



**ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ –  
СОФИЯ**

**филиал Пловдив**

**Факултет по Електроника и Автоматика  
Катедра Електроника**

**Маг. инж. Росен Милчов Божилов**

**ПОДОБРЯВАНЕ НА МЕТРОЛОГИЧНИТЕ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ЕЛЕКТРОНЕН ЧЕТИРИЛЪЧЕВ  
МЪТНОМЕР**

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

**на дисертация за придобиване на образователна и научна степен  
"ДОКТОР"**

**Област: 5. Технически науки**

**Професионално направление: 5.2 Електротехника, електроника и  
автоматика**

**Научна специалност: Електронизация**

**Научен ръководител: доц. д-р Катя Стефанова**

**ПЛОВДИВ, 2018 г.**

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Електроника“ към Факултета по Електроника и Автоматика, ТУ - София, филиал Пловдив, на редовно заседание, проведено на 15.11.2018 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 22 март 2019 г. от 13.00 часа в зала 4425 на ТУ-София, филиал Пловдив, гр. Пловдив, ул. „Цанко Дюстабанов“ № 25, на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-5.2.-29 от 05.12.2018г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. проф. д-р инж. Галидия Иванова Петрова - председател
2. доц. д-р инж. Катя Кръстева Стефанова - научен секретар
3. проф. д-р инж. Никола Вичев Колев
4. проф. д-р инж. Анатолий Трифонов Александров
5. доц. д-р инж. Надежда Лиозовна Евстатиева

Рецензенти:

1. проф. д-р инж. Галидия Иванова Петрова
2. проф. д-р инж. Никола Вичев Колев

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Факултета по Електроника и Автоматика на ТУ-София, филиал Пловдив, ул. „Цанко Дюстабанов“ № 25, Пловдив.

Дисертантът е в самостоятелна форма на обучение към катедра „Електроника“ на ФЕА, ТУ-София, филиал Пловдив. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора.

Автор: маг. инж. Росен Милчов Божилов

Заглавие: Подобряване на метрологичните характеристики на електронен четирилъчев мътномер.

Тираж: 10 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

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

---

### **Актуалност на проблема**

Значението и цената на сладководните води в световен мащаб непрекъснато се увеличава. Необходимите количества могат да се осигурят единствено с повишаване на преработените и пречистени води. Измерването на мътност се използва във всички етапи от третирането на водите. Четирилъчевите мътномери намират широко приложение поради точността си, широкия диапазон на измерване и повишената надеждност. Следователно, актуален проблем е подобряването на метрологичните и експлоатационните характеристики на уредите мътномери с цел повишаване ефективността на процесите на преработка на водите и снижаване на разходите.

Наличието на математически модел на четирилъчевия мътномер би спомогнало анализа и усъвършенстването на конструкцията му. Ето защо представлява интерес осъществяването на научни изследвания и разработки за създаването на адекватен и практически приложим математически модел.

Анализът и количествената оценката на факторите, определящи точността на измерване с четирилъчев мътномер, като: линеаризация на показанията, влияние на замърсяването и фоновата осветеност, са основа за подобряване на характеристиките на уреда. Това е предпоставка за нови експериментални изследвания, разработване и създаване на подходящи конструктивни решения и алгоритми за обработка на сигналите, приложими в четирилъчевите мътномери.

### **Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване**

Цел на дисертационното изследване: **Подобряване на метрологичните характеристики на електронен четирилъчев мътномер.**

#### **Основни задачи:**

1. Извършване на практически изследвания за измерване на мътност на разтвор в широк диапазон на изменение. Анализ на получените резултати с цел установяване приложимостта на теоретичните описания на процесите на преминаване и разсейване на светлина в разтвор. Избор и предлагане на адекватни математически описания на процесите.

2. Разработване на подробен и адекватен Математически модел на четирилъчев уред за измерване на мътност. Моделът трябва да отразява връзката между геометрията на сензора, оптичните елементи, използвания алгоритъм за обработка на сигнала, мътността на пробата и изходния електрически сигнал. Коректността на Математическия модел трябва да бъде доказана. На основа на модела да може да се оценява влиянието на външни смущаващи въздействия като: замърсяване, промяна на температурата на средата, външно осветяване и др., с оглед подобряване и ускоряване анализа на метрологичните параметри на съществуващите и проектирането на нови четирилъчеви сензори.

Математическият модел трябва да бъде пригоден за практически инженерни пресмятания. Това означава, да се създаде Методика за приложението му за определяне на предавателните функции на четирилъчев мътномер при действителна измервана среда и конкретни оптични прибори. За поясняване на предложената Методика, е необходимо да се предоставят и нагледни Примери за практическо ѝ използване.

3. Да се предложат способи за линеаризация на сигнала от четирилъчев сензор, с оглед разширяване на диапазона и точността на измерване с четирилъчев мътномер.

4. Оценка на влиянието на замърсяването на оптичната система на четирилъчевия сензор, спрямо резултата от измерване с мътномер. На база получените резултати да се дадат препоръки за подобряване на метрологичните му характеристики.

5. Оценка на влиянието на фоновото осветяване, спрямо точността на измерване с четирилъчевия мътномер. На база получените резултати да се дадат препоръки по

отношение на структурата и способите на обработка на сигналите в уреда, с оглед подобряване на метрологичните му характеристики.

### Методи за изследване

За описание на функциите на предаване, изразяващи Математическия модел на четирилъчев мътномер са използвани аналитични изрази, основаващи се на: основните методи за измерване на мътност, подобреното описание на процеса на разсейване на светлина и апроксимацията на таблични и графични данни, предоставени от производителите на оптоприбори. Изчисленията и графичната визуализация на резултатите от изследванията са направени в програмната среда OriginPro.

Извършеното симулационно моделиране е в среда Simulink – MATLAB или OrCAD Pspice за разработените в труда математически модели. Кой от програмните продукти да се използва, е в зависимост от особеностите и удобството на необходимите изследвания. При всички оценки се търси сравнение между предсказаните от симулациите данни и експериментално получените резултати за определени едни и същи параметри, с цел доказване достоверността на теоретичното моделиране. След потвърждаване коректността на симулациите, те се използват за изследване и оценка на параметри и зависимости, за които е трудно или невъзможно да се определят чрез практически експерименти. Комплексният анализ дава разностранно и коректно дефиниране на факторите, определящи точността при измерване на мътност.

При практическите изследвания са използвани целенасочени експерименти за оценка на влиянието на измерените фототокове от: геометричните размери на сензора, промяната на интензитета на излъчване на светоизточниците и мътноста. За намаляване на флуктуацията на получените резултати се използва статистическа обработка.

### Научна новост

1. Предложен е **Подобрен теоретичен модел** на явлението разсейване на светлина, при който всяка частица от оценявания обем на разтвора, участва в процес на еднократно разсейване и еднократна абсорбция на облъчващия светлинен поток.

2. Създадени са нови средства за анализ - **Аналитично описание на четирилъчев сензор** за мътност и **Математически модел на четирилъчев мътномер**, описани със съответните функции на предаване. Изведени са изразите на функциите на предаване на типичен четирилъчев мътномер и за четирилъчев сензор при процеса на разсейване /основани на *Подобрения теоретичен модел*/ и на преминаване на светлина през разтвор.

3. Предложена и извършена е експериментална симулация на влиянието на замърсяването, чрез изменение захранването на светоизточниците с два типа четирилъчеви сензори за мътност. За количествено определяне намаляването на влиянието от замърсяване при измерване с многолъчева конструкция, спрямо простото нефелометрично или турбидиметрично измерване, се въвежда и определя нова величина - **коефициент на потискане на замърсяването CRC** /contamination rejection coefficient/.

4. Представен е усъвършенстван макромодел на ОУ от ниво 3 - тип MPZ1, използван в симулационните изследвания на трансимпедансен усилвател с обратна връзка от тип “bootstrap” в среда Orcad Pspice.

### Практическа приложимост

1. Представена е **Методика за определяне на предавателните функции на конкретен четирилъчев сензор и среда**, включваща и **Методика за определяне на предавателната функция на светодиода** на база техническите параметри на прибора. Валидността и приложимостта за практически инженерни пресмятания, на представените Методики са потвърдени с подходящи приложни **Примери**.

2. Изработен е **Експериментален четирилъчев сензор** за мътност, с променяща се геометрия и ток през светодиодиите, с който са направени общо 3960 измервания. Резултатите от измерванията са използвани за съпоставка с теоретично предсказаните данни от математическите модели

3. Предложен е способ за линеаризация и е реализиран електронен модул за мътномер с допълнителна аналогова обработка на сигнала, спрямо типичен мътномер. Описан е способ за линеаризация по цифров път, основаващ се на метода на най-малките квадрати, чрез апроксимиращ полином от трета степен.

4. Създаден е алгоритъм, повишаващ експлоатационната ефективност на мътномер, чрез определяне на текущата необходимост от почистване на сензора на четирилъчев мътномер или наличието на дефектирал оптоприбор.

5. Предложена е концепция за изграждане на четирилъчев мътномер, с използване на модулация/синхронна демодулация на висока честота и смесена аналогова и цифрова обработка на сигналите.

### **Апробация**

Основните резултати на дисертационния труд са обсъждани на:

- Национални симпозиуми с международно участие: „МЕТРОЛОГИЯ и надеждност ‘96”, 19-23.09.1996; „Метрология и метрологично осигуряване 2014”, 7-11.09.2014г, Созопол.

- Научни сесии на СУБ – Пловдив: секция „Техника и технологии”, естествени и хуманитарни науки“, 22.10.2004г.; секция „Техника и технологии“, 31.10-1.11.2014г.; секция „Техника и технологии”, 5-6.11.2015.

Цялостно, дисертационният труд е обсъждан и одобрен на заседание на научно-методичния семинар на катедра Електроника при ТУ-София, Филиал Пловдив

### **Публикации**

Основни резултати и постижения от дисертационния труд са публикувани в национални и международни издания. Общият брой на статиите е осем, от които:

- 1 бр. самостоятелни в: Национални симпозиуми с международно участие: „Метрология и метрологично осигуряване 2014”, 7-11.09.2014г, Созопол;

- 7 бр. в съавторство: - 1бр. в Научно-приложно списание „Водоснабдяване Канализация Пречистване на водата”, брой 3, октомври 1996; 2бр. в - Национален симпозиум с международно участие: Созопол; „МЕТРОЛОГИЯ и надеждност ‘96”, 19-23.09.1996; 1бр. в „Метрология и метрологично осигуряване 2014”, 7-11.09.2014г, Созопол; 3бр. в СУБ – Пловдив, 2004г. и 2015г.

### **Структура и обем на дисертационния труд**

Дисертационният труд е оформен, като основен текст от **222** страници и Приложения от **78** страници. Включва увод, **5** глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо **163** литературни източници, като **73** са на латиница, **63** на кирилица, а останалите са интернет адреси. Основният текст включва **87** фигури и **21** таблици, а Приложенията - **26** фигури и **49** таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

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

---

### **ГЛАВА 1. Анализ на съществуващите методи и средства за измерване мътност и концентрация на суспендирани частици.**

Описани са областите на приложение на измерването на мътност и концентрацията на неразтворени (суспендирани) частици в течност.

Обяснени са основни зависимости и методи, използвани при оценка на мътността: Метод, основаващ се на оценка на интензитета на преминалата или разсеяната от водната проба светлина; Метод на отношението от разсеяната към преминалата светлина. Посочени са Стандартите при измерване на мътност - USEPA 180.1 и ISO 7027. Описани са единици за измерване на мътност и концентрация, Първичните и Вторични сертифицирани сравнителни материали. Разгледани са оптоприборите и конструктивните особености, използвани в уредите за измерване на мътност.

Систематизирани и описани са основни фактори, влияещи върху точността при измерване на мътността. Посочени са способите за тяхното намаляване.

Обяснен е принципът на действие на четирилъчев мътномер и неговите специфични аспекти за обработка на сигналите на база аналоговия мътномер МФП-4. Направен е изводът, че метрологичните характеристики на съществуващите четирилъчеви мътномери могат да се подобрят. Подчертано е, че в прегледаната литература, отнасяща се до настоящия Труд, не бе намерена информация за математически модел, описващ някакъв мътномер. Не са открити и данни, които да послужат за оценка на влиянието на замърсяването или на фоновата осветеност, което е предпоставка за задълбочени изследвания в тази посока.

Въз основа на литературния обзор и очертаните проблеми, като основна цел на дисертационния труд се поставя:

#### **Подобряване на метрологичните характеристики на електронен четирилъчев мътномер.**

За постигане на тази цел са набелязани следните задачи:

1. Извършване на практически изследвания за измерване на мътност на разтвор в широк диапазон на изменение. Анализ на получените резултати с цел установяване приложимостта на теоретичните описания на процесите на преминаване и разсейване на светлина в разтвор. Избор и предлагане на адекватни математически описания на процесите.

2. Разработване на подробен и адекватен Математически модел на четирилъчев уред за измерване на мътност. Моделът трябва да отразява връзката между геометрията на сензора, оптичните елементи, използвания алгоритъм за обработка на сигнала, мътността на пробата и изходния електрически сигнал. Коректността на Математическия модел трябва да бъде доказана. Въз основа на модела да може да се оценява влиянието на външни смущаващи въздействия като: замърсяване, промяна на температурата на средата, външно осветяване и др., с оглед подобряване и ускоряване анализа на метрологичните параметри на съществуващите и проектирането на нови четирилъчеви сензори.

Математическият модел трябва да бъде пригоден за практически инженерни пресмятания. Това означава, да се създаде Методика за приложението му за определяне на предавателните функции на четирилъчев мътномер при действителна измервана среда и конкретни оптични прибори. За поясняване на предложената Методика, е необходимо да се предоставят и Примери за практическо ѝ използване.

