



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ
МАШИНОСТРОИТЕЛЕН ФАКУЛТЕТ
Катедра “ПРЕЦИЗНА ТЕХНИКА И УРЕДОСТРОЕНИЕ”

Маг. инж. Мирослав Христов Христов

**ОПТИМИЗИРАНЕ НА МЕТРОЛОГИЧНИТЕ И
ЕКСПЛОАТАЦИОННИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА
ПНЕВМО-ЕЛЕКТРОННИ ИЗМЕРВАТЕЛНИ
СРЕДСТВА ЗА ЛИНЕЙНИ РАЗМЕРИ**

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: 5.1. Машинно инженерство

Научна специалност: Методи, преобразуватели и уреди за измерване и контрол
на физико-механични и геометрични величини.

Научен ръководител: проф.д-р Георги Кирилов Дюкенджиев

СОФИЯ, 2020 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Прецизна техника и уредостроене“ към Машиностроителен Факултет на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 24.10.2019 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 18.02.2020 г. от 13:00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-5.1-66 / 20.11.2019 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. Проф.д-р Георги Кирилов Дюкенджиев – председател
2. Доц.д-р Димитър Иванов Дяков – научен секретар
3. Проф.д-тн Христо Кирилов Радев
4. Проф.д-р Тодор Димитров Нешков
5. Проф.д-р Димитър Дамянов Дамяновски

Рецензенти:

1. Проф.д-тн Христо Кирилов Радев
2. Проф.д-р Тодор Димитров Нешков

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на МФ на ТУ-София, блок №4, кабинет № 3242.

Дисертантът е редовен докторант към катедра „Прецизна техника и уредостроен“ на Машиностроителен Факултет. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора, като някои от тях са подкрепени от научноизследователски проекти.

Автор: Маг. инж. Мирослав Христов Христов

Заглавие: Оптимизиране на метрологичните и експлоатационни характеристики на пневмо-електронни измервателни средства за линейни размери

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Непрекъснатото повишаване на качеството и надеждността на машиностроителните изделия е в основата на съвременния научно-технически прогрес. То е немислимо без осъществяването на високоефективен контрол на заложените в конструктивните документации изисквания към геометричните параметри. Повишаване на производителността и намаляване влиянието на субективния фактор върху качеството - това е едно от основните направления, в което са концентрирани усилията на водещите производители на пазара. Решаването на проблемите, свързани с контрола на качеството в масовото производство, е сред най-важните задачи на метрологията днес.

За безконтактни измервания на геометрични размери с относително тесни допускови полета в практиката са се наложили пневмо-електронни измервателни средства (ПЕИС). Те се характеризират с висока надеждност, проста конструкция и лесно обслужване.

Пневмо-електронните измервателни средства (ПЕИС) имат някои недостатъци, свързани с необходимостта от захранване с пречистен въздух със стабилизирано налягане, малък обхват и голяма инертност. Често в практиката се изисква голям набор от допълнителна екипировка, което оскъпява контрола. Измерванията с ПЕИС изискват високо квалифициран персонал поради необходимостта от настройка на уредите при пускане и при поднастройка. Това води до внасяне на допълнителна неопределеност върху резултата от измерването и усложняване автоматизацията на контрола. Тези недостатъци могат да бъдат намалени чрез въвеждането на софтуерни компенсации на влияещите фактори. Това е пътят, по който ПЕИС могат да отговорят на съвременните изисквания на Индустрия 4.0.

Всичко това прави особено актуални изследванията в тази област.

Цел на дисертационния труд, основни задачи за изследване

В резултат на направения анализ на състоянието и перспективите за развитие и приложение на пневматичните измервателни средства, в дисертационната работа е поставена следната цел: **„Оптимизиране на метрологичните и експлоатационни характеристики на ПЕИС“**.

За постигането на тази цел трябва да бъдат изпълнени следните задачи:

- Изследване и анализ на влияещите фактори върху метрологичните и експлоатационни характеристики на ПЕИС;
- Разработване на решения за подобрения на метрологичните и експлоатационни характеристики на ПЕИС;
- Оценка на подобренията на ПЕИС чрез използване на методологията „Анализ на измервателната система” (MSA).

Научна новост

Подобрили са метрологичните и експлоатационни характеристики на ПЕИС посредством въвеждане на софтуерна компенсация на грешките, предизвикани от колебанието на захранващото налягане.

Практическа приложимост

На база на извършените изследвания и анализа на влияещите фактори върху метрологичните и експлоатационни характеристики на ПЕИС са разработени решения за подобрения, базирани на въвеждането на софтуерна компенсация на грешката.

Извършена е оценка на подобренията на ПЕИС чрез използване на методологията „Анализ на измервателната система” (MSA).

Апробация на дисертацията

Представените изследвания са реализирани в лабораторни условия чрез използване на реални идустрални измервателни средства. Разработената система е апробирана в „Спарки Елтос” АД и „М+С Хидравлик” АД. Основните разработки и резултати от дисертационния труд са докладвани на:

- International Scientific Symposium „Metrology and Metrology Assurance “ 2016, 2017 и 2019
- International Journal of Innovations in Engineering and Technology (IJET), Volume 10 Issue 1, IV.2018
- World Academy of Science, Engineering and Technology, International Science Index 139, VII.2018;
- Младежката научна конференция МАШИНИ, ИНОВАЦИИ, ТЕХНОЛОГИИ “МИТ – 2019”

Публикации

По темата на дисертацията са направени шест публикации, от които една самостоятелна и пет в съавторство. Две от публикациите са в чуждестранно списание, три в реферирани трудове на международни конференции в България.

Структура и обем на дисертацията

Дисертационният труд е в обем от 164 страници, като включва увод, 3 глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература; 11 приложения. Цитирани са общо 118 литературни източници, като 76 са на латиница и 42 на кирилица. Работата включва общо 70 фигури и 18 таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД*

ГЛАВА 1

Състояние на проблема и формулиране на цели и задачи на изследването

1.1 Пневматичен принцип на преобразуване и видове преобразуватели

Пневматичният принцип на преобразуване е основан на зависимостта на масовия дебит на въздух от напречното сечение на дюза, през която изтича в атмосферата. [33]

По-широко практическо приложение са намерили преобразувателите, използващи манометричния метод за измерване, основан на зависимостта на налягането в камера между входна и изходна дюзи от сечението на изтичане на въздуха през изходната дюза. [33]

За преобразуването на линеен размер или преместване в пневматичен сигнал най-често се използва зависимостта между площта на преходното сечение и разхода на въздух през нея. Пневматичният преобразувател може да се използва за безконтактно измерване на малки премествания - хлабина между дюза и преграда. [12,16]

Разгледани са характеристиките на пневматичните преобразуватели. Графично и аналитично са представени зависимости между различните параметри и влиянието, което оказват върху преобразувателната характеристика.

Представени са различни видове пневматични преобразуватели и техните характеристики.

1.2 Схеми за реализиране на пневматични измервателни средства (ПИС).

Представени са три схеми за реализиране на ПИС - недиференциална, диференциална и компенсационна. Описани са основните им предимства и недостатъци, както и основните им приложения.

Разгледани са устройствата за подготовка на въздух като неразделна част от пневматичните измервателни системи. Представени са техните характеристики и влиянието, което указват върху метрологичните и експлоатационни характеристики на ПИС

1.3 Пневматични измервателни системи.

Класическите командно-показващи уреди (КПУ) регистрират изменението на измерваното налягане в пневматичната измервателна верига, т.е. свързват се с преобразуватели от дроселен, дроселно-инжекторен и струен тип. КПУ от този вид се базират на манометрични устройства - течностни манометри, мембранни, силфонни устройства, бурдонови тръби и др.

Съвременните ПИС се базират на използването на пневмо-електронни пневматични

* Номерацията на главите, фигурите, таблиците и цитираните източници съответства на номерацията в дисертацията.

преобразувател, поради наличието на цифров изходящ сигнал.

Акцентът на десертационния труд е върху пневмо-електронните измервателни средства (ПЕИС). Представени са характеристики на ПЕИС от водещи производители и са разгледани различни видове измервателна екипировка в зависимост от приложението им.

1.4 Калибриране, настройка и експлоатация на ПЕИС

Разгледани са калибрирането и настройката на ПЕИС, както и особеностите, с които са свързани тези дейности при различните видове ПЕИС, в зависимост от приложението им - за измерване или за контрол.

Съвременният подход за осигуряване на качеството на измерванията и контрола изисква отчитане на всички влияещи върху измервателния процес фактори. За оценка качеството на ПЕИС се използват методите за анализ MSA, които са задължителни за автомобилната промишленост. Тези методи позволяват лесно и бързо да бъде оценено качеството на контрола и годността на измервателните средства.[9]

1.5 Обзор на патенти

Направен е обзор на патенти. Разгледани са 8 патента, представени в Приложение.

