта от изследването е продиктувана най-вече от ограниченията, свързани с практическата реализация на процеса.

Инструментите за автономно ориентиране притежават отличителни особености, сред които сложната конструкция, големи размери и тегло, характерни включително и за апаратурата от най-ново поколение. Съобразно предимствата, които предоставят съвременните жироскопични технологии е разгледана една възможност в посока бъдещо усъвършенстване на жироскопическите теодолити и компаси. Въз основа на критичен преглед на съвременните публикации са проучени и изследвани принципите на действие, основните конструктивни особености и факторите, влияещи върху качествените характеристики на безроторните жироскопи. В отговор на поставената задача е извършен анализ на различните качествени параметри, дадена е обща оценка на предимствата и недостатъците на съвременните жироскопи, както и прогноза за перспективите им за приложение в сферата на автономното геодезическо ориентиране.

Достигането на високи точности в процеса на автономно ориентиране е свързано с периодично калибриране на жироскопическите инструменти. Заложените в инструкциите правила, обвързват операторите с периодично реализиране на значителен брой измервания на посоки, чиито азимути са определени с висока точност. Под формата на хипотеза е дефинирано предложение за оптимизиране на процеса, която е потвърдена в хода на проведеното експериментално изследване. Редуването на еталонни и работни измервания по определена схема осигурява редица съществени предимства, и успоредно с това възможност за съкращаване на времето за извършване на измерванията.



Еталониране, съобразно текущото състояние на инструмента е съществен фактор за достигане на точност, превишаваща заложената от производителя в техническия паспорт. Анализът на резултатите, получени по приложената методика категорично доказва високата точност на посочните ъгли, определени жирокопически в координатната система на различните обекти. Доказано е, че по тази методика може да се получават високоточни резултати дори с жирокопични инструменти от по-старо поколение, без съвременни електронни системи за автоматизирано следене и отчитане.

В заключение може да се отбележи, че постигнатите резултати от проведеното експериментално изследване утвърждават и развиват качествата на метода, в съответствие с поставената цел. Контролно ориентиране на подземни изработки е приложимо както за целите на разработването на полезни изкопаеми по подземен начин, така и при подземното строителство. Получените резултати са надеждни и точността им не зависи от методите на първоначално ориентиране и дълбочината на изработките. Всичко това определя приложението на жирокопическото ориентиране с голям потенциал при изпълнението на най-отговорните маркшайдерски задачи. Налице е необходимостта от бъдещо популяризиране на метода и утвърждаването му като полезна практика в миннодобивната и строителната практика.

#### IV. ПРЕТЕНЦИИ ЗА ПРИНОСИ

Приносните моменти в дисертационното изследване се съдържат в изпълнението на поставените задачи:

1. Извършен е теоретичен анализ относно развитието на съвременните безроторни жирокопи в световен мащаб. Изследвана е възможността от внедряването им в конструкцията на жиротеодолитите. Аргументирана е прогнозата, че до момента приложението на механичните роторни жирокопи в устройството на жирокопическите теодолити е без конкурент.
2. Предложена е схема от подходящо редуване на еталонни и работни измервания, гарантираща повишаване на точността и оптимизиране на практическата реализация на метода на жирокопическо ориентиране. Доказана е висока степен на ефективност от приложението на методиката в реални условия на измерване при подземното разработване и подземното строителство.

## **V. ПУБЛИКАЦИИ, СВЪРЗАНИ С ТЕМАТА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД**

- Минчев М., В. Миланова. Жироскопическо ориентиране в маркшайдерството. Минно дело и геология, 3-4,2014
- Миланова В., М. Минчев. Възможности за приложение на жироскопическото ориентиране в маркшайдерството. XIII Национална конференция с международно участие по открит и подводен добив на полезни изкопаеми, Варна, 2015.
- Миланова В., М. Минчев. Жироскопичен контрол на ориентирането на подземни изработки. V Национална научно-техническа конференция с международно участие Технологии и практики при подземен добив и минно строителство, Девин, октомври 2016.
- Камбуров А., Д. Сосеров, В. Миланова, М. Евгениев. Дейности за повишаване на интереса към маркшайдерските науки и квалификацията на студенти и кадри в минния бранш. V Национална научно-техническа конференция с международно участие Технологии и практики при подземен добив и минно строителство, Девин, октомври 2016.

## VI. БИБЛИОГРАФИЯ

1. (2001). IEEE Standard for Inertial Sensor Terminology, IEEE Std 528-2001.
2. Воронков, Н., Н. Ашимов. (1973). Гироскопическое ориентирование, изд. Недра, Москва.
3. Savage, P. (1984). AGARD Lecture Series 113, Advance strapdown systems, pp 2-24.
4. Голяев, Ю., Ю. Колбас, Т. Соловьева. (2013). Лазерный гирокомпас на зеемановском кольцевом лазере, Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», с. 44.
5. Tajmar M., F. Plesescu. (2011). Fiber-Optic-Gyroscope Measurements Close to Rotating Liquid Helium, Space Propulsion & Advanced Concepts Austrian Institute of Technology GmbH.
6. Abbas A. (2013). Design and Implementation of FOG Based Gyrocompass, Applied Mechanics and Materials Online: ISSN: 1662-7482, vol. 332, pp 124-129.
7. Zhang Zhijun, Sun Jiyub, Wu Keyonga. (2005). Error analysis and test study of fiber optic gyroscope north-finder, Advanced Sensor Systems and Applications II, Proceedings of SPIE Bellingham, WA, vol. 5634.
8. Weinberg, M., A. Kourepenis. (2000). Error sources in in-plane silicon tuning-fork MEMS gyroscopes, Microelectromechanical Systems, Journal of microelectromechanical systems, vol. 15, no. 3, pp 479- 491.
9. Yongjian, Z. (2017). A Novel MEMS Gyro North Finder Design Based on the Rotation Modulation Technique, Sensors 2017, vol.17, n.5.
10. Prikhodko, I. (2013). What is MEMS Gyrocompassing? Comparative Analysis of Maytagging and Carouseling, Journal of microelectromechanical systems, pp 8-10.
11. Greiff, P., B. Boxenhorn, T. King, L. Niles. (1991). Silicon monolithic micromechanical gyroscope, Proceedings of IEEE International Conference on Solid State Sensors and Actuators, pp 966–968.
12. Hopkin, I. (1997). Performance and design of a silicon micromachined gyro, Proc. Symp. Gyro Technology, pp 1.0–1.10.

13. Izmailov, E., M. Kolesnik, A. Osipov, A. Akimov. (1999). Hemispherical resonator gyro technology. Problems and possible ways of their solutions. In: RTO SCI International Conference on Integrated Navigation Systems, St. Petersburg, Russia.
14. Rozell, D. The Hemispherical Resonator Gyro: From Wineglass to the Planets, Northrop Grumman Co, Navigation Systems Division.
15. Minchev, M. (1982). Gyrotheodolithe azimuth determination high-precision methods. Vth International symposium for mine surveying, Varna, 19-25 September, Vol. 2, 209-216