3. Да се предложат способи за линеаризация на сигнала от четирилъчев сензор, с оглед разширяване на диапазона и точността на измерване с четирилъчев мътномер.

4. Оценка на влиянието на замърсяване на оптичната система на четирилъчевия сензор, спрямо резултата от измерване с мътномер. На база на получените резултати да се

дадат препоръки по отношение на структурата и градивните елементи на уреда, с оглед подобряване на метрологичните му характеристики.

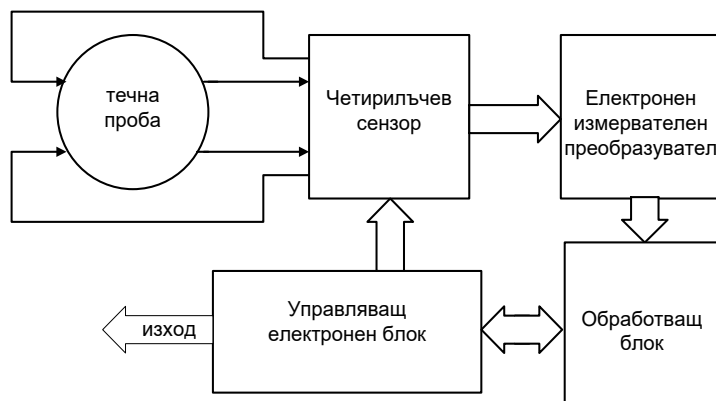
5. Оценка на влиянието на фоновото осветяване, спрямо точността на измерване с четирилъчевия мътномер. На база получените резултати да се дадат препоръки по отношение на структурата и способите на обработка на сигналите в уреда, с оглед подобряване на метрологичните му характеристики.

## ГЛАВА 2. Математически модел на четирилъчев мътномер.

В глава 2 е изведен Математическият модел на четирилъчев мътномер. За целта е предложено Подобро описание на процеса на разсейване на светлина, създадено е Аналитично описание на четирилъчев сензор и е приложена съответна Методика. Основни моменти в тази глава са:

### 2.1 Блокова схема на четирилъчев мътномер.

За да се създаде адекватен модел на уреда четирилъчев мътномер е необходимо прецизно описание на реалния физически инструмент и неговото функциониране. Най-опростената блокова схема на уреда е показана на фиг.2.1.



Фиг. 2.1 Блок схема на четирилъчев уред за измерване на мътност.

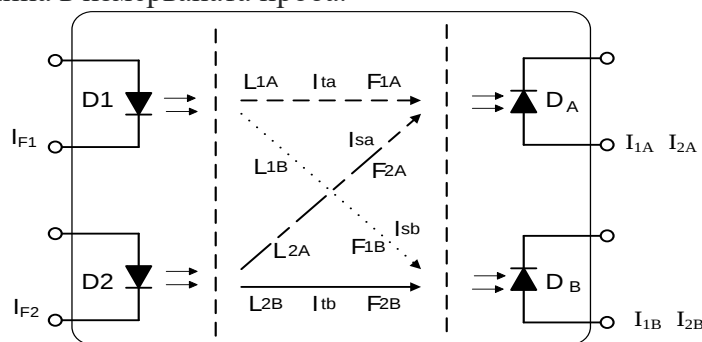
### 2.2 Функция на предаване на четирилъчев мътномер.

За създаване на математически модел на уреда е необходимо да се изведе неговата предавателна функция. Усилването на сигнала от Електронния измервателен преобразувател и визуализацията на резултата от измерване и формиране на стандартни аналогов или цифров сигнал, извършвани от Управляващия електронен блок /Фиг. 2.1/, са рутинни дейности за инженерната практика в областта на електрониката. Решено е тяхното действие да не се разглежда. В настоящия Труд се приема, че общата предавателна функция на мътномера, се определя на база отделни предавателни функции на блоковете: Четирилъчев сензор и измерваната среда, Обработващ блок.

### 2.3 Аналитично описание на четирилъчев сензор за мътност.

Най-специфичната част от четирилъчевия мътномер е неговият оптичен сензор. За всяко едно измерване, в четирилъчевия сензор се формират четири светлини трасета и съответно се генерират четири фототока. Два от тях съответстват на интензитета на преминалата и два на интензитета на разсеяната от пробата светлина - Фиг. 2.2. Аналитичното описание на четирилъчевия сензор изразява връзката между генерираните фототокове и големината на измерваната мътност, в зависимост от параметрите на използваните светодиоди, фотодиоди и геометричните размери на сензора. За аналитичното описание, е необходимо да се изведе функцията на предаване за всяко едно от четирите светлини трасета. При симетрична  $90^0$  конструкция на сензора, /Фиг.1/ и еднаквост на съответните светодиоди –D1, D2 и фотодиоди – DA, DB, две по две

функциите на предаване съвпадат. Необходимо е да се определи една функция на предаване, описваща процеса на преминаване на светлина и една, оценяваща процеса на разсейване на светлина в измерваната проба.



Фиг.2.2 Конструктивно-електрическа схема на четирилъчев сензор.

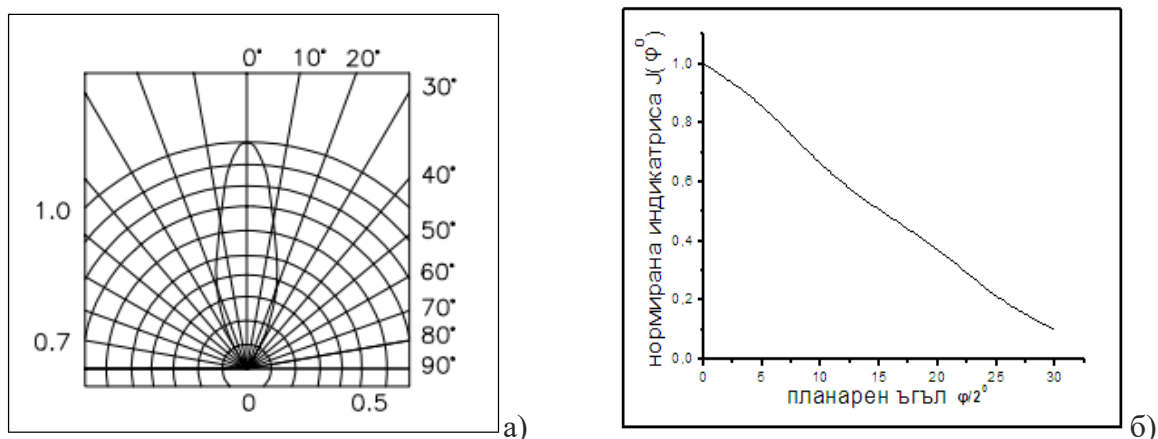
За да се получи Аналитичното описание на предавателните функции на четирилъчевия сензор, се определят последователно предавателните функции на елементите, които ги определят: - инфрачервен светодиод, силициев фотодиод, основните геометрични параметри на сензора и измерваната среда.

### 2.3.1 Определяне функцията на предаване на инфрачервен светодиод.

Функцията на предаване на светодиодиод е аналитичен израз, описващ изходния сигнал, получен вследствие неговото действие от факторите, които го определят. За изходен сигнал се приема средният интензитет на излъчване  $I_{av}$  в зададен пространствен ъгъл. Средният интензитет на излъчване, осветява с една и съща степен всяка точка от пространствения ъгъл, в който е дефиниран. Средната стойност на интензитета на излъчване  $I_{av}$  на светодиодиод зависи от тока, протичащ през право поляризиращия преход  $I_F$ , околната температура  $t^0$ , големината на пространствения ъгъл  $\Omega$ , под който се осветява изследваната проба, интензитета на изходното лъчение по оптичната ос и разпределението на това лъчение в пространството. Освен зададения пространствен ъгъл, останалите фактори, които го определят, типично се предоставят от производителя му в таблична и графична форма, например за LED L-53SF7C. Приборът отговаря на изискванията на ISO7027 за източник на светлинно излъчване при измерване на мътност, относно дължина на вълната за максимално излъчване, ширина на спектъра на излъчване и тесен ъгъл на излъчване. За да е възможно използването и обработването на графично и таблично представените данни за определен прибор по аналитичен способ, данните трябва да се преобразуват в съответни математически изрази.

Разработена е Методика за практическо извеждане на предавателната функция на светодиодиод, чрез използване на полиноми от първа степен, за да се апроксимират графичните или таблични данни. Зависимостите на интензитета на изходното лъчение по оптичната ос от тока  $I_F$ , протичащ през право поляризиращия полупроводников преход и околната температура  $t^0$  са линейни и се описват съответно с по два коефициента –  $a_1, b_1$  и  $a_3, b_3$ .

Типично светодиодиодът излъчва симетрично в пространството, спрямо централната оптична ос, тоест свети еднакво в хоризонталната и във вертикалната равнина, спрямо централната оптична ос. Тогава, разпределението на неговото лъчение в пространството, се описва само с една графика на нормираната индикатриса на лъчението от планарен ъгъл в кръгова координатна система -  $J'(\varphi)$ . При преминаване от кръгова координатна система в декартова координатна система, се установява, че зависимостта на индикатрисата от определящия я планарен ъгъл е близка до линейна - Фиг. 2.6. Подходящо е зависимостта да се апроксимира с права, определена с два коефициента  $a_2, b_2$ .



Фиг.2.6 Диаграма на разпределението на нормираната индикатриса  $J'(\varphi)$  за инфрачервен светодиод L-53SF7C: а) –кръгова координатна система; б) - декартова координатна система.

За да се изчисли средният интензитет на излъчване, трябва да се интегрира индикатрисата на разпределение в пространствен ъгъл  $\Omega$ , определен от зададен планарен ъгъл  $\theta$ . За тази цел се използват връзките, между планарен и пространствен ъгъл в нормална и диференциална форма. Използвайки методиката за практическо извеждане на предавателната функция на светодиода, се получава изразът, даващ връзката между средния интензитет на излъчване и факторите, които го определят:

$$I_{av}(I_F, t^\circ, \theta) = \frac{(a_1 I_F + b_1) \cdot (a_3 t^\circ + b_3)}{4\pi^2 (1 - \cos(\frac{\theta}{2}))} \int_0^\theta \int_0^{2\pi} (a_2 \varphi + b_2) \cdot 1 \cdot \sin \varphi \cdot d\varphi d\psi =$$

$$= \frac{(a_1 I_F + b_1) \cdot (a_3 t^\circ + b_3) \cdot (1 - a_2 \cdot \theta \cdot \cos \theta + a_2 \cdot \sin \theta - b_2 \cdot \cos \theta)}{2\pi \cdot (1 - \cos(\frac{\theta}{2}))} \quad (2.21)$$

Използвайки тази апроксимация, изчислената стойност за средния интензитет на излъчване няма да надвишава действителната му стойност, което е подходящо за практически инженерни пресмятания. Извършена е проверка и е установена достоверността на Методиката за определяне на предавателната функция на светодиода.

### 2.3.2 Определяне функцията на предаване на фотодиод.

Функцията на предаване на фотодиод изразява връзката, между големината на изходния му електрически сигнал и мощността  $P_r$  на осветяващия го светлинен поток. Тази връзка се обуславя от редица фактори. В зависимост от режима на работа и товарното съпротивление на фотодиода, изходният му електрически сигнал е напрежение или ток. От метрологична гледна точка, за фотометрични измервания най-подходящ режим на работа на фотодиода е фотогальваничния, с нулево товарно съпротивление. Тогава изходният сигнал на прибора е ток –  $I_p$ .

Математическият израз, описващ предавателната функция на фотодиод, практически лесно се получава на база данните, характеризиращи прибора, които се са публикувани от неговия производител:

$$I_p = S_{(\lambda)} \cdot P_r \quad (2.28)$$

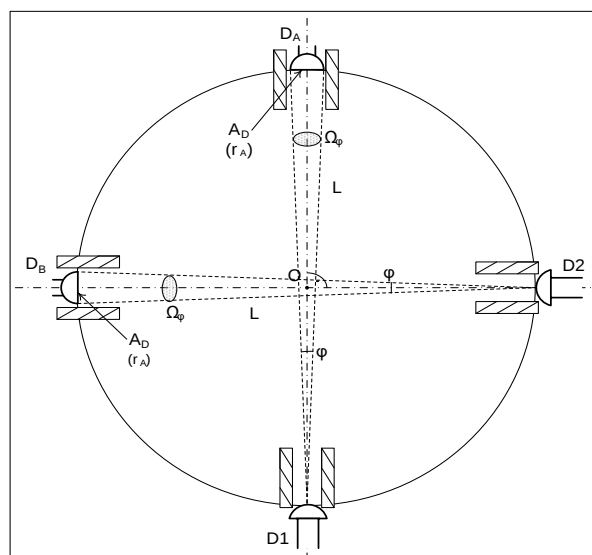
Фототокът  $I_p$  съответства на тока  $I_t$ , в случая на измерване на интензитета на преминала светлина или на тока  $I_s$ , при оценка на разсеяна светлина. В израз (2.28) фоточувствителността  $S_\lambda$  се определя за конкретния прибор от графики, дадени в техническата му документация, при зададена дължина на светлината вълната  $\lambda$ .

### 2.3.3 Аналитично описание на процесите преминаване и разсейване на светлина в течни разтвори, при измерване с четирилъчев сензор.

Функцията на предаване на оптически оценяваната среда, при измерване с четирилъчев сензор, изразява зависимостта на оптичната мощност  $Pr$  на излизащия от средата и осветяващ фотодиода светлинен поток, от средния интензитет на излъчване  $I_{av}$ . Съществени фактори, влияещи на функцията на предаване на средата са: геометричните параметри на сензора и спецификата в оптичните качества на самата среда, при процесите на преминаване или разсейване на светлина. Мътността на анализираната проба –  $M$ , при фиксирани физикохимични свойства на суспендираните частици в разтвора, е право пропорционална на тегловната концентрация на неразтворените частици в измерваната среда.