1.6 Метрологични и експлоатационни характеристики на ПЕИС

За да се определят възможностите за подобряване на метрологичните и експлоатационни характеристики на ПЕИС, същите са разгледани и систематизирани. Определени са влияещите фактори и са посочени мерките и средствата, с които може да се въздейства върху тях, с цел да бъдат подобрени. В зависимост от вида на ПЕИС и тяхното приложение са оценени възможностите им като измервателни или контролни системи.

1. Разгледани са метрологичните характеристики на ПЕИС, от какво се влияят и как могат да бъдат подобрени.

2. Разгледани са характеристиките на контрола, както и изискванията към ПЕИС, свързани с тях.

3. Разгледани са основните експлоатационни характеристики на ПЕИС, от какво се влияят и как могат да бъдат подобрени. Като част от експлоатационните условия, акцент е поставен върху захранващото налягане. Към него има високи изисквания, свързани с това, то да бъде с минимални колебания, което налага използването на регулатори на налягане.

Настройката и калибрирането са сред най-важните експлоатационни процеси при ПЕИС. Те обуславят необходимостта от високо квалифициран персонал, който да извършва тези дейности.

Представени са тенденциите и перспективите за развитието на ПЕИС. Те са пряко свързани с развитието на компютрите и тяхното приложение в индустриални условия, като мощен инструмент за обработка на данни и управления на процеси.

Извършен е анализ на възможностите на ПЕИС. От разгледаните пневматични преобразуватели и възможностите за реализиране на ПЕИС са обобщени факторите, влияещи върху техните метрологични и експлоатационни характеристики. Същите са представени чрез причинно-следствена диаграма (Фиг.1.28)



Фиг.1. 28. - Ишикава за ПЕИС

1.7 Изводи и констатации по Първа Глава

Извършен е анализ на метрологичните и експлоатационни характеристики на ПЕИС. Разгледани са техните основни характеристики в зависимост от употребата (за измерване или за контрол). Посочени са различни приложения в съвременната индустрия. Извършен е анализ на възможностите на ПЕИС във връзка с тенденциите и перспективите за развитието им.

1. На база на извършения обзор могат да се определят основни предимства на ПЕИС:

Едно от най-съществените - безконтактен начин на измерване. Той води със себе си и други позитиви:

- Почистване на измерваната повърхнина по време на измервателния процес;
- Възможност за комбиниране с аеростатично базиране и еквилибрирано самоориентиране;
- Липса на механичен контакт при работа - предпазва системите от износване и запазва във времето геометричните характеристики на измервателната екипировка;
- Възможност за работа в специални условия – взривоопасна среда, силни електромагнитни полета и др.

Друго основно предимство е простата конструкция на първичния преобразувател, което води до висока надеждност.

2. На база на извършения обзор са констатирани основни проблеми и недостатъци на

ПЕИС. По настоящем те запазват част от недостатъците на предшестващите ги такива. Проблемите, довели до ограниченото им разпространение, са свързани с:

- Относително малък измервателен обхват;
- Скъпа инструментална екипировка;
- Необходимост от два вида захранване;
- Слаби динамични показатели;

- Необходимост от настройка на уредите при всяко пускане. Това предполага наличие на квалифициран персонал за работа. От друга страна - носи потенциален риск от допускане на субективна грешка. Проблемите при настройката се дължат основно на колебания в захранващото налягане на сгъстения въздух и на недостатъчно добро пречистване и обезмасляване.

3. Съвременните тенденции в развитието на ПЕИС са свързани с ниските цени на електронните компоненти и широкото разпространение на компютрите и компютърно базираните индустриални системи. Това дава възможност за създаване на унифицирани измервателни системи с големи комуникационни възможности, както и лесна реализация на статистически методи за управление на качеството.

4. От прегледа на факторите, влияещи върху експлоатационните и метрологични характеристики на ПЕИС, са изведени най-значимите, като е систематизиран и характера на тяхното влияние. На база на това са анализирани различни възможности за оптимизация на ПЕИС:

- Подобряване на метрологичните характеристики на ПЕИС чрез повишаване на точността благодарение намаляване на грешката на показанието, грешката от нелинейност и субективната грешка.

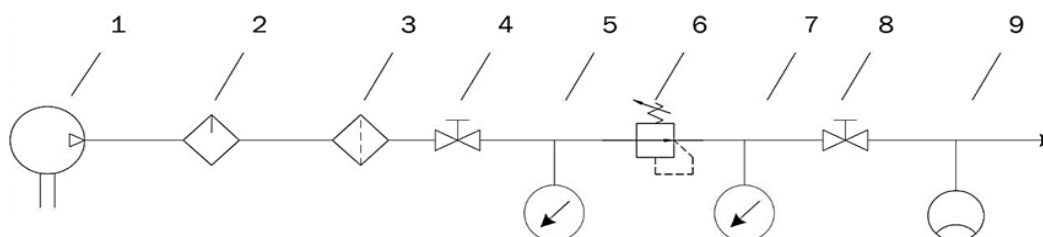
- Подобряване на експлоатационните характеристики на ПЕИС чрез улесняване на настройката без промяна на сечението на входната дюза и повишаване на стабилността, чрез следене и коригиране на влияещите фактори, в частност - колебанието на захранващото налягане.

За реализация на подобрения върху метрологичните и експлоатационни характеристики е необходимо да се разгледа влиянието на колебанието на захранващото налягане като основен фактор и причините, които го пораждат.

ГЛАВА 2

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ОСНОВНИ ФАКТОРИ, ВЛИЯЕЩИ ВЪРХУ МЕТРОЛОГИЧНИТЕ И ЕКСПЛОАТАЦИОННИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ПЕИС

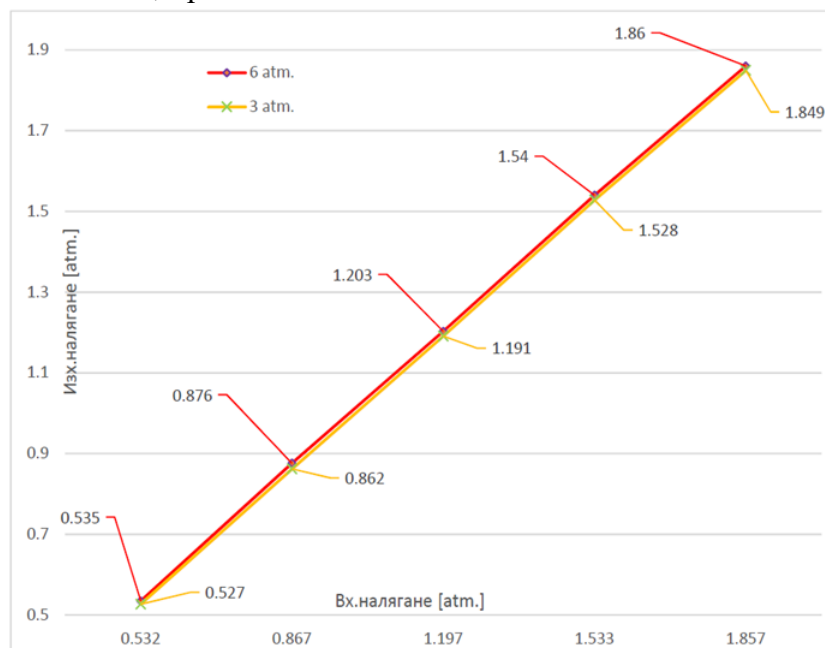
2.1 Изследване на характеристиките на регулаторите на налягане



Фиг.2. 2 - Блок схема на опитна установка за изследване на регулатори на налягане: 1.Компресор; 2.Влагоизсушител; 3.Филтър; 4. Кран; 5.Дигитален Манометър; 6.Изследван регулатор; 7.Образцов манометър; 8.Кран; 9.Разходомер.

За изследването на ПЕИС е необходимо да се оцени влиянието на промяната на хранящото налягане върху характеристиката на преобразуване. За тази цел трябва подробно да се разгледат регулаторите на налягане като неразделна част от измервателната система.

За изследване на характеристиките на регулатори на налягане е използван стенд, реализиран чрез блок схема, представена на Фиг.2. 2.



Фиг.2. 6 - Графика на промяната на изходното налягане като функция на входното при регулатор SMC IR1000 (*1atm. = 0,1 MPa)

Извършени са изследвания за промяната на характеристиките на регулаторите на налягане с и без усилване и са представени в табличен вид. От тях може да се наблюдава влиянието на колебанието на хранящото налягане при промяната на разхода на въздух.

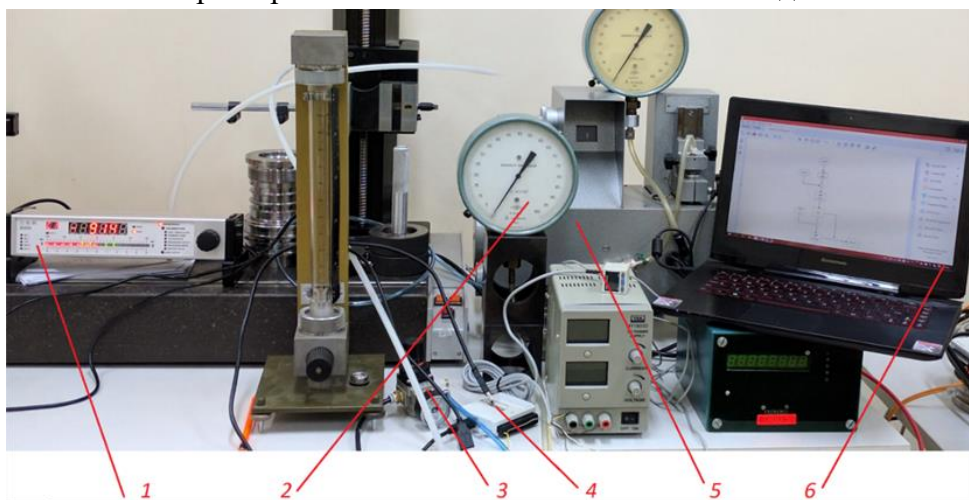
ПЕИС силно се влияят от промяната на захранващото налягане, което води до изместване на направените настройки. Това може да доведе до изместване на контролните граници при използване на ПЕИС за контрол или до по-голяма инструментална неопределеност при използване на ПЕИС за измерване.[20]

На Фиг.2. 6. е представена графика на промяната на изходното налягане като функция на входното при регулатор SMC IR1000. В разгледания диапазон на промяна на входното налягане с 0,3 МПа се наблюдава грешка на регулатора 1,5%.

Основен източник на грешка при регулаторите на налягане е грешката от хистерезис при колебание на захранващото налягане. При регулатори без усилване (SMC AR 20), промяната в стойностите на изходящото налягане при промяна на входното налягане с 0,4 МПа достига 4%. При регулатори с усилване (SMC IR1000), хистерезисът при промяна на входното налягане с 0,4 МПа достига 0,7%, което е 6 пъти по-добра стойност спрямо регулаторите без усилване.

2.2 Изследване на влиянието на регулаторите на налягане върху ПЕИС

За изследване на регулаторите на налягане SMC AR20 и SMC IR 1000 и тяхното влияние върху метрологичните характеристики на IBR ae-1 се използва стенд на Фиг.2. 10.



Фиг.2. 10. - Опитна установка за изследване на ПЕИС: 1. ПЕИС; 2. Образцов манометър; 3. Регулатор на налягане; 4. АЦП; 5. Клинов Уред; 6. РС

От направените изследвания може да се заключи следното:

- Колебанието на входното налягане с $\pm 0,002$ МПа води до вариация на измерената стойността на ПЕИС IBR-ae1 с $\pm 1 \mu\text{m}$.

- Колебанието на захранващото налягане с 0,3 МПа води до грешка на показанието от $2,4 \mu\text{m}$ до $3 \mu\text{m}$ в измервателен диапазон, деклариран от производителя ($100 \mu\text{m}$)[108] при регулатори без усилване и грешка от $0,9 \mu\text{m}$ до $1,3 \mu\text{m}$ при регулаторите с усилване;

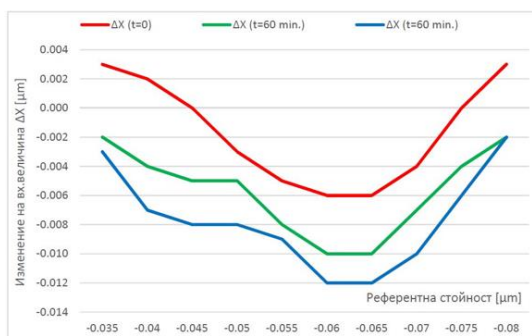
- Хистерезисът на регулаторите без усилване SMC AR20 предизвиква грешка от $2 \mu\text{m}$. При регулаторите с усилване SMC IR 1000 грешката е $0,5 \mu\text{m}$. [3,5]

Стабилността е една от основните метрологични характеристики на ПЕИС и е в основата за определянето на интервалите за поднастройка. Регулаторите на налягане оказват съществено влияние върху запазване на преобразователната характеристика на ПЕИС във времето.

В рамките на 60 минути регулаторите с усилване запазват в по-голяма степен стабилността на преобразователната характеристика на ПЕИС (Табл.2. 6. и Фиг.2. 13.), като разликата може да достигне до 50% в сравнение с регулаторите без усилване.

Референтна стойност	$\Delta x(t=0)$	$\Delta x(t=60 \text{ min.})$ SMC IR1000	$\Delta x(t=60 \text{ min.})$ SMC AR20
-0.035	0.003	-0.002	-0.003
-0.04	0.002	-0.004	-0.007
-0.045	0.000	-0.005	-0.008
-0.05	-0.003	-0.005	-0.008
-0.055	-0.005	-0.008	-0.009
-0.06	-0.006	-0.010	-0.012
-0.065	-0.006	-0.010	-0.012
-0.07	-0.004	-0.007	-0.010
-0.075	0.000	-0.004	-0.006
-0.08	0.003	-0.002	-0.002

Табл.2. 6. - Изменение на стойностите на входната величина (X) на IBR-ae1 през 30 и 60 мин при регулатор SMC AR20 и SMC IR1000; t -момент на отчитане на X



Фиг.2. 13 - Изместване на настройката на IBR-ae1 като функция на времето, при регулатор SMC AR20 и SMC IR1000

* Посочените резултати са средноаритметични стойности от 5 измервания

За намаляване на влиянието на регулаторите на налягане върху метрологичните и експлоатационни характеристики на ПЕИС може да се предложи хардуерен и софтуерен подход.

Софтуерният подход е обект на настоящата работа и се реализира чрез въвеждане на софтуерна компенсация на колебанието на захранващото налягане.

2.3 Изводи и констатации по Втора Глава

1. Разработен е стенд за изследване на регулатори на налягане с и без усилване. С разработения стенд е установено влиянието на променливото входно налягане и променливия дебит върху характеристиките на регулаторите.

2. Изследван е резултатът от промяната на характеристиките на регулаторите на налягане SMC AR20 и SMC IR 1000 върху метрологичните и експлоатационни характеристики на ПЕИС IBR-ae1:

2.1. Колебанието на входното налягане предизвиква грешка на показанието на уред IBR-ae1. При SMC AR20 тази грешка може да достигне до 3 μm , а при SMC IR 1000 - 1,3 μm .

2.2. Хистерезисът на регулаторите без усилване предизвиква грешка, която достига 2 μm , а при регулаторите с усилване 0,5 μm .

2.3. Промяната на характеристиките на регулаторите на налягане като функция на времето води до промяна на настройката, респективно до изместване на нулата на ПЕИС с до 8 μm при SMC AR20 и с до 6 μm при SMC IR 1000.

2.4. Колебанието на захранващото налягане променя настройката на ПЕИС и води до необходимост от поднастройка. Това усложнява експлоатацията и води до необходимост от високо квалифициран персонал.

Получените експериментални резултати доказват влиянието на регулаторите на налягане върху метрологичните и експлоатационни характеристики на ПЕИС. Това води до необходимостта от въвеждане на мерки за подобряването на тези характеристики.

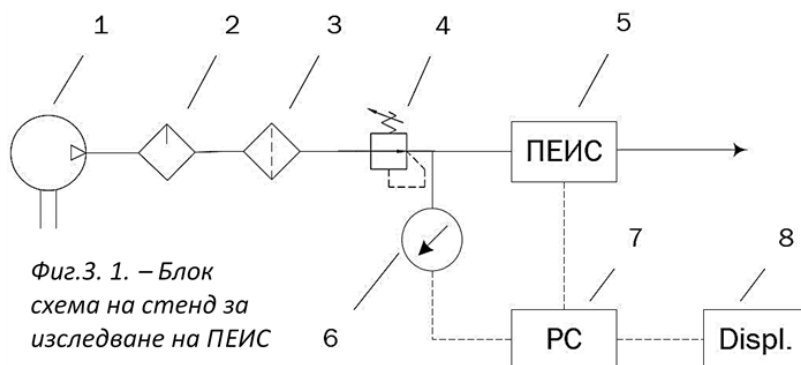
ГЛАВА 3

ПОДОБРЯВАНЕ НА МЕТРОЛОГИЧНИТЕ И ЕКСПЛОАТАЦИОННИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ПЕИС ЧРЕЗ ВЪВЕЖДАНЕ НА СОФТУЕРНА КОМПЕНСАЦИЯ

3.1 Стенд за снемане на характеристики на ПЕИС.

За подобряване на метрологичните и експлоатационни характеристики на ПЕИС е необходимо да се компенсира влиянието на колебанието на захранващото налягане чрез следене на стойностите на захранващото налягане и въвеждане на корекция на отчетената стойност на измерваната величина.

За изследване на основния влияещ фактор - колебанието на захранващото налягане - е използван стенд, блок схемата на който е представена на Фиг.3. 1.