#### 2.3.3.1 Определяне функцията на предаване на средата, при измерване с четирилъчев сензор на преминалата светлина.

При оценка на процеса на преминаване на светлината през разтвора, излъчва светодиода  $D1$ , а приема фотодиодът  $D_A$  /съответно двойката  $D2 - D_B$ /, Фиг.2.11.



Фиг.2.11 Геометрични параметри на четирилъчев сензор за мътност, определящи процеса на преминаване на светлина през разтвор.

Светодиодът представлява точков източник на светлина. Създаденият от него поток, който облъчва светочувствителната област на фотодиода, се разпространява в пространствения ъгъл  $\Omega_\phi$ . На пространствения ъгъл  $\Omega_\phi$  съответства планарният ъгъл  $\phi$ , който се определя от радиуса на фотодиода  $r_A$  и разстоянието  $L$ . Преминавайки през измервания разтвор, средният интензитет на излъчване  $I_{av}$  променя единствено големината си – абсорбира се. Изходящият от разтвора светлинен поток има интензитет  $I_t$ , който също се изразява с неговата средна стойност. Посоката на разпространение на интензитета  $I_t$  на преминалата светлина е точно същата, по дефиниция, като на облъчващия интензитет – разпространява се и в същия пространствен ъгъл  $\Omega_\phi$ . Изведен е изразът, определящ мощността на светлинния поток  $Pr_t$ , осветяващ фотодиода, при процес на преминаване на светлина през разтвор, изразен чрез основните геометрични параметри на четирилъчевия сензор за мътност:

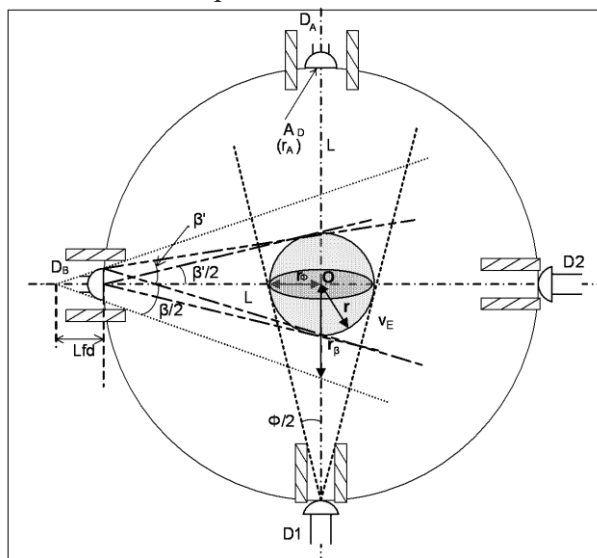
$$Pr_t = 2\pi \cdot (1 - \cos(\arctg \frac{r_A}{L})) \cdot I_t \quad (2.43)$$

Теоретичната зависимост, описваща връзката между изходящия от разтвора интензитет  $I_t$  и интензитета на излъчване  $I_{av}$ , при процеса на преминаване на светлина през разтвор, се основава на закона на Бугер-Ламберт-Беер. Изразът е затихваща експоненциална функция с коефициент на експонентата зависещ от:  $\alpha$  - коефициент на екстинкция – определен от измерваната среда, разстоянието  $L$ , изминато от светлинния поток и мътноста  $M$ . Сравнението между графиките на експериментално получената зависимост за интензитета на светлината, преминала през пробата показва, че изцяло съответства с теоретично предсказаната зависимост. Изходящият от разтвора интензитет  $I_t$  се определя по:

$$I_t = I_0 \cdot e^{-\alpha_t \cdot L \cdot M} \quad (1.5)$$

### 2.3.3.2 Определяне функцията на предаване на средата, при измерване с четирилъчев сензор на разсеяната светлина.

Процесът на разсейване на светлината в разтвора се извършва, когато излъчва светодиодът  $D_1$  и облъчва пробата под апретурен ъгъл  $\Phi$ , а фотодиодът  $D_2$  се осветява под ъгъл  $\beta$ . Аналогично взаимодейства двойката  $D_2 - D_A$ . Действителните размери на планарните ъгли  $\Phi$  и  $\beta$  се определят от диаметъра на допълнително поставените пред оптичните прибори бленди. Планарният апретурен ъгъл  $\Phi$  определя съответен на него пространствен ъгъл на облъчване. Планарният ъгъл  $\beta$  определя съответния му пространствен ъгъл на осветяване - Фиг. 2.15. Общото пространствено сечение на двата обемни ъгъла с взаимно перпендикулярни оси формират обем  $V$ , където се извършва явлението разсейване на светлина в разтвор. Обемът  $V$  представлява затворено пространство, формирано от пресичането на два различни конуса. Големината на обема  $V$  има качествена, а не количествена роля при измерване на мътност. Точното определяне на обема, като сечение на два различни конуса е трудна и незадължителна задача, затова се приема, че обемът  $V$  се представя от еквивалентен обем - проста геометрична форма - кълбо с наименование  $V_E$ . Кълбото  $V_E$  е с център точка  $O$  и радиус  $r$ . Обемът на кълбото  $V_E$  е част от обема  $V$ , но е пропорционален на неговата големина - определя се от същите геометрични параметри. Актуалният радиус  $r$  на кълбото  $V_E$  е в зависимост от това, кой от двата радиуса  $r_\Phi$  или  $r_\beta$  е по-малък и е равен на по-малкия от двата.



Фиг.2.15 Позициониране и размери на кълбото  $V_E$ , в чийто обем се извършва явлението разсейване на светлина в разтвор.

При типична конструкция на четирилъчев сензор, отговаряща на стандарта ISO7027, планарният апретурен ъгъл на облъчване  $\Phi$  е значително по-малък от планарния ъгъл на осветяване  $\beta$ , съответно радиусът  $r_\Phi$  е по-малък от радиуса  $r_\beta$  и той дефинира  $V_E$ . Кълбото

$V_E$ , в което се извършва процесът на разсейване на светлина, определя нов резултативен ъгъл на осветяване на фотодиода –  $\beta' = \Phi$ . Представителна точка за процеса на разсейване на светлината от целия обем  $V_E$  е геометричният център на сензора - точката О.

Светлинният поток с мощност  $Pr_s$  осветява цялата светлочувствителна площ на светодиода, която се представя като кръг с радиус  $r_A$  и площ равна на  $\pi \cdot r_A^2$ . Изразът, определящ зависимостта на мощността на светлинния поток  $Pr_s$ , при процеса на разсейване на светлина в разтвор от интензитета  $I_s$  на разсеяната светлина; мътноста на разтвора  $M$  и основите геометрични параметри на четирилъчев сензор за мътност, е:

$$Pr_s = 2\pi^2 \cdot r_A^2 \cdot (1 - \cos \frac{\Phi}{2}) \cdot I_s \quad (2.69)$$

Стандартният теоретичен модел, описващ явлението разсейване на светлина в разтвор, се основава на закона на Релей, при който всяка частица от обема на взаимодействие, участва само еднократно в процеса на разсейване. Вследствие, интензитетът на разсеяната от водната проба светлина е винаги право пропорционален на мътноста в разтвора. Тази стандартна теоретична трактовка влиза в противоречие с предишен практически опит. Експерименталните резултати, получени при оценка на мътноста на разтвор от глина показват, че строго линейна връзка между интензитета на разсеяна светлина и мътноста, съществува само в разредени разтвори. При измерване в широк диапазон на мътноста на разтвора от глина, зависимостта е силно не линейна, с изразен максимум при определена стойност на мътноста  $M_{max}$ .

За да се измерва коректно мътноста на разтвор в широк диапазон на изменение, се предлага **Подобрен теоретичен модел**, даващ математическо описание на процеса на разсейване на светлина. Според предложения Подобрен теоретичен модел, всяка частица от разтвора участва в две еднократни взаимодействия. Първото взаимодействие е разсейването на облъчващата светлина от частицата, а другото, последващото е абсорбцията на интензитета на вече разсеяния светлинен поток. Процесът на разсейване на светлина се извършва само от частиците, намиращи се в дефинирания обем  $V$  от целия разтвор, представен от кълбото  $V_E$ . Последващата абсорбция на вече разсеяния светлинен поток се извършва по целия оставащ път до достигане на фотоприемника. Подобреният теоретичен модел, описващ разсейването на светлина чрез двойно взаимодействие, се изразява аналитично с израз, съдържащ два множителя. Първият множител показва пропорционалността на интензитета на разсеяния светлинен поток от мътноста на измерваната проба. Вторият множител изразява експоненциалното намаляване на изходящия интензитет от мътноста на пробата. Аналитичният израз, описващ зависимостта на изходящия светлинен интензитет  $I_s$  от мътноста  $M$  на пробата при измерване с четирилъчев сензор на разсеяна светлина е:

$$I_s = k_s \cdot \frac{V_E}{L^4} \cdot e^{-\alpha_s \frac{L}{2} \cdot M} \cdot I_{av}(\Omega_\Phi) \cdot M \quad (2.84)$$

където:  $k_s$  е безразмерна константа, характеризираща средата при процеса на разсейване.

#### 2.3.4.1 Предавателна функция на четирилъчев сензор и средата, при процеса на преминаване на светлина през разтвор

Функцията на предаване на четирилъчев сензор за мътност, при оценка на процеса на преминаване на светлина, се получава чрез последователно заместване на: израза (2.21) за средния интензитет  $I_{av}(\Omega_\Phi)$  на облъчващия светлинен поток /в случая на ъгъл  $\theta$  отговаря  $\Phi$ / в израз (1.5) /в случая  $I_0 = I_{av}(\Omega_\Phi)$ /; полученият резултат за  $I_t$  в (2.43) и стойността на оптична мощност  $Pr_t$  в израз (2.28). След обработка се получава:

$$I_T = S_{(\lambda)} \cdot e^{-\alpha \cdot L \cdot M} \cdot (a_1 I_F + b_1) \cdot (a_3 t^0 + b_3) \cdot [1 - 2a_2 \cdot (\arctg \frac{r_A}{L}) \cdot \cos(2\arctg \frac{r_A}{L}) + a_2 \cdot \sin(2\arctg \frac{r_A}{L}) - b_2 \cdot \cos(2\arctg \frac{r_A}{L})] \quad (2.51)$$

Изразът описва подробно връзката, между големината на тока  $I_T$ , генериран от фотодиод и мътноста на оценявания разтвор  $M$ , в зависимост от параметрите на четирилъчевия сензор. Стойностите на параметрите:  $S_{(\lambda)}$ ; константите  $a_1, b_1, a_2, b_2, a_3, b_3$ ;  $r_A$  и  $L$  са известни или предварително детерминирани за конкретен сензор за мътност. За да се определи еднозначно връзката между генерирания ток  $I_T$  от фотодиода и мътноста на разтвора  $M$ , е необходимо да е известна стойността и на коефициента  $\alpha$ . Не съществува похват за теоретично предсказване на стойността на коефициента на екстинкция  $\alpha$  за даден разтвор, при зададен сензор. Единственият начин за определяне на коефициента на екстинкция  $\alpha$  е извършване на практическо измерване посредством конкретния четирилъчев сензор на тока  $I_T$ , съответстващ на интензитета на преминалата през разтвора светлина, за поне една известна стойност  $M$  на мътноста на пробата. Зададената стойност  $M$  на мътноста трябва да е в средата на диапазона на измерване на мътност, за конкретния сензор. Известната стойност на мътноста  $M$  и съответният ѝ резултат за тока  $I_T$  се заместват в пренаредения израз (2.51) и на тази основа се изчислява стойността на  $\alpha$ . След заместване на получената стойност на коефициента  $\alpha$  в израз (2.51) се получава функцията на предаване на конкретния сензор, при оценка на преминалата светлина.

#### 2.3.4.2 Предавателна функция на четирилъчев сензор и средата, при процеса на разсейване на светлина в разтвор

Функцията на предаване на четирилъчев сензор за мътност, при оценка на процеса на преминаване на светлина се получава чрез последователно заместване на: израза (2.21) за средния интензитет  $I_{av}(\Omega_\Phi)$  на облъчващия светлинен поток /в случая на ъгъл  $\theta$  отговаря ъгъла  $\Phi$ / в израз (2.84); полученият резултат на  $I_s$  в (2.69) /еквивалентният обем  $V_E$  се представя с определящите го геометрични параметри/ и стойността на оптична мощност  $Pr_s$  в израз (2.28). След обработка се получава:

$$I_s = \frac{\pi^2}{6L} \cdot k_s \cdot r_A^2 \cdot S_{(\lambda)} \cdot [\tg(\frac{\Phi}{2})]^3 \cdot e^{-\alpha_s \frac{L}{2} \cdot M} \cdot (a_1 I_F + b_1) \cdot (a_3 t^0 + b_3) \cdot (1 - a_2 \cdot \Phi \cdot \cos \Phi + a_2 \cdot \sin \Phi - b_2 \cdot \cos \Phi) \cdot M \quad (2.86)$$

Аналогично на ситуацията за израз (2.51) константите, описващи конструкцията на конкретния четирилъчев сензор са известни. Стойността на коефициента на екстинкция  $\alpha$  се определя на база израз (2.51), при експериментална оценка на преминалата през пробата светлина. Подобен е и проблемът за определяне на големината на коефициента на пропорционалност  $k_s$ . Неговата стойност не може да се предскаже по теоретичен път. За определяне на  $k_s$ , е необходимо поне едно практическо измерване с конкретния четирилъчев сензор, за намиране на стойността на тока  $I_s$ , съответстващ на интензитета на разсеяната светлина, при предварително известна стойност  $M$  на мътноста на оценявания разтвор. Стойността на  $k_s$  се изчисляване на база преработения израз (2.86), след заместване със зададената мътност  $M$  и получения ток  $I_s$ . Направена е оценка за степента на достоверност на получената предавателна функция от стойността  $M$  на мътноста, при която практически се определя коефициента на пропорционалност  $k_s$ . Най-малки стойности на RMSE за теоретично предсказващата предавателна функция, спрямо експериментално получените резултати се получава, когато  $k_s$  се дефинира при стойност  $M$  на мътноста, съответстваща на средата на диапазона за конкретния четирилъчев сензор, между нула и  $M_{max}$  – стойността на мътноста, при която зависимостта на интензитета на разсеяната светлина има максимум.