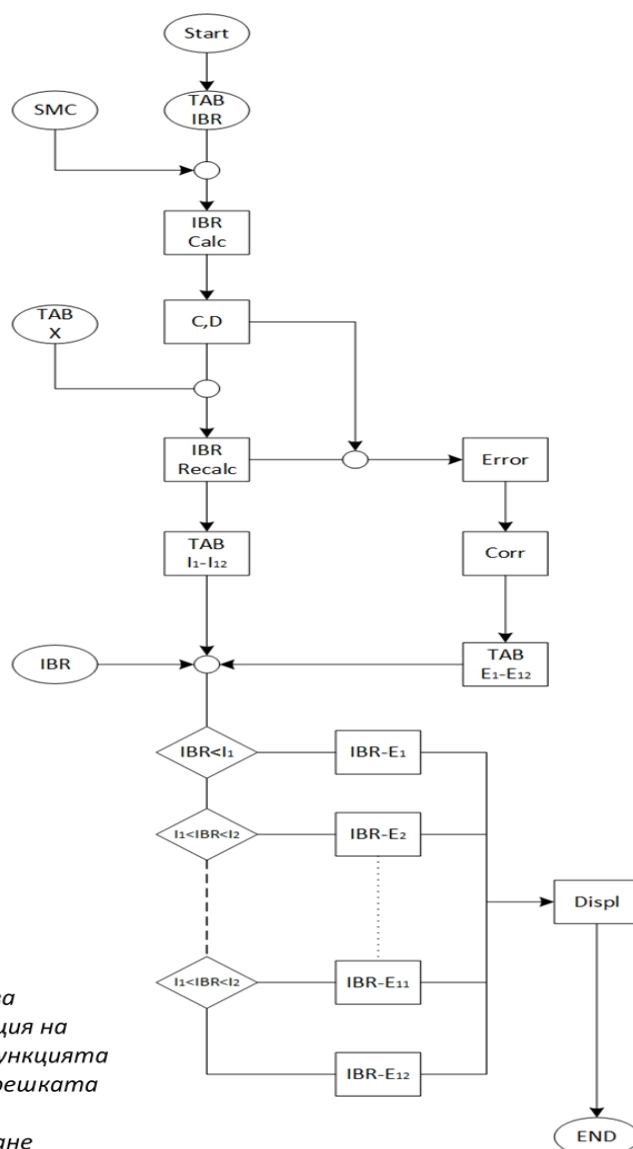
За реализация на софтуерна компенсация, като изходни данни се използват преобразователната характеристика на ПЕИС и семейство криви, получени при изследване на IBR-ae1 при различни стойности на захранващото налягане. Изведен е математически модел за апроксимация, на базата на който да бъде въведена компенсация от систематичен характер, позволяваща да се редуцира влиянието на колебанието на захранващото налягане на ПЕИС.

3.2 Подобряване на характеристиките на ПЕИС чрез използване на регресионен математически модел

За установяване зависимостта на влиянието на захранващото налягане върху функцията на преобразуване на ПЕИС е необходимо да се извърши регресионен анализ. Функцията на преобразуване е нелинейна, но е на лице линейна зависимост на промяната на захранващото налягане към промяната на входната величина.[20]

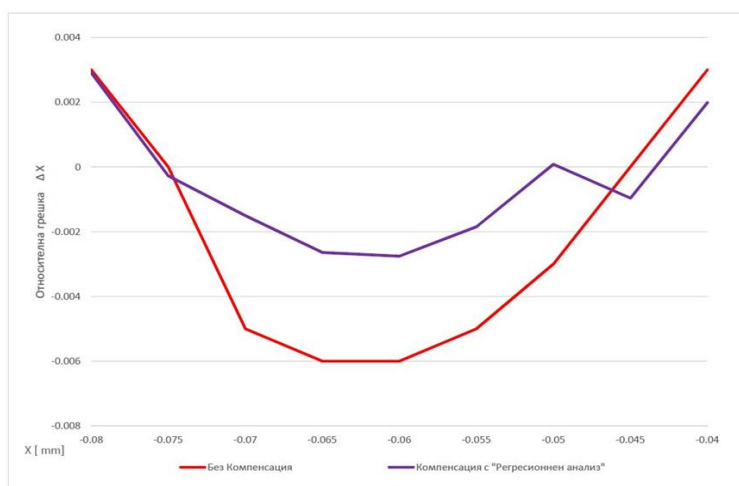
За определянето на регресионен модел използваме средни стойности, получени след експериментално сваляне на характеристиката на ПЕИС за различни стойности на входната величина (линейно преместване) при различно захранващо налягане. (Приложение 3)

За софтуерната реализация на коригиращите действия се използва математически алгоритъм, който се реализира с блок схема – Фиг.3. 3.



Фиг.3. 3 - Блок схема за софтуерна компенсация на нелинейността на функцията на преобразуване и грешката от колебанието на захранващото налягане

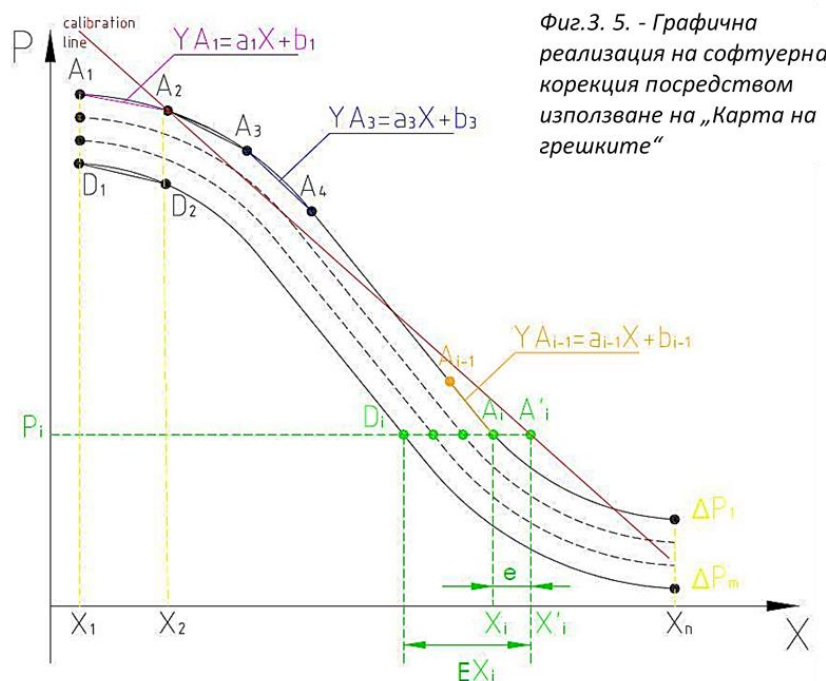
От графиката (Фиг.3. 4.) отчитаме относителната грешка ΔX , която без софтуерна компенсация варира от $-6 \mu\text{m}$ до $3 \mu\text{m}$. След въвеждането на софтуерна компенсация чрез регресионен анализ тази грешка е $\pm 3 \mu\text{m}$. Така повишаваме точността на измервателната система с до 33%.



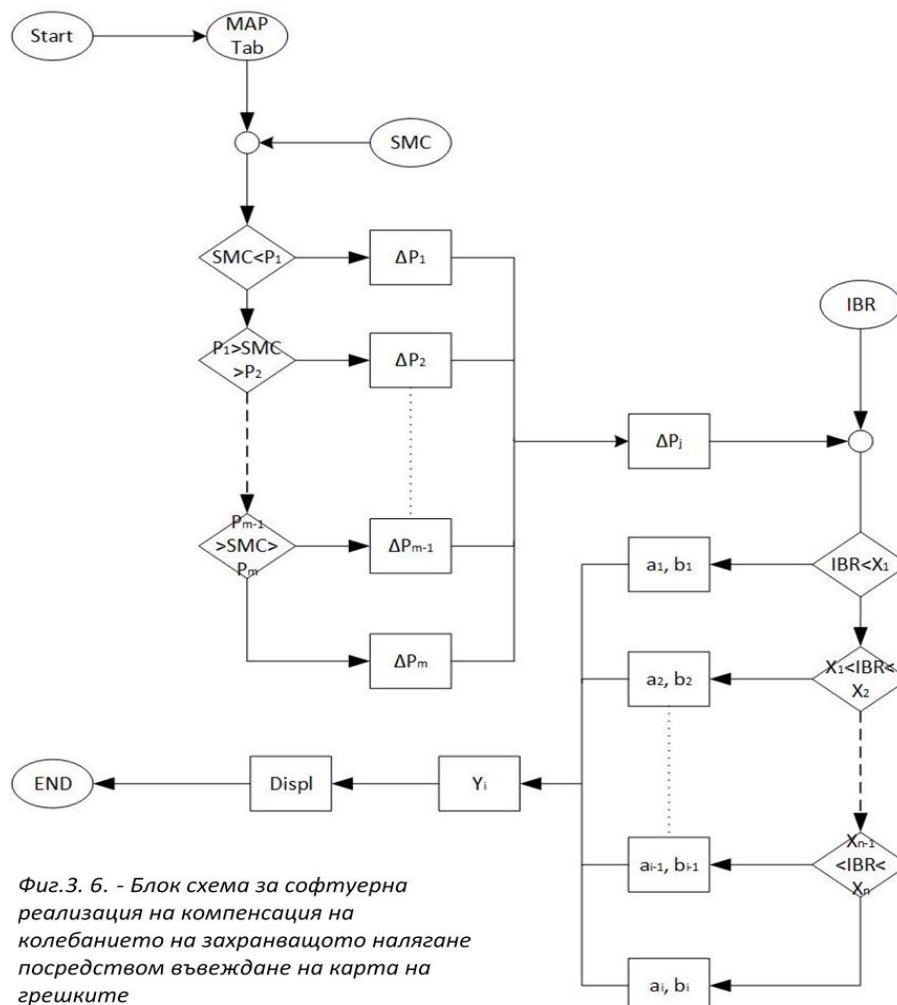
Фиг.3. 4. Графика на относителната грешка на IBR-ae-1 с и без софтуерна компенсация

* Посочените резултати са средноаритметични стойности от 5 измервания

3.3 Подобряване на характеристиките на ПЕИС чрез използване на „Карта на грешките“



Чрез „Карта на грешките“ се въвеждат корекции за фиксирана стойност от измервателния обхват посредством коригиране на грешката от нелинейност на ПЕИС.



Алгоритъмът за съставяне на „Карта на грешките“ изисква по-голям обем от експериментални данни в сравнение с този за приложение на Регресионен анализ, но при него се изключва грешката от линеализиране на преобразуващата крива на пневматичния преобразувател. (Фиг.3. 5.)

За реализацията на математическия модел са снети семейство от криви, съответстващи на преобразувателната характеристика на ПЕИС при различни стойности на захранващото налягане ($\Delta P_I \div \Delta P_m$). Този обхват е разделен на m интервала, в зависимост от разделителната способност на използвания дигитален манометър. За всяка стойност на входната величина X_i от измервателния обхват ($X_I - X_n$) е въведена корекция. Преобразувателната характеристика е разделена на n интервала, като n съответства на интерполационните интервали на линеаризация на преобразувателната характеристика. Чрез намаляване или увеличаване на n може да променяме точността на измерване в зависимост от изискванията. Така съставената таблица от $n*m$ стойности (MAP Tab) позволява да бъде внесена корекция за всяка една стойност на X . За софтуерната реализация на математическия модел е използвана блок схемата на Фиг.3. 6.



Фиг.3. 7. Графика на относителната грешка на IBR-ae-1 без софтуерна компенсация и след въвеждането на компенсация чрез регресионен анализ и след въвеждането на „карта на грешките“

* Посочените резултати са средноаритметични стойности от 5 измервания

След въвеждането на софтуерната компенсация по двата метода - чрез регресионен анализ и чрез „карта на грешките“ е получена графиката на относителната грешка ПЕИС.

След прилагането на методиката за компенсация чрез „карта на грешките“, точността на IBR-ae1 е подобрена, като е получена максимална грешка $\pm 1 \mu m$ за избрания измервателен диапазон.

3.4 Подобряване на характеристиките на ПЕИС чрез използване на вградения в тях микроконтролер.

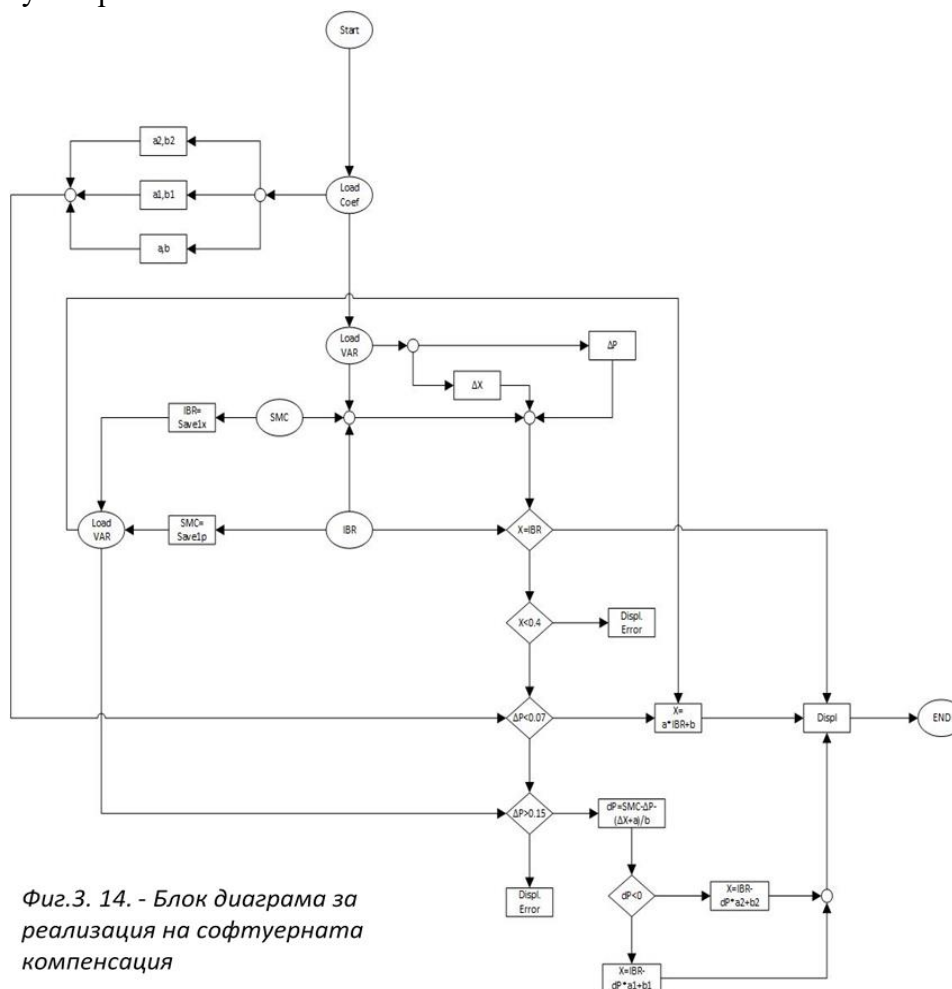
За оптимизиране на софтуерната компенсация е използван вградения в ПЕИС микроконтролер, чрез който се въвеждат референтните стойности (реализирани чрез физически еталони) за калибриране на уреда. Това позволява да бъде унифициран и опростен софтуерът за компенсация при приложение с различни ПЕИС, имащи възможност за връзка с

компютър. При компенсацията с микроконтролера не се променят заводските характеристики на ПЕИС.

За реализацията на методиката за софтуерна компенсация чрез използването на вградения в ПЕИС микроконтролер е използвана блок схемата на Фиг.3. 14. За калибрирането на уреда е необходимо да бъдат отчетени и записани в паметта на софтуера моментните стойности на захранващото налягане и на ПЕИС. Тези стойности се използват като репер, спрямо който е отчетено диференциалното изменение на параметрите на системата. [63]

За оценка на приложението на уреда е използвана методиката MSA (Виж глава 4.1. Анализ на измервателни системи (MSA))

Наличието на дигитален манометър за следене на захранващото налягане в комбинация с обикновен регулатор на налягане дава резултати, които са по-добри от получените с прецизен регулатор на налягане.



Фиг.3. 14. - Блок диаграма за реализация на софтуерната компенсация

3.5 Калибриране и настройка на ПЕИС

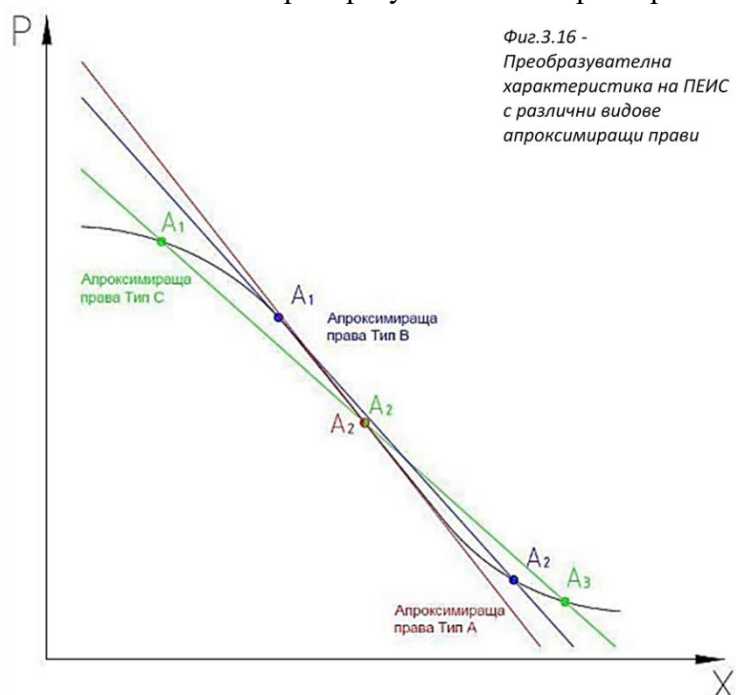
За настройка на ПЕИС се използват атестирани образци с известни размери (най-често два - за определяне на долна и горна граница), чиято стойност се въвежда по дискретен начин в системата. Тази информация се използва за изчисляване чувствителността на системата.