Еднозначно определените изрази (2.51) и (2.86) за функциите на предаване на четирилъчев сензор са основа за оценка на други различни и неизвестни стойности на

мътността за подобен по вид разтвор, при различни геометрични параметри на четирилъчевия сензор, различни фотодиоди или различни инфрачервени светодиоди, но със същия спектър на излъчване.

### **2.3.5 Методика за определяне на предавателните функции на конкретен четирилъчев сензор, при оценка процесите на преминаване и разсейване на светлина в определен разтвор.**

За практическо аналитично описание на процесите на преминаване и разсейване на светлина в определен разтвор е разработена „Методика за определяне на предавателните функции на четирилъчев сензор”. Методиката се основава на Подобрения теоретичен модел, описващ процеса на разсейване на светлина в разтвор. Тя е валидна за създаване на Аналитично описание на четирилъчев сензор за мътност със симетрична 90°-ва конструкция и инфрачервени светодиоди, като източници на светлина. Методиката може да се използва за оценка за вече съществуващи сензори и като база при проектиране на нови четирилъчеви сензори за мътност. Методиката е илюстрирана с пример за практическо определяне на функциите на предаване на конкретен четирилъчев сензор.

### **2.3.6 Проверка на достоверността на предложени Математически модел на четирилъчев сензор за мътност.**

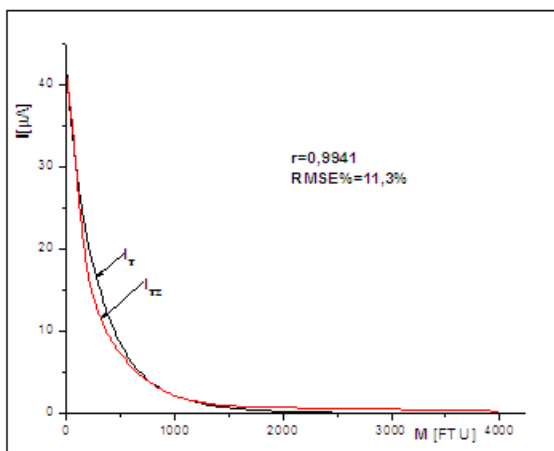
За проверка на верността на определените функции на предаване, се извършва оценка на съответствието между теоретично предсказаните от тях данни и експериментално получените резултати, дефинирани при едни и същи определящи ги условия. За тази цел е изработен Експериментален четирилъчев сензор с променлива геометрия, с който са направени общо 3960 измервания. За светоищници се използват два светодиода тип L-53SF7C, а фотодиодите са два - S1337-1010BR. Избрани са три стойности на тока  $I_F$  през светодиодите: 30mA, 20mA и 10mA. Разстоянието L се задава на три нива: 95mm, 75mm и 55mm, като се запазва симетричната геометрия на сензора. Ъгълът  $\Phi$  се променя на 25°, 20°, 15° и 10° чрез поставяне на различни бленди на светодиодите. За сертифицирания сравнителен материал се използват еталонни формазинови разтвори с намаляваща стойност на мътността. Изходният формазинов разтвор от 4000FTU е приготвен в съответствие със стандарта ISO7027.

Сравнение между теоретично предсказаните и експериментално получените резултати се прави за няколко различни зависимости, определящи генерираните фототокове от: мътността; тока през светодиодите; геометричните параметри на сензора. С цел намаляване на флуктуацията на експерименталните данни, всяка стойност на измерените фототокове  $I_{TS}$  или  $I_{SZ}$  е средно аритметично от шест отделни измервания. На Фиг.2.18 и Фиг.2.21 са показни графиките на теоретично предсказаните и експериментално получените зависимости за фототока, съответстващи на интензитета на преминалата и разсеяната светлина, от мътността. Практическите резултати са получени при „средни” параметри, описващи сензора. -  $I_F=20mA$ ,  $L=75mm$  и  $\Phi=20^\circ$ . Завишаването на стойностите за експерименталните резултати, при ниски нива на измерения сигнал, се дължи на влиянието на паразитното допълнително отражение от стените на експерименталния съд.

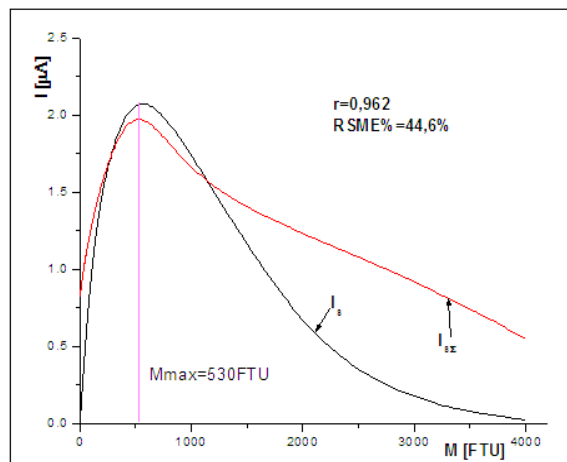
В Таблица 2.15 са обобщени оценките от съответствието между теоретично предсказаните данни, получени чрез използване на „Методиката за определяне на предавателните функции на конкретен четирилъчев сензор за мътност, при оценка процесите на преминаване и разсейване на светлина в определен разтвор” и получените резултати от измерванията с Експерименталния четирилъчев сензор / Приложение 3/.

Стойността на корелационния коефициент  $r$  – близка до единица и приемливите за практически оразмерявания големина на относителната RSME% за всички извършени сравнения – Табл. 2.15, определя висока степен на съответствие между теоретично предсказаните данни и експериментално получените резултати. Високата степен на

съответствие е доказателство за достоверността на предложения Подобрен теоретичен модел, описващ процеса на разсейване на светлина в разтвор и коректността на Аналитичното описание на четирилъчев сензор.



Фиг.2.18



Фиг.2.21

Графики на теоретично предсказаните и експериментално получените зависимости за фототока, съответстващи на интензитета на: преминалата светлина - Фиг.2.18; разсеяната светлина –Фиг.2.21, от мътноста.

Таблица 2.15 Обобщение на съответствията между теоретично предсказаните данни и експериментално получените резултати.

| No | Съответствие между зависимостите на                            | Коефициент на корелация $r$ | RSME% | Изобразено на |
|----|----------------------------------------------------------------|-----------------------------|-------|---------------|
| 1  | токовете $I_T$ и $I_{T\Sigma}$ от мътноста $M$                 | 0,9941                      | 11,3% | Фиг.2.18      |
| 2  | токовете $I_T$ и $I_{T\Sigma}$ от тока през светодиодите $I_F$ | 0,997                       | 8,15% | Фиг.2.19      |
| 3  | токовете $I_T$ и $I_{T\Sigma}$ от разстоянието $L$             | 0,989                       | 9,4%  | Фиг.2.20      |
| 4  | токовете $I_S$ и $I_{S\Sigma}$ от мътноста $M$                 | 0,962                       | 44,6% | Фиг.2.21      |
| 5  | токовете $I_S$ и $I_{S\Sigma}$ от тока през светодиодите $I_F$ | 0,999                       | 24,8% | Фиг.2.22      |
| 6  | токовете $I_S$ и $I_{S\Sigma}$ от разстоянието $L$             | 0,934                       | 4,34% | Фиг.2.23      |
| 7  | токовете $I_S$ и $I_{S\Sigma}$ от ъгъла на облъчване $\Phi$    | 0,9848                      | 28,6% | Фиг.2.24      |

## 2.4 Аналитично определяне на функцията на предаване на четирилъчев мътномер.

Блоковете Четирилъчев сензор с измервана среда и Обработващ блок от структурата на четирилъчевия мътномер - Фиг. 2.1, извършват съществена, специфична трансформация на информативните величини и определят общата предавателна функция на уреда. За конкретното разглеждане на проблематиката, в настоящия Труд се приема, че Обработващият блок прилага типичния алгоритъм на математическа обработка, използван в аналогов мътномер: първа стъпка - формиране на отношението  $R$  и втора стъпка - логаритмуване и отместване, за да се изчисли изходната величина  $T$ .

### 2.4.1 Определяне на отношението $R$ .

Формирането на величината  $R$  изразява основната същност на уредите мътномери, работещи по метода на отношението – създава се отношение на сигналите, съответстващи на интензитетите на разсеяната към интензитетите, определени от преминалата светлина. Така, поне теоретически, се премахва влиянието на: стареенето и промяната на силата на излъчване на светоизлъчвателите; чувствителността на фотоприемниците; замърсяването на оптиката на сензора. Изведен е изразът, определящ отношението  $R$  за симетрична конструкция на сензора:

$$R = \frac{I_{2A} \cdot I_{1B}}{I_{1A} \cdot I_{2B}} = \frac{I_S^2}{I_T^2} = \frac{2,7 \cdot k_s^2 \cdot r_A^4 \cdot \text{tg}\left(\frac{\Phi}{2}\right)^6}{L^2} \cdot e^{\alpha \cdot L \cdot M} \cdot M^2 \cdot \frac{(1 - a_2 \cdot \Phi \cdot \cos \Phi + a_2 \cdot \sin \Phi - b_2 \cdot \cos \Phi)^2}{[1 - 2 \cdot a_2 \cdot \arctg \frac{r_A}{L} \cdot \cos(2 \cdot \arctg \frac{r_A}{L}) + a_2 \cdot \sin(2 \arctg \frac{r_A}{L}) - b_2 \cdot \cos(2 \cdot \arctg \frac{r_A}{L})]^2} \quad (2.104)$$

### 2.4.2 Определяне на изходната величина $T$ .

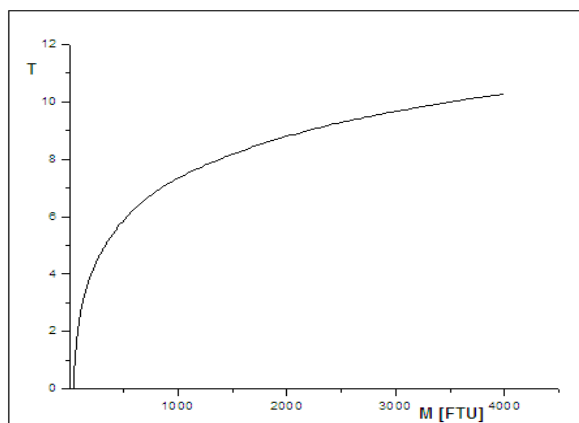
Изходната величина  $T$ , при типичен мътномер, се получава чрез логаритмуване на отношението  $R$  и последващо адитивно отместване /изваждане на константа/. Използвайки този алгоритъм за математическа обработка, изходната величина се изменя в диапазон от нула до практически обозрими стойности, като за малки и средни стойности на мътността се очаква линейна промяна на  $T$ . За типична симетрична конструкция на четирилъчевия сензор, предавателната функция на уреда мътномер, изразяваща неговия Математически модел е:

$$T = 1 + 2 \ln \left[ \frac{1 - a_2 \cdot \Phi \cdot \cos \Phi + a_2 \cdot \sin \Phi - b_2 \cdot \cos \Phi}{1 - 2 \cdot a_2 \cdot \arctg \frac{r_A}{L} \cdot \cos(2 \cdot \arctg \frac{r_A}{L}) + a_2 \cdot \sin(2 \arctg \frac{r_A}{L}) - b_2 \cdot \cos(2 \cdot \arctg \frac{r_A}{L})} \right] + k_s \cdot \frac{r_A}{L} \cdot \text{tg}\left(\frac{\Phi}{2}\right)^3 - \ln R_{(M_{\min})} + \alpha \cdot L \cdot M + 2 \cdot \ln M = \alpha \cdot L \cdot M + 2 \cdot \ln M - \alpha \cdot L \cdot M_{(\min)} - 2 \cdot \ln M_{(\min)} = \alpha \cdot L (M - M_{(\min)}) + 2 \cdot (\ln M - \ln M_{(\min)}) \quad (2.106)$$

На Фиг.2.25 е илюстрирана теоретично предсказаната зависимост на величината  $T$  от мътността на пробата, определена на база Математическия модел на мътномера, представен чрез функцията на предаване - израз (2.106). Параметри  $\alpha$  и  $L$  са съответстващи на Експерименталния четирилъчев сензор. Изходната величина  $T$  е в безразмерни единици. Стойността на мътността  $M_{(\min)}$  определя началото на обхвата на измерване на уреда.

Изведеният израз (2.106), описващ предавателната функция на типичния четирилъчев мътномер, е сравнително прост и съдържа малко на брой влияещи параметри. Изразът не зависи от тока през излъчващите светодиоди  $I_F$ ; чувствителността на фотодиодите  $S$ ;

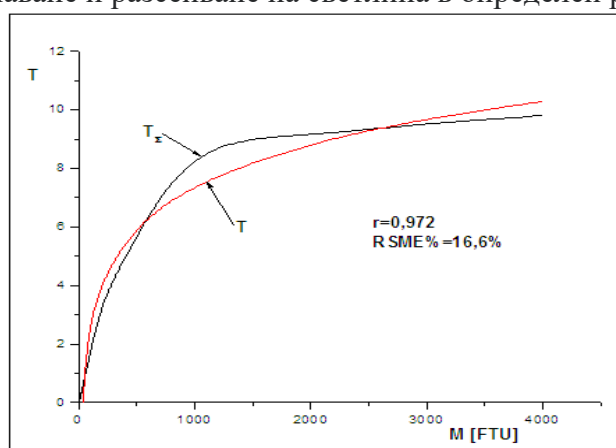
коефициента на пропорционалност  $k_s$ . Този факт изцяло съответства на очакваното, при прилагане на Метода на отношенията за формиране сигналите в мътномера.



Фиг.2.25 Графика на теоретично предсказаната зависимост на величината  $T$  от мътноста на пробата.

#### 2.4.3 Оценка на съответствието между теоретично предсказани и експериментално получени данни за изходната величина $T$ .

Извършено е сравнение между получените по експериментален път резултати за изходната величината  $T_\Sigma$  и данните, теоретично предсказани чрез Математическия модел и функцията му на предаване, определена с израз (2.106) – величината  $T$ , дефинирана при аналогични условия. На Фиг. 2.26 са показани графиките на теоретично предсказаните  $T$  и експериментално получените резултати  $T_\Sigma$  за изходната величината, както и количествените данни от съпоставката им. За двете графики са избрани подходящи стойности за  $M_{min}$  с оглед минимална разлика по между им. Анализът на количествената оценка на съответствието установява висока степен на корелационна зависимост  $r=0,972$  и приемлива за такъв тип сравнения  $RSME\%=16,6\%$ . Това е и поредното доказателство за коректността на Математическия модел и предложената „Методика за определяне на предавателните функции на конкретен четирилъчев сензор за мътност, при оценка процесите на преминаване и разсейване на светлина в определен разтвор”.



Фиг.2.26 Графики на теоретично предсказаните и експериментално получените зависимости за величините  $T$  и  $T_\Sigma$ . Големината на величините е в безразмерни стойности.

#### 2.4.4 Примери за приложение на Математическия модел на мътномер и Аналитично описание на четирилъчев сензор.

Представени са три примера, показващи практическата приложимост на Математическия модел на мътномер, използващ Аналитичното описание на четирилъчев

сензор за определяне влиянието на: шума, спрямо средно квадратичната грешка при измерване с четирилъчев мътномер; околната температура и мътността, спрямо отношението сигнал/шум /SNR/ на сигнала от четирилъчев сензор; околната температура и мътността, спрямо относителната грешка от постояннотоково отместване  $\delta_0$ .

## Основни резултати в Глава 2

1. На база анализа от 524 измервания /Приложение 2/ на мътността на разтвор от глина в свръх широк диапазон на изменение, е предложен **Подобрен теоретичен модел** на явлението разсейване на светлина, при който всяка частица от оценявания обем на разтвора, участва в процес на еднократно разсейване и еднократна абсорбция на облъчващия светлинен поток.

2. Създадени са нови средства за анализ - **Аналитично описание на четирилъчев сензор** /основани на *Подобрения теоретичен модел*/ и **Математически модел** на типичен четирилъчев мътномер, изразени със съответните функции на предаване.

3. Представена е **Методика за определяне на предавателните функции на конкретен четирилъчев сензор и среда**, съобразно неговото Аналитично описание, включваща и **Методика за определяне на предавателната функция на светодиода** на база техническите параметри на прибора. Валидността и приложимостта за практически инженерни пресмятания на представените Методики са потвърдени чрез подходящи приложни **Примери**.

4. **Изработен е Експериментален четирилъчев сензор** за мътност, с променяща се геометрия и ток през светодиодите, с който са направени общо 3960 измервания. Резултатите от измерванията са използвани за съпоставка с теоретично предсказаните данни от математическите модели

5. Извършена е съпоставка между експерименталните резултати и теоретично предсказаните данни, основаваща се на корелационна оценка и определяне на стойности на относителната средно квадратична грешка /RMSE%/. Получените стойности на корелационни коефициенти, клонящи към единица и приемливо малката големина на RMSE% / Табл.2.15 /, доказват достоверността и коректността на Аналитичното описание на сензор и Математическия модел на четирилъчев мътномер.

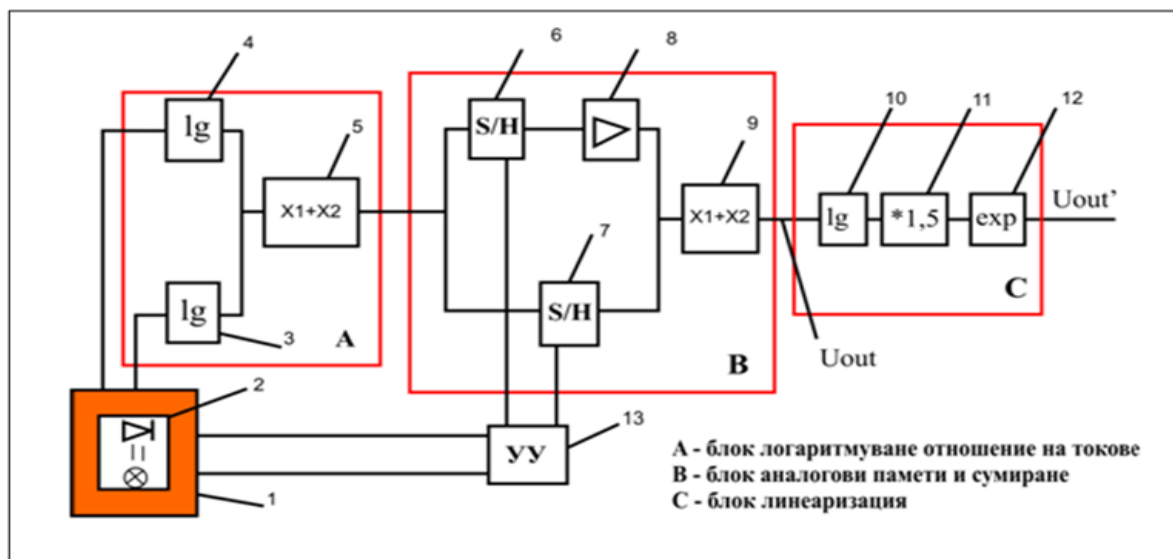
## ГЛАВА 3. Линеаризация на показанията на четирилъчев мътномер.

Грешката от нелинейност е съществен параметър, определящ метрологичните характеристики на четирилъчевия мътномер. При линеаризация на сигнала в четирилъчевия мътномер, е необходимо да се определели такава функцията  $f(R)$ , формираща изходна величина  $F$ , която да е строго право пропорционална на измерваната мътност.

### 3.1 Линеаризация на сигнала при аналогов четирилъчев мътномер.

С цел да се увеличи точността на измерване на мътността в по-широк диапазон, без усложняване на сензора, е предложен способ за допълнителна линеаризация на сигнала, изразяващ се в повдигане на определена степен стойността на величината  $T$ . За практическа реализация на способа, е изработен линеаризиращ електронен блок  $C$ , допълващ преобразуванията в типичен мътномер и е синтезиран уред със следната структурна схема - Фиг.3.2. Линеаризиращият блок  $C$  е реализиран по аналогов способ чрез използване на логаритмуващ, мащабиращ и антилогаритмуващ електронни преобразуватели. Последователното изпълнение на математическите операции логаритмуване, умножение с константа  $p$  и антилогаритмуване е еквивалентно на повдигане в степен  $p$ . Посредством промяна на коефициента на предаване на усилвателя 11 се постига изменение на константата  $p$  и линеаризация на предавателната характеристика на произволен четирилъчев сензор. Антилогаритматорът 12 извършва и

усилване на сигнала с коефициент  $k_{amp2}$ , за да се реализира зададеният мащаб на изменение на изходната величина.



Фиг.3.2 Структурна схема на аналогов четирилъчев мътномер с допълнителна линеаризация на сигнала.

Изходната величина на мътномера  $U_{out'}$ , представляваща сигнала след линеаризация се означава с  $F$  и се определя с израза:

$$F = k_{amp2} \cdot T^p - T_{M(min)} \quad (3.2)$$

Прилагайки предложения способ за линеаризация спрямо данните от Експерименталния четирилъчев сензор в диапазона до 1000FTU, се получава значително намаляване на приведената относителна грешка от нелинейност - от 13,4% за величината  $T$ , до 2,2% за величината  $F$ .

Определен е диапазон на мътността, в който предложият способ за линеаризация чрез повдигане в определена степен на сигнала, е ефективен. Този диапазон се дефинира от критична стойност на мътността, при която графиката на изходната величина  $T$  рязко променя хода. Горната му граница е около два пъти по-голяма от  $M_{max}$  – стойността на мътността, при която зависимостта на интензитета за разсеяната светлина има максимум - Фиг.2.21.

### 3.2 Линеаризация на сигнала при смесена аналогова и цифрова обработка на сигнала в четирилъчев мътномер.

Предложен е способ за линеаризация по цифров път, използващ методите на най-малките квадрати. Според способа, обработката на сигнала се извършва от микропроцесорен контролер, изпълняващ функциите на Управляващ блок. Определен е изразът (3.5) на апроксимация полином от трета степен.

$$F = -0,00286 \cdot T^3 + 0,12603 \cdot T^2 - 0,01615 \cdot T + 0,02104 \quad (3.5)$$

### Основни резултати в Глава 3

1. Оценена е възможността за линеаризация на изходната величина  $T$  на типичен аналогов мътномер, с цел разширяване на измервателния диапазон и намаляване на грешката от нелинейност.

Предложен е способ за допълнителна линеаризация на сигнала, изразяващ се в повдигане на определена степен  $p$  /  $p \in (1,2-1,8)$  / стойността на изходната величината  $T$ . Разработен е аналогов модул, реализиращ математическата операция повдигане на степен.

2. Предложен е способ за линеаризация по цифров път, използващ методите на най-малките квадрати за определяне на апроксимиращ полином.

#### **ГЛАВА 4. Оценка на влиянието на замърсяването на оптичната система в сензора на четирилъчев мътномер.**

Степента на влиянието от замърсяване, спрямо метрологичните характеристики на мътномера, не може да се предскаже по теоретичен път. Може само да се оцени експериментално и да се направят прогнози за неговото развитие във времето. Влиянието на замърсяването, спрямо функционирането на уреда мътномер, е аналогично на намаляването на интензитета на излъчване на светоищточниците или снижаване на спектралната фоточувствителност на фотоприемниците. Повредата на някои от оптоприборите в четирилъчевия сензор или прекомерното замърсяване, оказват еквивалентно проявление спрямо резултатите от измерването на мътност. Предложен е способ за практическо и теоретично симулиране на ефекта от замърсяване, чрез оценката на изменението на генерираните фототокове и изходната величина на уреда, спрямо промяната на интензитета на излъчване на светоищточниците.

Замърсяването предизвиква грешка на изходния резултат на уреда по два пътя: единият е предизвикването на пряка систематична грешка на измерването с мътномера, а другият е индиректно влияние, посредством намаляване на параметъра SNR на сигналите от фотодиодите и в резултат увеличаване неопределеността на измерването.

##### **4.1 Оценка влиянието на замърсяването спрямо грешката на измерването с четирилъчев мътномер.**

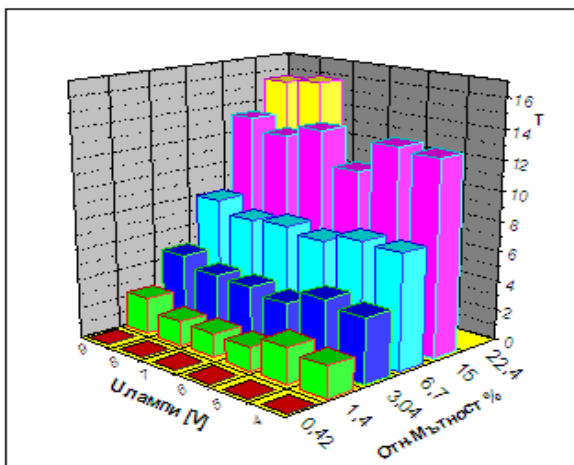
Многолъчевите конструкции на мътномери, използващи метода на отношенията и в частност четирилъчевите, притежават намалена чувствителност на изходния им сигнал от замърсяването и промяна параметрите на оптоприборите. За да се определи количествено степента на намаляването, се предлага да се въведе нова величина - **коэффициент на потискане на замърсяването - CRC** /contamination rejection coefficient/. Физическият смисъл на величината CRC е да покаже, колко пъти намалява влиянието на замърсяването при многолъчева конструкция и използване на подходящи обработващи алгоритми, спрямо простото нефелометрично или турбидиметрично измерване. Големината на величината CRC зависи от симетричността на четирилъчевия сензор, линейността на преобразуване на фотодиодите и линейността на използваните електронни преобразуватели в мътномера. Коэффициентът на потискане на замърсяването е обективен критерий за оценка и сравнение на метрологичните характеристики на многолъчев уред. Колкото е стойността на коэффициента CRC, с толкова се намалява грешката на измерване и с толкова се подобряват метрологичните характеристики на уреда. Величината CRC се определя чрез симулация на замърсяването, посредством промяна интензитета на светоищточниците, с израз:

$$CRC = \frac{A_x}{A_y} \quad (4.1)$$

където:  $A_x$  - относително изменение в проценти на токовете, генерирани от фотодиодите в сензора на уреда. Измерените фототокове могат да бъдат:  $I_{T\Sigma}$  или  $I_{S\Sigma}$ , съответстващи съответно на интензитетите на преминалата или разсеяната от пробата светлина.

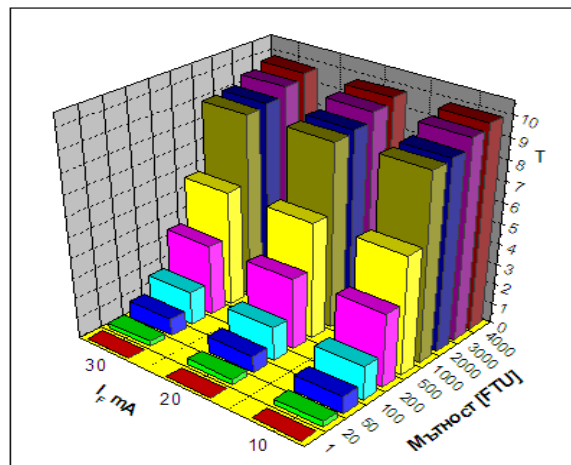
$A_y$  – относително изменение на изходната величина на мътномера в проценти. Изходната величина, в зависимост от алгоритъма на обработка, може да е  $T$  (2.106) или  $F$  (3.2).