Съвременните ПЕИС позволяват настройка да се извършва с един, два или три еталонни образци с и без регулиране на сечението на входната дюза. [108]

Пневматичните параметри на системата са избрани така, че да осигурят характеристика с максимален линеен участък. На практика това означава, че сложните настройки на

класическите пневматични уреди отпадат. По този начин максимално се опростява обслужването им. Това дава възможност да се работи с налична измервателна екипировка, като се обновяват само старите отчитащи уреди със съвременни такива. Износването на екипировката също се компенсира само с автоматичната настройка на системата. [33,63]

Съобразно използваната инструментална екипировка и използваните референтни елементи се прилага алгоритъм за калибриране въз основа на реалния вид на статичната преобразователна характеристика, която е симетрична спрямо “нулата” (средната хлабина) и има “S-образна” форма. За този тип характеристика калибрирането е препоръчително да се извърши чрез прекарване на апроксимираща права с ъглов коефициент, определен от референтни стойности на точки от преобразователната характеристика на ПЕИС.



Възможностите за калибриране на ПЕИС са илюстрирани на Фиг.3. 16. Показани са три случая на прекарване на апроксимиращи прави при различен брой точки за калибриране.

3.6 Алгоритъм за автоматично калибриране на ПЕИС

За подобряване на метрологичните и експлоатационни характеристики на ПЕИС е необходимо да се опрости методиката за настройка и калибриране, за да се намали субективната грешка. За опростяване методиката на настройка на ПЕИС е възможно използването на успореден клон за настройка. Въвеждат се известни стойности/налягания, които служат за референтни елементи, чрез които се извършва софтуерна компенсация. По този начин след първоначална настройка на измервателната екипировка се намалява субективното влияние на оператора при периодичното поднастриване в процеса на работа с ПЕИС.[8,33]

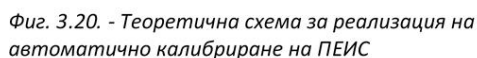
С цел подобряване процеса на настройка и калибриране е разработена принципна схема за автоматично настройване (Фиг. 3.20), реализирана чрез диференциално свързване на два успоредни клона - B_1 (Измервателен клон) и B_2 (Клон за автоматична настройка).

При започване на настройка на системата се използват три референтни стойности (Еталона)- G_1, G_2 и G_3 . Първоначално диаметърът на входната дюза $d_1 = \text{const}$.

За да бъде оценено влиянието на промяната на входното налягане (P_m) върху преобразователната характеристика на системата, т.е. $Y=f(P_m)$, се променя P_m , при което се получават различни функции на преобразуване и се определят новите коефициентите на регресия: a_2 и b_2 .

Получават се три регресионни уравнения, отчитащи променливите в системата: инструментална екипировка, хранително налягане и нелинейност на преобразователната характеристика.

Чрез G_1, G_2 и G_3 и с промяна сечението на d_1 се получава преобразователна характеристика по метода на най-малките квадрати и с минимална нелинейност.



След първоначално калибриране на уреда за работа с избраната инструментална екипировка, операторът няма влияние върху процеса на измерване и върху процесите за поднастройване.

3.7 Изводи и констатации по Глава 3

1. Разработен е стенд за снемане на характеристиките на ПЕИС. Въз основата на получените резултати са установени зависимости, позволяващи въвеждането на софтуерна компенсация на грешката на показанието на ПЕИС.

2. Разработени са два алгоритъма за софтуерна компенсация, чрез които се подобряват метрологичните и експлоатационни характеристики на ПЕИС:

2.1. Разработен е регресионен математически модел за компенсиране на колебанието на захранващото налягане на ПЕИС. Моделът се използва за реализация на софтуерно подобряване на метрологичните и експлоатационни характеристики на ПЕИС, при което повишаваме точността с до 33%.

2.2. Разработен е математически модел, при който колебанието на захранващото налягане се компенсира чрез въвеждане на „Карта на грешките“. За реализация на методиката за софтуерна компенсация е съставена таблица, отразяваща „картата на грешките“ в избрания измервателен интервал. В резултат от приложението на методиката повишаваме точността на ПЕИС IBR-ae1 до два пъти спрямо методиката чрез регресионен модел и до четири пъти спрямо фирмената характеристика на уреда.

3. Разработен е математически модел за подобряване на характеристиките на ПЕИС чрез използване на вградения в тях микроконтролер. На основата на модела е разработен алгоритъм, който е реализиран чрез компютърно базиран софтуер.

4. Разгледани и систематизирани са различни методи за настройка и калибриране на ПЕИС. За подобряване процеса на калибриране са разработени алгоритъм и принципна схема за реализация на автоматична настройка и калибриране. След първоначално калибриране на уреда за работа с избраната инструментална екипировка операторът няма влияние върху процеса на измерване и върху процесите за поднастройване.

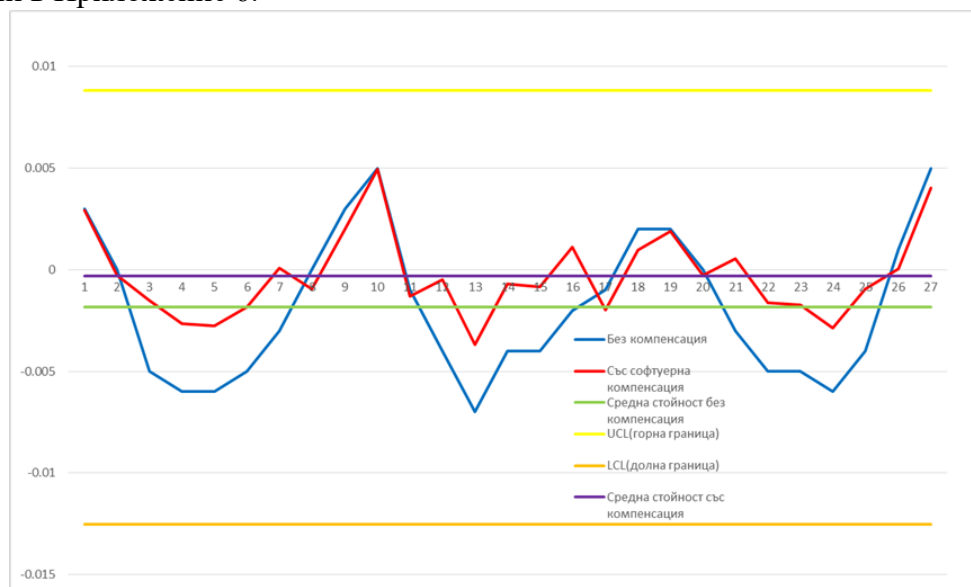
ГЛАВА 4

ЕКСПЛОАТАЦИОННА ОЦЕНКА НА ПОДОБРЕНИЯТА НА ПЕИС

4.1 Оценка на ПЕИС чрез MSA

За доказване на ефикасността на предложените подобрения във връзка с приложението им в ПЕИС е необходимо резултатите от въвеждането на софтуер за компенсация на грешките да бъдат оценени. За целта е приложен един от основните инструменти за осигуряване на качеството при измерване и контрол – методологията „Анализ на измервателни системи“ MSA (Measurement System Analysis). Чрез нея може да се даде адекватна оценка за измервателните възможности на ПЕИС и ефективността на въведените подобрения. При изследването на ПЕИС за определяне на коефициентите за въвеждане на софтуерна компенсация и калибриране се получава информация, която може да се използва за приложение на MSA.

Методът C_k / C_{kk} е аналогичен на оценката на стабилността и настройката на процеса чрез коефициентите на потенциална възможност C_p и C_{pk} . На Фиг.4. 2. е показано приложението на Метода C_k / C_{kk} [67] при ПЕИС с и без софтуерна компенсация. Данните показват намаляване на разсейването на резултатите с $4 \mu m$ след прилагане на софтуерна компенсация. При ПЕИС без софтуерна компенсация центърът на групиране на резултатите е изместен с $1 \mu m$, а след използването на софтуерна компенсация практически съвпада с центъра на допусковото поле. За приложението на методиката са използвани данни представени в Приложение 6.



Фиг.4. 2. Графики от приложението на SPC при ПЕИС със и без софтуерна

За оценяване влиянието на различните условия на контрол, например на различни контрольори върху резултатите, е проведено изследване върху извадка от изделия с обем n . Извадката се контролира от няколко контрольора. От получените резултати се определят показателите “повтаряемост” EV (Equipment Variation) и “възпроизводимост” AV (Appraiser Variation): [11]

За да се оцени изменението на захранващото налягане като функция на времето $p(t)$ е необходимо да се определи времеви диапазон за извършване на измервания от различните оператори.[60,88]

Получените резултати от приложението на адаптираната методика MSA при използването на IBR-ae1 с и без софтуерна компенсация на резултатите са представени в Табл.4. 5. Повторяемостта на системата EV се подобрява с 12%. Много по-значимо е подобрението при коефициента AV, който отразява възможността за запазване във времето на настройките. AV практически става нула, поради обратна връзка, която получаваме от дигиталния манометър, намалявайки влиянието на оператора като субективен фактор на настройка и периодична проверка на системата. Въвеждането на софтуерна компенсация води до повишаване на повторяемостта и възпроизводимостта на системата GRR с 35%

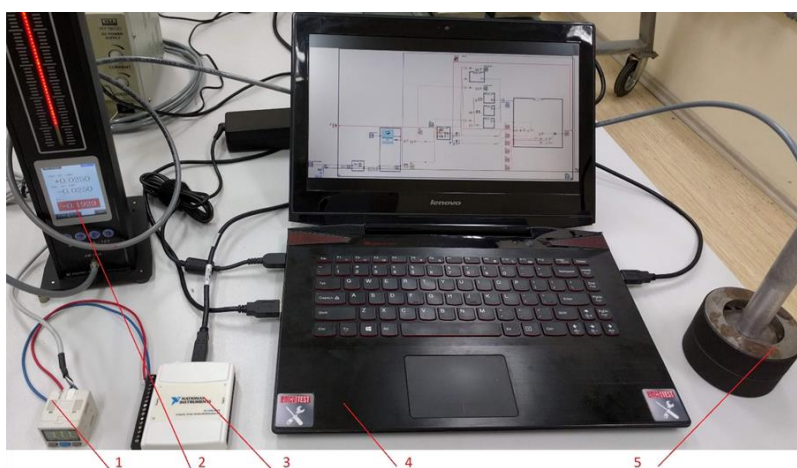
Коефициенти	Без софтуерна компенсация	Със софтуерна компенсация
EV	12,05	10,63
AV	11,3	0
GRR	16,52	10,63

Табл.4. 5. - Коефициенти от приложение на MSA при IBR-ae1 с и без приложение на софтуерна компенсация

За оценка на възможностите на измервателната система може да се използва и методологията ANOVA.(Таб.4. 6.). При оценка на вариацията на системата отново се наблюдава тенденция за подобряване на коефициентите за повтаряемост (EV), възпроизводимост (AV) и повтаряемост и възпроизводимост (GRR)

При оценка на допусковите полета спрямо измервателното средство получаваме подобрение, което се изразява качествено в преминаване на ПЕИС от състояние „Условно приемлива“(gage system may be acceptable) в състояние „Съответствие“(gage system OK).[98]

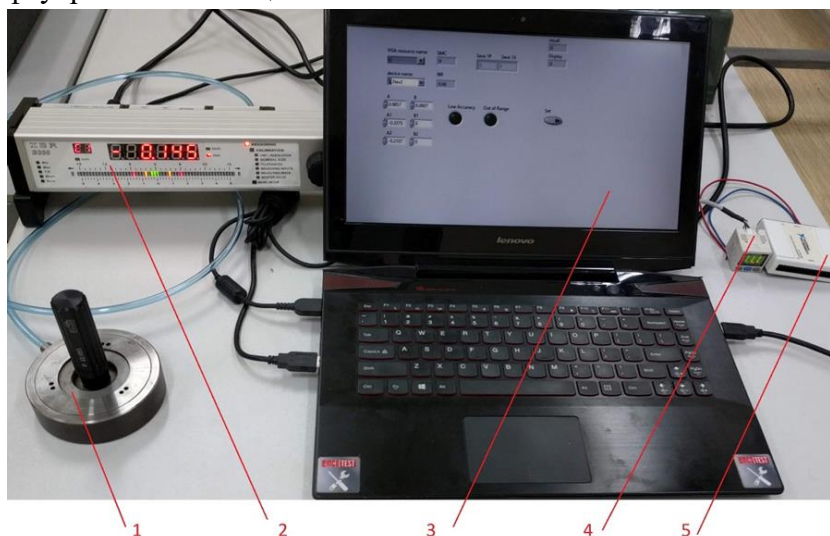
4.2 Приложение на софтуерна компенсация при различни ПЕИС



Фиг.4. 5. - Стенд за изследване на ПЕИС: 1. Дигитален манометър; 2. Dong-Do ML1 CT; 3. Аналогово-цифров преобразувател; 4. РС; 5. Инструментална екипировка.

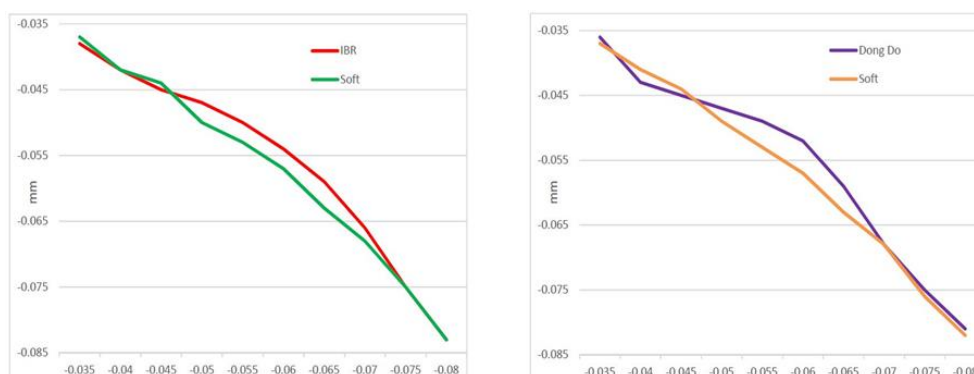
За оценяване възможностите на разработения алгоритъм е необходимо да се оцени ефекта от въвеждането му при различни ПЕИС. За целта е необходимо сравнение на резултатите, които са получени при измерване чрез IBR ae-1 (реализирана опитна установка

на Фиг.4. 5) и Dong-Do ML-1 СТ(реализирана опитна установка на Фиг.4. 6) преди и след въвеждане на софтуерна компенсация.



Фиг.4. 6. - Стенд за изследване на ПИС: 1.Инструментална екипировка; 2. IBR ae-1; 3. Пулт за управление на софтуера; 4. Дигитален манометър; 5. АЦП.

На Фиг.4. 7. са изобразени преобразователните характеристика на уредите IBR ae-1 и Dong-do ML1 СТ преди и след въвеждане на софтуерна компенсация. И при двата ПЕИС се наблюдава подобрене, за което свидетелства видът на характеристиката, който след въвеждането на софтуерна компенсация е по-близък до линеен. Това води до намаляване на грешката от поднастройка и грешката от колебанието на захранващото налягане с до 50% в краищата на изследвания интервал на промяна на входната величина. [58,63]



Фиг.4. 7. - Сравнителни графика на преобразователната характеристика на IBR ae-1 и Dong-Do ML1 СТ преди и след въвеждане на софтуерна компенсация

Максималната грешка при IBR ae-1 преди въвеждане на софтуерната компенсация е 6 μm и се намалява до 3 μm след компенсация. Максималната грешка при Dong-do ML1 СТ преди въвеждане на софтуерната компенсация е 8 μm и се намалява до 3 μm след компенсация.

Това показва, че ефикасността на методиката е съпоставима и софтуерната компенсация е оправдана за приложение при различни ПЕИС.

За оценка на експлоатационните възможности на системата се прилага адаптираната методика MSA. Повторяемостта на системата EV се подобрява с 8,5%, AV практически клони към нула - 0,16, поради обратна връзка, която получаваме от дигиталния манометър. В резултат на това е получено подобрене с 99,3 %.

И при двата изследвани ПЕИС се наблюдават сходни стойности на коефициентите за оценка на експлоатационните възможности (Табл.4 9.), което свидетелства за универсалността на методологията за софтуерна компенсация на грешките.

4.3 Аprobация

Апробацията на системата в реални производствени условия е проведена в две индустриални предприятия „Спарки Елтос” АД и „М+С Хидравлик” АД. За целите на апробацията в двете предприятия е извършен контрол на серия от 100 броя детайли.

При използване на разработената методика за подобряване на метрологичните и експлоатационни характеристики са установени експлоатационни подобрения, свързани с по-големи интервали на поднастройка на уреда, като в рамките на една работна смяна (8ч.) не се налага поднастройване, защото се запазват зададените настройки.

За проверка на повторемостта 10 детайла са измерени 3 пъти – в началото, в средата и в края на работната смяна (през 4 часа). Резултатите са обработени по стандартната методика MSA, IATF 16949 (Приложение 11)

4.4 Изводи и констатации по Глава 4

1. За оценка на експлоатационните възможности на разработения софтуер за компенсация на грешките на ПЕИС е приложена методологията MSA. Сравнени са резултатите за IBR-ae1 с и без използване на софтуерна компенсация.