В Глава 4 са представени резултатите от експерименталните симулации на влиянието на замърсяването за два четирилъчеви сензора - ФКАУ-10/ДУ и Експерименталния четирилъчев сензор.



Фиг.4.1

Зависимост на изходната величина  $T$  от мътността, при промяна на интензитета на излъчване, реализирана чрез изменение на  $U_{\text{л}}$  или  $I_{\text{ф}}$ .



Фиг.4.3

При експериментите, четирилъчевият сензор ФКАУ-10/ДУ оценява разтвори от глина. Относителната мътност на тези разтвори се изменя в широк диапазон. В сензора се използват като светоищници лампи с нажежаеми жички. Промяната на интензитета на излъчване се постига с регулиране на напрежението за захранването на лампите от 4V до 9V. Графиката на изменение на изходната величината  $T$  от промяната на относителната мътност на пробата и напрежението на захранване на лампите, е показано на Фиг.4.1. Стойността на коефициента CRC, определен спрямо фототока  $I_{\Sigma}$  при процеса на разсейване на светлина, за относителна мътност 1,4% е 72, а за мътност 15% е 403.

Експерименталният сензор с променливи геометрични размери, използващ като светоищници инфрачервени светодиоди, оценява сертифициран сравнителен материал - формазини разтвори с различна абсолютна мътност. Промяната на интензитета на излъчване се постига с регулиране на тока през светодиодите, от 10mA до 30mA. Резултатите от измерванията на Експерименталния сензор, получени при „средна по размер“ конструкция с геометрични параметри  $L=75\text{mm}$ ,  $\Phi=20^\circ$ , е показан на Фиг.4.3. Стойността на коефициента CRC, определен спрямо фототока  $I_{\Sigma}$  при процеса на разсейване на светлина, за мътност 50FTU е 78,5, а за мътност 3000FTU е 153,8.

Правят се следните оценки за прякото влияние на замърсяването спрямо грешката на измерване:

- Стойността на CRC расте с увеличаване на стойността на измерваната мътност. Следователно, четирилъчевият метод е особено подходящ за измерване на разтвори с висока мътност и склонност да замърсяват оптичните сензори.

- Използването на величината  $T$ , получена на база метода на отношенията за оценка на мътността, е изключително подходящо, правейки четирилъчевите мътномери силно устойчиви на замърсяване на оптиката и деградация на светоищниците или фотоприемниците.

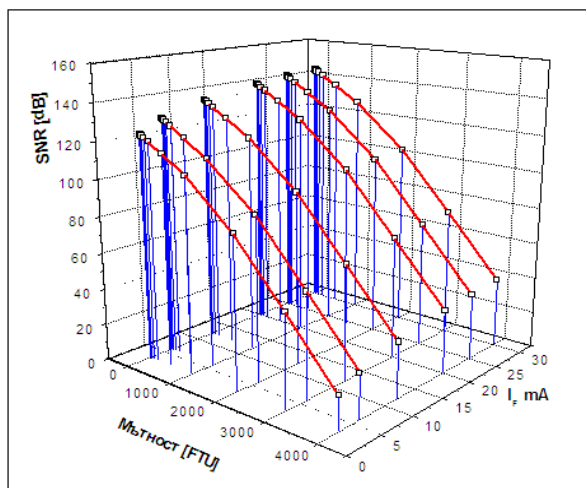
#### 4.2 Оценка влиянието на замърсяването спрямо отношението сигнал/шум на измерените фототокове в четирилъчев мътномер.

Замърсяването на оптичната система на четирилъчевия сензор води до намаляване на отношението сигнал/шум  $/\text{SNR}/$ , което предизвиква увеличаване на грешката от неопределеност на измерването. Теоретична оценка на това влияние при наличие на Аналитично описание на сензора, може да се направи посредством симулация на замърсяването чрез промяна на тока през светоищниците. Пример за тази оценка се

осъществява, използвайки функциите на предаване - (2.51), (2.86), определени от Аналитичното описание на Експерименталния четириръчев сензор за мътност.

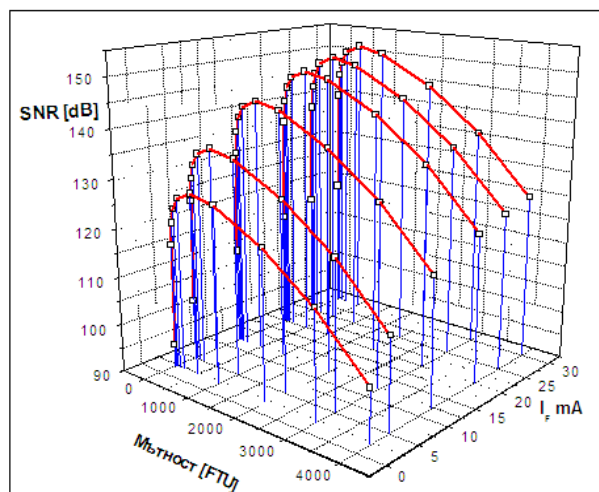
На Фиг.4.5 е илюстрирана общата форма на изменение на отношенията сигнал/шум за тока  $I_T$ , съответстващ на интензитетите на преминалата през пробата светлина, а на Фиг.4.7 за тока  $I_S$ , съответстващ на интензитетите на разсеяната от пробата светлина, при симулации за промяна на мътността до 4000FTU и тока през светодиодиите.

Графо-аналитичната оценка на Фиг.4.5 дава следните заключения: При намаляване на тока през светодиодиите до 2mA, симулиращо нарастване на влиянието на замърсяването от 10 пъти, спрямо номиналното функциониране на не замърсен сензор, диапазонът на измерване със зададено  $SNR_{dB}$ , се намалява от 4000FTU на 3200FTU. Или при измерване на максималната мътност от 4000 FTU, случайната грешка  $\sigma_n\%$  дефинираща неопределеността на измерването на сигнала  $I_T$ , достига 10%. Графо-аналитичната оценка на Фиг.4.7 показва, че за конкретния пример, величината SNR за тока  $I_S$  винаги надвишава 95dB, значително по-голяма е от приетата за минимално необходимата стойност - 40dB;  $\sigma_n\%$  е пренебрежимо малка и влиянието на шума може да се пренебрегне.



Фиг.4.5

Форма на изменението на SNR за токовете  $I_T$  или  $I_S$  от тока през светодиодиите  $I_f$  и мътността.



Фиг.4.7

Намаляването, вследствие замърсяване, на абсолютните стойности за измерените токове  $I_T$  и  $I_S$  под зададеното гранично отношение сигнал /шум, определя граничната степен на допустимо влияние на замърсяването. Използването на метода на отношенията в четириръчевия мътномер не намалява неопределеността на резултата от влиянието на шума. Относителната средноквадратична неопределеност  $\sigma_n\%$  на измерването на сигнала, нараства право пропорционално от степента на замърсяване на сензора.

#### 4.3 Алгоритъм за сигнализация от четириръчевия мътномер, при надвишаване на зададена степен на замърсяване на сензора.

Предложен е не сложен алгоритъм, който се залага в управлението на четириръчев мътномер, реализиран по цифров път. Алгоритъмът оценява достигането на критично ниво на замърсяване и едва тогава уредът генерира сигнал за почистване на сензора. Наличието на сигнал за замърсяване без реално да съществува замърсяване, е признак за дефектирането на някой от светодиодиите или фотодиодите, вградени в сензора. За реализиране на предложени алгоритъм е необходимо, четириръчев мътномер да измерва и обработва не само отношението на токовете  $R$ , но и самите абсолютни стойности на

измерените токове  $I_{T\Sigma}$  и  $I_{S\Sigma}$ , съответстващи на интензитетите на преминалата и разсеяната от пробата светлина.

Използването на предложения алгоритъм би намалило ненужните прекъсвания на контролирания технологичен процес и повишило експлоатационната ефективност на четирилъчевия мътномер.

#### **Основни резултати в Глава 4**

1. За количествено определяне на степента на намаляване грешката на измерване, предизвикана от замърсяването при многолъчева конструкция, спрямо простото нефелометрично или турбидиметрично измерване, се въвежда и определя нова величина - **коэффициент на потискане на замърсяването CRC** /contamination rejection coefficient/.

Извършени са експериментални симулации на влиянието на замърсяването, чрез изменение захранването на светоизточниците с два типа четирилъчеви сензори за мътност. На база симулацията са оценени относителните изменения на измерените фототокове, изходната величина  $T$  и са определени стойностите на CRC.

2. Извършена е теоретична оценка на влиянието на замърсяването, спрямо големината на SNR за приетия сигнал и на относителната средно квадратична неопределеност  $\sigma_n\%$  на измерването, на база Аналитичното описание на Експерименталния четирилъчев сензор за мътност. Определено е как замърсяването ограничава диапазона на измерване с мътномер, при предварително зададена гранична стойност на SNR или грешка от неопределеност.

Представени са изводи за влиянието на замърсяването, спрямо метрологичните характеристики на четирилъчев мътномер и са дадени препоръки за намаляването му.

3. Предложен е алгоритъм, определящ текущата необходимост от почистване на сензора на четирилъчев мътномер или наличието на дефектирал светодиод или фотодиод. Предложеният алгоритъм повишава експлоатационната ефективност на уреда, чрез намаляване честотата на прекъсванията на технологичния процес за ненужно почистване на оптиката на мътномера.

#### **ГЛАВА 5. Оценка на влиянието от фоновата осветеност и способ за намаляването му.**

Честотата и степента на изменение на интензитета на фоновата светлина е различна в зависимост от източника, който я поражда. Слънчевата светлина е почти постоянна, облаците в небето модулират бавно фоновото лъчение. Изкуственото осветление, реализирано с газоразрядни лампи, излъчва светлина с честотен спектър на изменение на интензитета до няколко кило херца. Мощността на фоновото осветление може да надвишава значително мощността на полезния сигнал, дори може да насити фотодиодите или електронния усилвател в четирилъчевия мътномер. Токът на тъмно през фотодиодите, използвани в четирилъчевия сензор, оказва аналогично въздействие, като влиянието на фоновата осветеност. Фоновата осветеност предизвиква грешка на изходния резултат на уреда по два пътя: единият е предизвикването на пряка систематична грешка  $\delta$ , а другият е индиректно влияние, посредством намаляване на параметъра SNR на сигналите от фотодиодите и в резултат увеличаване неопределеността на измерването и на случайната грешка  $\sigma_n\%$ .

##### **5.1 Теоретична оценка на влиянието от фоновата осветеност.**

Предложен е способ за теоретична оценка на влиянието от фоновата осветеност, спрямо резултата от измерването с мътномер, използвайки Математическия модел на уреда. Влиянието на фоновата осветеност се симулира, като към информативния светлинен сигнал, осветяващ фотоприемниците, се прибавя светлинно лъчение с определен интензитет  $I_{aml}$ , предизвикващ генериран фототок  $I_{aml}$ . За да се осигури

сравнимост на резултатите от симулациите за влиянието на фоновата осветеност и при други аналогични изследвания, се дефинира референтна стойност на интензитета  $I_{aml}$ , която да може да се определи еднозначно и е равна на интензитета  $I_{00}$  на излъчване по оптичната ос, генериран от инфрачервения светодиод в сензора. За референтната стойност на интензитета  $I_{aml}$  се приема, че фототоокът  $I_{aml}$  е равен на  $I_T$  и  $I_S$ :

$$I_{aml} = I_{S=} = I_{T=} \quad (5.2)$$

Равенството (5.2) е изпълнено за такава стойност на мътноста на измервания разтвор, при която оптичните свойства на измерваната среда оказват еквивалентно въздействие на облъчващия светлинен поток, както при оценяване на процеса на преминаване на светлина, така и при процеса на разсейване. На база равенството на токовете, се определя интензитета  $I_{aml}$ .

За прецизна оценка на влиянието от фоновата осветеност се разглеждат два гранични случая за разположение на сензора спрямо външното осветяване:

- фоновата осветеност взаимодейства само с единия фотодиод на четирилъчевия сензор, тогава се формира изходната величина  $T'$ ;
- фоновата осветеност взаимодейства еднакво и с двата фотодиода на четирилъчевия сензор, тогава се формира изходната величина  $T''$ .

Симулацията на промяната на силата на фоновата осветеност, се постига чрез задаването на интензитети, кратни на референтната стойност за  $I_{aml}$ . Определя се изменението на изходната величина на мътномера  $T'$  или  $T''$  за различни нива на мътноста и се изчислява относителната грешка  $\delta T' / T'$  на величината  $T' / T''$ , спрямо изходната величина  $T$ , дефинирана при липса на фонова осветеност.

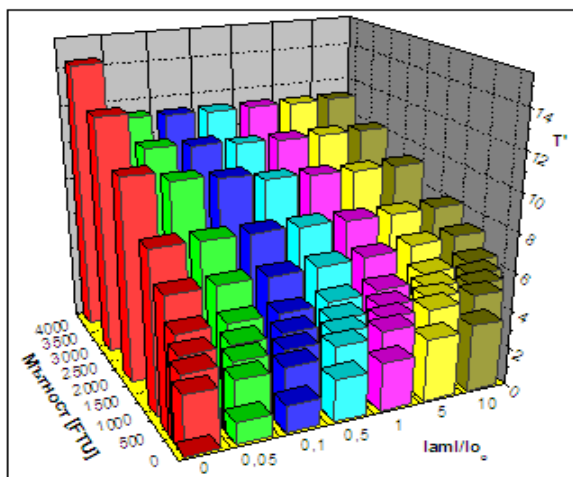
Фоновото осветяване увеличава големината на генерирания шумов ток от фотоприемниците в четирилъчевия сензор, докато нивото на полезния сигнал не се променя, следователно параметъра SNR намалява. Теоретична оценка на влиянието на фоновата осветеност спрямо отношението сигнал/шум на генерираните сигнали от четирилъчев сензор се прави, на база наличното му Аналитично описание, аналогично на описания пример в точка 2.4.4. В изразите за определяне на SNR към информативните сигнали  $I_T$  или  $I_S$  при зададена околна температура се прибавя тока, породен от външното осветяване  $I_{aml}$ .