1.1. Посредством определяне на коефициентите S_k/S_{kk} е извършена оценка на стабилността и настройката на измервателната система. При приложение на софтуерна компенсация разсейването на резултатите се подобрява с 28%, а настройката с 85%.

1.2. След приложение на методиката MSA е определена повторемостта и възпроизводимостта на въведената софтуерна компенсация на грешката. Получено е подобрение с 36%

1.3. При дисперсионен анализ на вариацията на системата (ANOVA) е получена качествена оценка, при която системата преминава от „Условно приемлива“ (gage system may be acceptable) при IBR-ae1 в състояние „Съответствие“ (gage system OK) след приложение на софтуерна компенсация на грешката.

2. Извършена е оценка на възможностите за приложение на разработения софтуер за компенсация на грешките при различни ПЕИС. Резултатите при ПЕИС IBR-ae1 и Don-Do ML-1 CT са аналогични.

2.1. Постигнато е намаляване на грешката от колебанието на хранващото налягане с до 50% в краищата на изследвания интервал.

2.2. След приложение на методиката MSA определяме повторемостта и възпроизводимостта на въведената софтуерна компенсация на грешката, като получаваме подобрение с 62%.

3. За проверка на приложимостта на разработената методика за подобряване на метрологичните и експлоатационни характеристики на ПЕИС в индустриални условия е извършена апробация в две индустриални предприятия и са установени експлоатационни подобрения, свързани с по-големи интервали на поднастройка на уреда, поради запазване на зададените настройки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамките на дисертационния труд са решени поставените задачи, свързани с постигането на основната цел на работата, а именно:

1. Изследвани и анализирани са основните фактори на влияние върху метрологичните и експлоатационни характеристики на ПЕИС:

1.1. Разработен е стенд за изследване влиянието на колебанията на захранващото налягане върху характеристиките на ПЕИС. Проведените са експерименти, резултатите от които са обработени и представени в работата;

1.2. На база получените експериментални резултати са формулирани изводи, свързани с влиянието на регулаторите на налягане върху метрологичните и експлоатационни характеристики на ПЕИС;

1.3. Обоснована е необходимостта от предприемане на мерки за оптимизиране на тези характеристики.

2. Разработени са софтуерни решения за подобряване на метрологичните и експлоатационни характеристики на ПЕИС:

2.1. Разработен е стенд за снемане на характеристиките на ПЕИС. Въз основата на получените резултати са установени зависимости, явяващи се аргумент за въвеждането на софтуерна компенсация на грешката на показанието на ПЕИС.

2.2. Разработен е алгоритъм за софтуерна компенсация, чрез който се подобряват метрологичните и експлоатационни характеристики на ПЕИС посредством използване на регресионен математически модел за компенсиране на колебанието на захранващото налягане на ПЕИС.

2.3. Разработен е алгоритъм за софтуерна компенсация, чрез който се подобряват метрологичните и експлоатационни характеристики на ПЕИС посредством приложение на математически модел, при който колебанието на захранващото налягане се компенсира с въвеждане на „Карта на грешките“.

2.4. Разработен е математически модел за подобряване на характеристиките на ПЕИС чрез използване на вграден микроконтролер. На основата на модела е разработен алгоритъм и е реализиран чрез компютърно базиран софтуер.

2.5. Разгледани и систематизирани са различни методи за настройка и калибриране на ПЕИС. За подобряване процеса на калибриране са разработени алгоритъм и принципна схема за реализация на автоматично калибриране. С това се изключва влиянието на оператора върху процеса на измерване и върху процесите за прекалибриране след първоначално калибриране на уреда за работа с избраната инструментална екипировка.

3. Оценени са експлоатационните възможности на разработения софтуер за компенсация на грешките на ПЕИС чрез прилагане на методологията MSA.

3.1. Експериментално са получени и сравнени резултатите за оценка на стабилността и настройката на измервателната система IBR-ae1 с и без използване на софтуерна компенсация посредством определяне на коефициентите S_k/S_{kk} .

3.2. Приложена е методологията MSA за оценка на повторемостта и възпроизводимостта на ПЕИС с въведена софтуерна компенсация на грешката. Приложени са два метода за оценка R&R и ANOVA.

3.3. Извършена е оценка на възможностите за приложение на разработения софтуер за компенсация на грешките при различни ПЕИС. Резултатите при ПЕИС IBR-ae1 и Don-Do ML-1 CT са аналогични.

Резултатите от изследванията на предложените в работата решения доказват подобряване на метрологичните и експлоатационни характеристики на ПЕИС и тяхната универсална приложимост при различни измервателни средства.

ПРИНОСИ

Основните приноси в дисертационния труд се изразяват в следните научно-приложни и приложни приноси.

Научно-приложни приноси:

- ❑ *Подобряване на метрологичните характеристики на ПЕИС посредством въвеждане на софтуерна компенсация на грешките, предизвикани от колебанието на захранващото налягане.*
- ❑ *Подобряване на експлоатационните характеристики на ПЕИС - настройка и стабилност, посредством въвеждане на софтуерна компенсация.*

Приложни приноси:

- ❑ *Разработени са три алгоритъма за софтуерна компенсация, чрез които се подобряват метрологичните и експлоатационни характеристики на ПЕИС.*
- ❑ *Разработени са алгоритъм и принципна схема за реализация на автоматична настройка и калибриране.*
- ❑ *Оценени са експлоатационните възможности на разработения софтуер за компенсация на грешките на ПЕИС чрез прилагане на методологията MSA.*

ПУБЛИКАЦИИ ПО ДИСЕРТАЦИЯТА

1. Dukendjiev Georgi, Miroslav Hristov, Status and Development of air -electronic gauges, Сборник с доклади на XXV Научен симпозиум с международно участие "Метрология и метрологично осигуряване 2016", Созопол, 2016, с.501-508,

ISSN 1313-9126

2.Hristov Miroslav, Georgi Dukendjiev, RESEARCH ON AIR-ELECTRONIC GAUGES AND METHODS FOR ELIMINATION OF INFLUENCING FACTORS, Сборник с доклади на XXV Научен симпозиум с международно участие "Метрология и метрологично осигуряване 2017", Созопол, 2017, с.86-90,

ISSN 1313-9126

3. Miroslav H. Hristov, Velizar A. Vassilev, Georgi K. Dukendjiev, SOFTWARE IMPROVEMENTS OF THE ACCURACY IN THE AIR- ELECTRONIC MEASUREMENT SYSTEMS FOR GEOMETRICAL DIMENSIONS, World Academy of Science, Engineering and Technology, International Science Index 139, International Journal of Computer, Electrical, Automation, Control and Information Engineering, 12(7), 492 - 496,

eISSN:1307-6892

4.Hristov Miroslav, IMPROVEMENT OF METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF AIR GAUGE SYSTEMS FOR LINEAR DIMENSIONS, International Journal of Innovations in Engineering and Technology (IJJET), Volume 10 Issue 1 April 2018, p. 69, <http://dx.doi.org/10.21172/ijiet.101.10>

ISSN: 2319-1058

5. Hristov Miroslav, Dukendjiev Georgi, Vassilev Velizar, Study and evaluation of Air-electronic gauges via Methodology MSA, доклад на XXIX International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance 2019, 6-10 September, Приет за публикуване в IEEE Xplore Digital Library

6. Мирослав Христов, Велизар Василев, Автоматична настройка и калибриране на пневмо-електронни измервателни средства, Българско списание за инженерно проектиране, брой 40, октомври 2019.

ISSN: 1313-7530

Optimization of metrological and operational characteristics of air-electronic gauges for linear dimensions

Abstract:

The development of the technology aims to increase productivity and reduce the negative impact of humans on quality. For contactless measurements of geometric dimensions with relatively narrow tolerance in mass production, air-electronic gauges (AEG) have found wide application. They are characterized by high reliability, simple construction and easy maintenance. The disadvantages of AEG can be reduced by introducing software compensation for the influencing factors.

An analysis of the metrological and operational characteristics of the AEG has been performed. The main factors of influence are studied and analyzed. A test bench has been developed to investigate the effect of fluctuations in supply pressure on the characteristics of AEG. Based on the obtained results, mathematical models for software compensation were developed through the application of: regression mathematical model, "Error map" and using the built-in AEG microcontroller. Based on the latter model, an algorithm was developed and implemented with computer-based software.

Various methods for setting up and calibrating of AEG have been reviewed and systematized. To improve the calibration process, an algorithm and a schematic diagram have been developed for the implementation of automatic setting up and calibration.

The operational capabilities of the developed software for error compensation of AEG have been evaluated by MSA methodology. An assessment of the possibilities for application of the developed software for error compensation in different AEG has been performed. The results for the AEG type IBR-ae1 and Don-Do ML-1 CT are similar.

The metrological and operational characteristics of AEG have been improved by introducing software compensation for errors caused by fluctuations in supply pressure.