## 5.2 Примери за теоретична оценка на влиянието от фоновата осветеност спрямо точността на измерване с мътномер.

Теоретична оценка на влиянието на фоновата осветеност, спрямо точността на измерване с мътномер, се прави с конкретни Примери, базирайки се на Аналитичното описание за Експерименталния четирилъчев сензор. Използват се резултати при “средни” стойности на геометричните параметри и условия на сензора. Изчисленията и визуализацията на резултатите се извършва с програмата OriginPro.

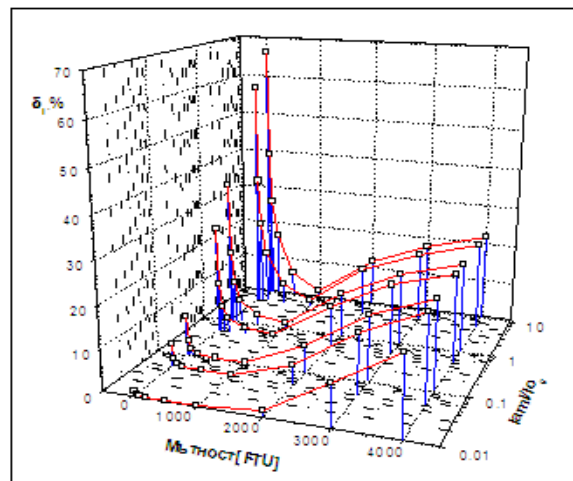
На Фиг. 5.1 е показан резултата от симулацията при осветяване само на единия фотодиод в сензора, за изменението на изходната величина  $T'$ . Стойността на величина  $T'$  е в относителни единици. На Фиг. 5.2 е илюстрирано изменението на относителната грешка  $\delta T$ , при промяна на мътноста и отношението на интензитетите  $I_{aml}/I_{00}$ . Графо-аналитичният анализ на Фиг. 5.1 показва, че с увеличаване на отношението на интензитетите  $I_{aml}/I_{00}$ , стойностите на изходната величина  $T'$  при ниски мътности растат, а при високи мътности – намаляват. Следователно при увеличаване на интензитета на фоновата осветеност, диапазонът на изменение на изходната величина  $T'$  постепенно се свива, което води до снижаване на чувствителността на уреда. От Фиг. 5.2 се установява, че с намаляване на мътноста, грешката расте и достига огромни стойности при мътности близки до нула. Големината на грешката  $\delta T'$  се увеличава, когато расте разликата между абсолютните стойности на токовете, оценяващи интензитетите на разсеяната и преминалата през пробата светлина. При високи мътности, грешката е

налична – от порядъка на 20% дори и при минимални стойности на фоновия интензитет, съответстващ на стотна от интензитета на излъчване на светодиодите.



Фиг. 5.1

Изменението за изходната величина  $T'$  в относителни единици и на относителната грешка  $\delta T'$  при осветяване на само единия фотодиод в сензора.



Фиг. 5.2

Ситуацията за оценка на фоновата осветеност, когато взаимодейства еднакво и с двата фотодиода на четирилъчевия сензор е аналогична, но измененията и грешките са два пъти по-големи.

От симулацията за оценка на влиянието на фоновата осветеност, спрямо отношението сигнал/шум на генерираните сигнали от четирилъчев сензор, се прави извода, че се получава достатъчно голям приет сигнал, спрямо нивото на шумовия ток. В резултат се осигурява пренебрежимо малка  $<1\%$  грешка  $\sigma_n\%$  от неопределеност на измерването и от инженерна гледна точка може да се пренебрегне.

Описаните Примери са за конкретен сензор, но подхода е приложим за всеки нефелометричен, турбидиметричен или многолъчев сензор, за който има математическо описание.

#### 5.2.4 Оценка на резултатите от симулационните изследвания за влиянието на фоновата осветеност.

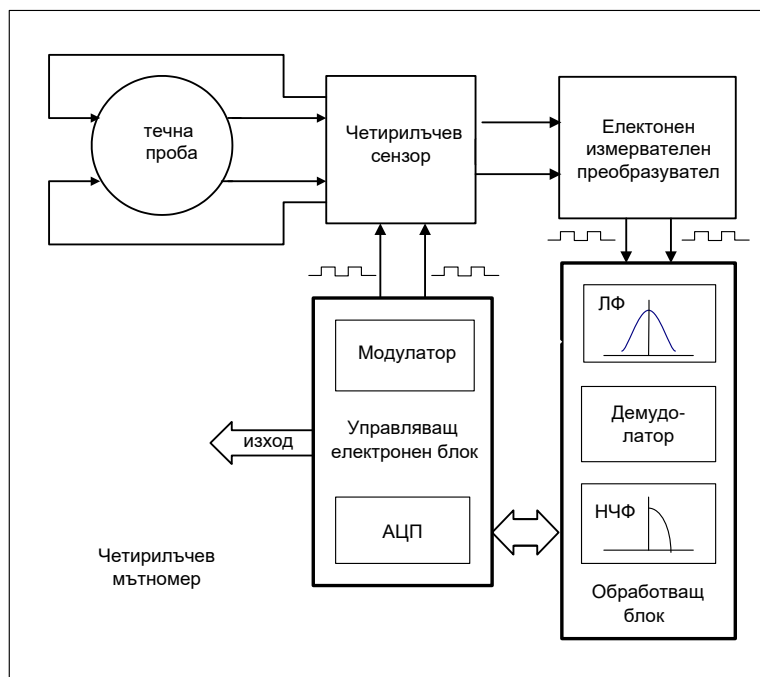
Четирилъчевият мътномер използва метода на отношенията при обработка на измервания сигнал, вследствие на което потиска в значителна степен влиянието на силната фоновата осветеност. Получените при симулациите относителни грешки  $\delta T'$ ,  $\delta T''$  са само десетки проценти, а не десетки пъти, както би било при мътномери, използващи единствено турбидиметричен или нефелометричен метод. Въпреки полученото потискане, фоновата осветеност и токът на тъмно през фотодиодите, са основните източници на систематична грешка при измерване на мътност.

#### 5.3 Концепция за изграждане на четирилъчев мътномер, използващ метода на модулация/демодулация на обработваните сигнали.

В настоящия Труд се предлага концепция за изграждане на четирилъчев мътномер, използващ обработка на сигналите, при която се потиска влиянието на фоновата осветеност, генерирана от практически всякакви светлинни източници. Концепцията се изразява в използването на импулсна модулация на интензитетите в четирите оптични лъча на мътномера, посредством правоъгълен сигнал със сравнително висока **модулираща честота  $f_m$**  и последваща синхронна демодулация. Прилагането на концепцията променя само способа на обработка на сигналите в мътномер, без да се изменя самата конструкция на съществуващия четирилъчев сензор. Честотата и формата

на модулиращите импулси е съобразена с възможностите на оптоприборите, които вече са използвани в типичните четирилъчеви сензори. По този начин, подобряването на метрологичните характеристики на мътномер се постига с минимални технологични промени и съответно материални разходи. На Фигура 5.7 е показана структурната блокова схема на четирилъчев мътномер, изграден съобразно предложената концепция.

Формата на модулиращия сигнал не е необходимо да е синусоидална, а е нужно само да е сигнал със съответна честота. Най-подходящ е правоъгълен сигнал с близък до 50% коефициент на запълване и точна честота. Такъв сигнал лесно би се генерирал от микропроцесор, което значително облекчава схемо-техническата реализация на устройството. Изборът на стойността на **модулиращата честота  $f_m$**  е от решаващо значение за ефективната конструкция на уреда и успешното подобряване на метрологичните му характеристики. Тя трябва да отговаря на следните условия: - да е достатъчно висока, за да се осигури ефективна филтрация от смущаващ сигнал, който притежава широк спектър на излъчване / в настоящото разглеждане на проблема се приема, че честотата на значимите по стойност хармоници на измерения сигнал, предизвикан от фоновото осветяване достигат 3kHz. /; - да не е кратна на честотата на мрежовото захранване 50/60Hz; - да не е прекалено висока, за да е възможно успешно усилване на сигнал, генериран от фотодиод с голяма фоточувствителна област и съответно голям паразитен капацитет  $C_p$ . Подходяща стойност за модулиращата честота  $f_m$  е между 10 и 20kHz.

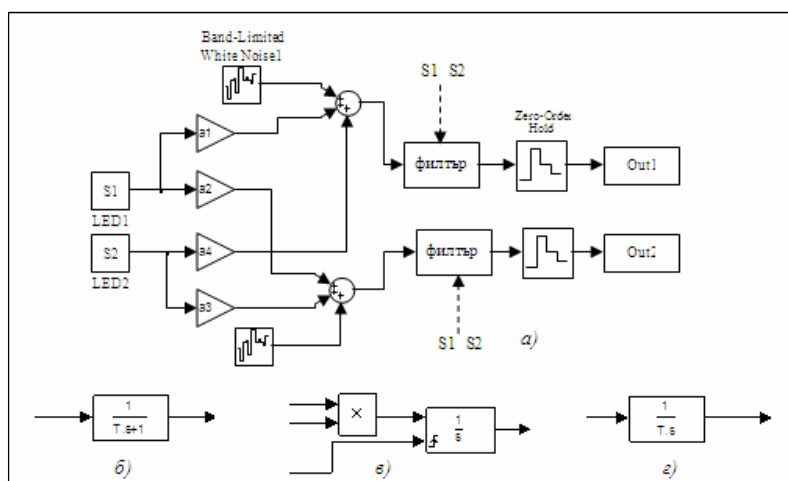


Фиг.5.7 Структурна блокова схема на четирилъчев мътномер, изграден на база метода модулация и демодулация.

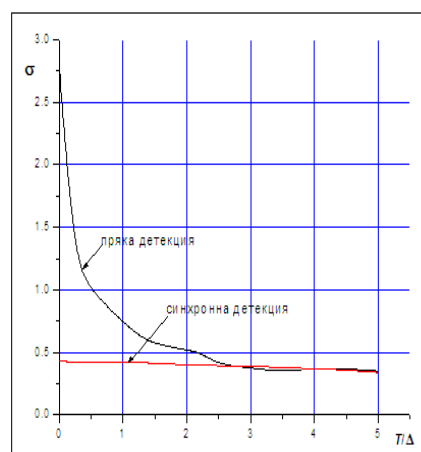
### 5.3.1 Симуляционно изследване за определяне на подходящата за използване демодулация в четирилъчев мътномер.

Извършено е симуляционно изследване в средата Simulink – MATLAB, Фиг.5.8. Оценката се прави на база влиянието на шума спрямо средноквадратичната грешка  $\sigma$  при различен тип демодулации и различни времеконстанти на нискочестотния филтър, следващ демодулатора. Резултатите от симулацията доказват, че грешката при синхронна детекция не зависи от относителната времеконстанта - Фиг.5.9. Този факт определя, че при синхронна детекция могат да се използват малки времеконстанти на филтъра, без да се увеличава грешката и същевременно да се гарантира бързодействие на уреда мътномер.

Следователно синхронната демодулация е по-подходяща от пряката /асинхронна/ за използване в структурата на четирилъчев мътномер с модулация на сигналите.



Фиг. 5.8



Фиг. 5.9

Симулационен модел на четирилъчев мътномер с различни демодулатори

### 5.3.2 Електронен измервателен преобразувател и лентов филтър.

За конкретизация при описанието на предложената концепция, се използват параметрите на фотодиодите S1337-1010BR, вградени в Експерименталния четирилъчев сензор. Избира се уредът мътномер, изграден според концепцията, да извършва едно измерване в секунда. Честотата на модулация  $f_m$  е 13,11kHz, защото тази стойност попада в честотна област със сравнително ниско ниво на шумови сигнали.

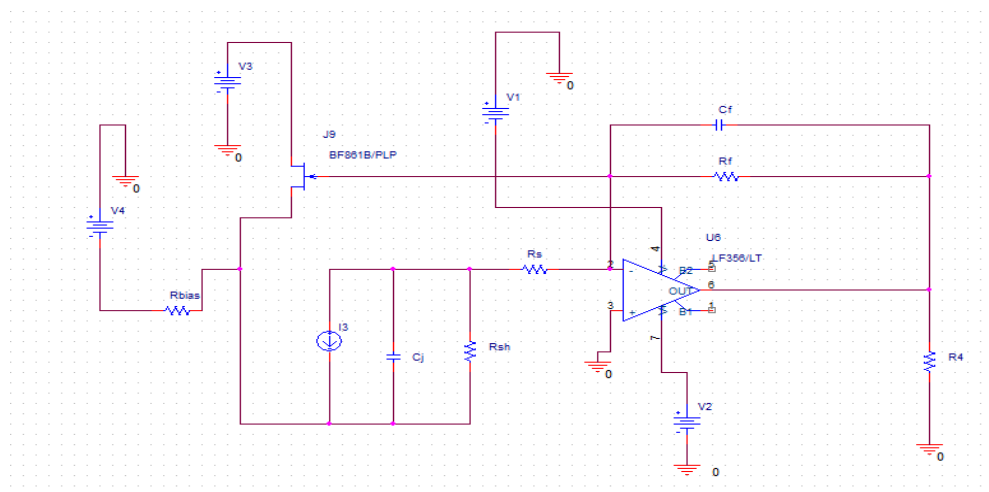
От инженерна гледна точка, не представлява съществена трудност практическата реализация на електронните устройства, извършващи: модулация/ демодулация, нискочестотна филтрация; аналого-цифрово преобразуване; управление на процесите в уреда и генериране на Изходен сигнал. Ключово за успешното реализиране на предложената концепция за обработка на сигналите в четирилъчев мътномер, е постигането на необходимите специфични характеристики за Електронните измервателни преобразуватели и Лентовия филтър. За доказване на възможността за успешна реализация на предложената концепция са проведени редица експериментални, теоретични изследвания и практически са изработени тези електрони блокове.

Съставен е функционален еквивалентен модел за PSpice на аналогов активен лентов филтър от осми ред, използващ се в структурата на Обработващия блок на мътномера. След провеждане на необходимите симулации, филтърът е реализиран на базата на ИС MAX 274.

Подходяща схема за Електронен измервателен преобразувател е на усилвател с обратна връзка от тип "bootstrap", притежаващ широка честотна лента, дори и при работа от източник на сигнал с голям капацитет. На Фиг.5.14 е показна схемата на трансимпедансен усилвател с бутстрапната обратна връзка. При анализа на схемата са използвани симулационни изследвания с програмата OrCAD PSpice A/D.

За симулационно тестване на използвания OY LF356/NS се използва модел от PSpice библиотеката на Nat\_semi.lib от ниво 3 - тип MPZ1. Моделът MPZ1 обаче, не моделира входния капацитет за синфазните сигнали за разлика от макромоделите на OY ниво 2 тип EN1. С цел преодоляване на посочения недостатък е предложен усъвършенстваният модел, при който за модел от ниво 3 тип MPZ1 във входното стъпало на OY LF356/NS са добавени кондензатори Ccm1 и Ccm2, така че да бъде отразено влиянието на входния капацитет за синфазни сигнали. Извършена е съпоставка между експериментално получените и симулационните резултати, доказваща достоверността на усъвършенствания

модел от тип MPZ1. Усъвършенстваният модел може успешно да се използва и за друг вид симулации в PSpice, например за определяне влиянието на кондензатора  $C_f$  спрямо честотните свойства на електронния преобразувател.



Фиг.5.14 Схема за симулация на трансимпедансен преобразувател с обратна връзка от тип “bootstrap”, усилващ сигнал от фотодиод.

В предложената концепция за изграждане на мътномер, потискането на влиянието на генерирания от фоновата осветеност сигнал в Обработващия блок се определя от общото потискане на Лентовия и Ниско честотния филтър. Общото потискане на проникналите смущаващи сигнали е над 100dB, което е повече от 100000 пъти. При такова затихване и не допускане на насищане на Електронния измервателен преобразувател, влиянието на фоновата осветеност практически се премахва напълно. При възможност Управляващият блок да измерва постоянно напрежение преди Лентовия филтър, може да се открива и сигнализира състояние на насищане на Електронния измервателен преобразувател.

Обобщавайки анализа на предложената концепция, използваща висока честота на модулиране, синхронна демодулация и цифрова обработка на сигналите, се прави извода, че може да се реализира уред, който: оценява линейно измерваната мътност; не се влияе от промяната на фоновата осветеност и околната температура; автоматично сигнализира за наличието на замърсяване или повреден оптоприбор и в резултат се повишават метрологичните характеристики на четирилъчевия мътномер.

## Основни резултати в Глава 5

1. Извършена е аналитична оценка на влиянието на фоновата осветеност спрямо систематичната грешка на измерване и на случайната грешка, породена от шум в мътномер. Оценка се осъществява чрез Примери, базиращи се на Аналитичното описание за Експерименталния четирилъчев сензор и на Математическия модел на уреда. Симулира се изменение на интензитета на смущаващото фоново осветяване в диапазона от 0,01 до 10 пъти, от интензитета на облъчване на инфрачервените светодиоди, използвани в сензора. Изчисленията и визуализацията на резултатите се извършва с програма OriginPro. Резултатите от симулациите показват, че влиянието на фоновата осветеност, спрямо случайната грешка, породена от шумов ток, може да се пренебрегне, но дори фоновата осветеност с интензитет представляващ стотна част от интензитета на излъчване на светодиодите, води до появяването на значима систематична грешка в измерването на мътността. Използваните Примери за симулационна оценка са за конкретен сензор, но подходът е приложим за всеки нефелометричен, турбидиметричен или многолъчев сензор, за който има математическо описание.

2. Предложена е концепция за изграждане на четирилъчев мътномер с използване на модулация/синхронна демодулация с висока честота и смесена аналогова и цифрова обработка на сигналите. Извършено е симулационно изследване, основаващо се на Математически модел на четирилъчев мътномер, за определяне на подходящата демодулация в средата Simulink – MATLAB.

3. Извършено е симулационно изследване на трансимпедансен усилвател с обратна връзка от тип “bootstrap”, използван като Електронен измервателен преобразувател в структурата на мътномер. За успешната реализация на симулациите в среда Orcad Pspice е предложено усъвършенстване на макромодел на ОУ от ниво 3 - тип MPZ1.

4. Описанието, анализа на концепцията за изграждане на четирилъчев мътномер, както и практическата реализация на ключови възли от структурата му, доказват възможността за изграждане на уред, при който се премахва влиянието на фоновата осветеност; грешката от постояннотоковото отместване; намалява се грешката от нелинейност; ефективно се открива и сигнализира замърсяване или повреда в четирилъчевия сензор; контролира се насищането на Електронния измервателен преобразувател.

### НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

1. Предложен е **Подобрен теоретичен модел** на явлениято разсейване на светлина, при който всяка частица от оценявания обем на разтвора, участва в процес на еднократно разсейване на облъчващия светлинен поток и еднократна абсорбция на вече разсеяния поток.

2. Създадени са нови средства за анализ - **Аналитично описание на четирилъчев сензор** за мътност и **Математически модел на четирилъчев мътномер**, описани със съответните изрази на функции на предаване. Изведени са изразите на функциите на предаване на типичен четирилъчев мътномер и за четирилъчев сензор при процеса на разсейване /основани на *Подобрения теоретичен модел*/ и на преминаване на светлина през разтвор.

3. Представена е **Методика за определяне на предавателните функции на конкретен четирилъчев сензор и среда**, включваща и **Методика за определяне на предавателната функция на светодиода** на база техническите параметри на прибора. Валидността и приложимостта за практически инженерни пресмятания на представените Методики са потвърдени с подходящи **Примери**.

4. **Изработен е Експериментален четирилъчев сензор** за мътност с променяща се геометрия и ток през светодиодите, с който са направени общо 3960 измервания. Резултатите от измерванията са използвани за съпоставка с теоретично предсказаните данни от математическите модели. Съпадението между експерименталните и теоретично предсказаните данни доказват достоверността и коректността на Аналитичното описание на сензор и Математическия модел на четирилъчев мътномер.

5. Предложен е **способ за линеаризация** и е реализиран електронен модул за допълнителна аналогова обработка на сигнала, получен от типичен мътномер. Прилагането на способа, спрямо данните получени от Експерименталния четирилъчев сензор, намалява грешката от нелинейност за изходния сигнал на уреда в диапазона до 1000FTU, от 13,4% на 2,2%. Предложен е и способ за линеаризация по цифров път, основаващ се на метода на най-малките квадрати чрез апроксимиращ полином от трета степен.

6. Извършени са експериментални симулации на влиянието на замърсяването, чрез изменение захранването на светоизточниците за два вида четирилъчеви сензори за мътност. Направена е теоретична оценка, основаваща се на Аналитичното описание на сензор, за определяне влиянието на замърсяването, спрямо големината на SNR за приетия сигнал и на относителната средно квадратична неопределеност на измерването. За

количествено определяне намаляването на влиянието от замърсяване, при измерване с многолъчева конструкция, спрямо простото нефелометрично или турбидиметрично измерване, се въвежда и определя нова величина - **коэффициент на потискане на замърсяването CRC** /contamination rejection coefficient/. Представени са изводи за влиянието на замърсяването, спрямо метрологичната характеристика на четирилъчев мътномер и са дадени препоръки за намаляването му.

7. Предложен е алгоритъм, повишаващ експлоатационната ефективност на мътномер, чрез определяне на текущата необходимост от почистване на сензора или наличието на дефектирал светодиод или фотодиод.

8. Извършена е симулационна оценка на влиянието на фоновата осветеност, спрямо систематичната грешка на измерване и на случайната грешка, породена от шум в мътномер. На база оценката са направени изводи за намаляване влиянието на фоновата осветеност.

9. Предложена е концепция за изграждане на четирилъчев мътномер, с използване на модулация/синхронна демодулация на висока честота и смесена аналогова и цифрова обработка на сигналите. Предложен е усъвършенстван макромодел на ОУ от ниво 3 - тип MPZ1, използван в симулационните изследвания на трансимпедансен усилвател с обратна връзка от тип "bootstrap" в среда Orcad Pspice.

## СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Списък на публикациите с участие на автора:

1. Божилов, Р., Д. Добрев, Микропроцесорен нивомер за течни или газообразни среди с оптична сонда, Научно-приложно списание Водоснабдяване Канализация Пречистване на водата, брой 3, октомври 1996, ISSN 1310-795 X , стр. 28-31.

2. Божилов, Р., Й. Рускова, Изследване на четирилъчев фотометричен датчик за мътност, VII-ми Национален научен симпозиум с международно участие „МЕТРОЛОГИЯ и надеждност '96", Том II, 19-23 септември 1996, Созопол, стр. 327-332.

3. Божилов, Р., Й. Рускова, Електронен модул за обработка на сигнали от четирилъчев фотометричен датчик за мътност, VII-ми Национален научен симпозиум с международно участие „МЕТРОЛОГИЯ и надеждност '96", Том II, 19-23 септември 1996, Созопол стр. 321-326.

4. Божилов, Р., С. Василева, Функционален модел на аналогов активен филтър от осми ред, Научни трудове на Съюза на учените в България – Пловдив, серия Б. Естествени и хуманитарни науки, том IV, 22 октомври 2004г, Пловдив, стр. 98-102, ISSN 1311-9192.

5. Божилов, Р., Цв. Григорова, Изследване на променливотоков усилвател с обратна връзка bootstrap, XXIV Национален научен симпозиум с международно участие „Метрология и метрологично осигуряване 2014", 7-11 Септември 2014г, Созопол, стр. 200-206, ISSN 1313-9126.

6. Божилов, Р., Стандарти при измерване на мътност, XXIV Национален научен симпозиум с международно участие „Метрология и метрологично осигуряване 2014", 7-11 Септември 2014г, Созопол, стр.234-239, ISSN 1313-9126.

7. Рачев, Ив., Р. Божилов, Симулационно моделиране на влиянието на шума върху грешката в четирилъчевите оптоелектронни мътномери, Scientific Research of the Scientists in Bulgaria – Plovdiv, series B. Natural Sciences and Humanities, Vol. XVII, 11-13 June 2105, Plovdiv, pp.136-141, ISSN 1311-9192.

8. Рачев, Ив., Р. Божилов, Оценка на влиянието на филтрацията на сигнала и шума върху грешката в четирилъчевите мътномери, Научни трудове на Съюза на учените в България – Пловдив, серия В техника и технологии, том XIII, 5-6.11.2015, Пловдив, стр. 208-212, ISSN 1311-9419.

## SUMMARY

### IMPROVEMENT OF THE METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF A FOUR-BEAM TURBIDITMETER

**Author: Rosen Milchov Bozhilov**

Turbidity measurements are accomplished at all stages of water processing and purification. Four-beam turbidity sensors are widely used due to their high accuracy and exploitation reliability. The subject of the present PhD thesis is improvement of the metrological characteristics of four-beam turbidity sensors and the methods of their evaluation.

Analytical description of a four-beam sensor and a Mathematical model of a typical four-beam turbidimeter have been developed and presented together with the corresponding expressions for the transmission functions. The Analytical description of four-beam sensor is based on an Improved description of the process of light transmission through a solution, where each particle of the evaluated volume participates in two interactions: firstly in the process of scattering the irradiating light; and secondly, in the process of absorption of the already scattered light flux. A Methodology for determining the transmission function of a specific four-beam sensor and a medium, containing also a Methodology for defining the transmission function of a light emitting diode based on the technical parameters of the device, has been created for the practical implementation of the Mathematical model.

An Experimental four-beam sensor with changeable geometry and different supply of the light sources has been created and a number of measurements have been carried out. The high level of correspondence between the experimental results and the predicted by the Mathematical model data has proved the adequacy and correctness of the model.

A method for linearization has been proposed and an electronic module with additional analogue processing of the signal in comparison to a typical turbidimeter has been realized. Turbidity range, for which the proposed method is efficient, has been defined.

Experimental simulations of the influence of contamination have been carried out by changing the supply of the light sources. Theoretical evaluation of a sensor has been made based on the Analytical description, for defining the influence of contamination with respect to the magnitude of SNR for the received signal. For quantitative determination of the reduction of the contamination influence a new variable has been introduced and defined - contamination rejection coefficient CRC. Simulation evaluation of the influence of the background illumination based on the Mathematical model of a turbidity sensor has been performed in reference to the systematic measurement error and the random error, caused by noise in the device. On the basis of the simulation analysis conclusions have been drawn about the improvement of the metrological characteristics of a four-beam turbidity sensor.

A concept for constructing a four-beam turbidimeter by using modulation/synchronous demodulation of high frequency together with mixed analogue and digital processing of the signals has been proposed. When implemented, the concept results in a device, which: evaluates measured turbidity linearly; is not influenced by changes in the background illumination and ambient temperature; automatically signals about the availability of contamination or damaged optical device.