

**МИННО – ГЕОЛОЖКИ УНИВЕРСИТЕТ „СВ. И. РИЛСКИ“**

**КАТЕДРА “АВТОМАТИЗАЦИЯ НА ПРОИЗВОДСТВЕНИ СИСТЕМИ”**

**маг. инж. Володя Владимиров Джаров**

**АВТОМАТИЗИРАНО УПРАВЛЕНИЕ НА ЕЛЕКТРОННО – ЛЪЧЕВА  
ИНСТАЛАЦИЯ ЗА ПОВЪРХНОСТНА МОДИФИКАЦИЯ,  
ЛИТОГРАФИЯ И ЗАВАРЯВАНЕ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

на дисертация за присъждане на образователна и научна степен

„ДОКТОР“

Област на висше образование 5. Технически науки

П. Н. 5.2 ЕЛЕКТРОТЕХНИКА, ЕЛЕКТРОНИКА И АВТОМАТИКА

**Научен ръководител:**

доц. д-р Я. Горбунов

**СОФИЯ**

**2023**

**Дисертационният труд** е обсъден и насрочен за защита от разширен Катедрен състав на катедра „Автоматизация на производствени системи“ на Факултет „Минно електромеханичен“ към Минно-геоложки университет – София на 06.02.2023 Г., съгласно Ректорска заповед № Р-87 от 31.01.2023 г.

**Публичната защита на дисертационния труд** ще се състои пред Научно жури, утвърдено със заповед № Р- 177 от 27.02.2023 т. на Ректора на МГУ „Св. Иван Рилски“ и ще се проведе на 11. Май. 2023 г. от 13.00 часа в зала 122 на „Минно електромеханичен“ факултет, МГУ „Св. Иван Рилски“, София.

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Сектор „Следдипломна квалификация“ на МГУ „Св. Иван Рилски“, Ректорат, ет. 3, стая № 79, тел. 02/ 80 60 209..

**Утвърденото Научно жури е в състав:**

1. доц. д-р Илиян Илиев – председател
2. Проф. д-р Васил Димитров външен;
3. Проф. д-р Ивайло Стоянов външен;
4. доц. д-р Орлин Петров външен;
5. доц. д-р Христо Ибришимов външен;

**Резервни членове:**

2. доц. д-р Мила Илиева - Обретенова вътрешен;
3. Проф. д-р Иван Евстатиев външен;

**РЕЦЕНЗЕНТИ:**

1. Проф. д-р Васил Димитров
2. Проф. д-р Ивайло Стоянов

Дисертантът е докторант на самостоятелна подготовка към катедра „Автоматизация на производствени системи“ на факултет „Минно електромеханичен“.

Автор: Володя Владимиров Джаров

Е-mail: volodya.dzharov@mgu.bg

Заглавие: „АВТОМАТИЗИРАНО УПРАВЛЕНИЕ НА ЕЛЕКТРОННО - ЛЪЧЕВА ИНСТАЛАЦИЯ ЗА ПОВЪРХНОСТНА МОДИФИКАЦИЯ, ЛИТОГРАФИЯ И ЗАВАРЯВАНЕ“

**Благодарност:** *Изказвам признателност, уважение и благодарност към научният ми ръководител за ценните указания, съвети и практически препоръки при създаването на настоящата дисертация, а също и за всестранныя подкрепа и съдействие в преодоляване на затрудненията от най-различен характер.*

### **Апробация на работата**

Резултатите от работата в дисертационния труд са представени на следните конференции и научни форуми:

1. Национална научно – техническа конференция с международно участие „АВТОМАТИЗАЦИЯ В МИННАТА ИНДУСТРИЯ И МЕТАЛУРГИЯТА “БУЛКАМК’22, 27 - 28 октомври 2022 Национален дом на науката и техниката гр. София, ул. “Г. С. Раковски” № 108;

2. 13<sup>та</sup> международна конференция по електронно-лъчеви технологии ЕБТ2018, 18 – 22 юни 2018, Варна, България;

3. Международна научна конференция, “High technologies. Business. Society 2016” 14-17 Март 2016 г., Боровец, България.

### **Публикации**

Основни постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в 5 статии, от които 1 самостоятелна. Публикациите могат да бъдат намерени в Scopus и Google Scholar.

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

Дисертационния труд е в обем от 146 стр., структуриран е в 5 глави, 74 фигури, 25 таблици, 119 заглавия на литературни източници от които 10 на кирилица и 109 на латиница. В автореферата номерацията на фигурите, таблиците и формулите съответства на тази от дисертационния труд.

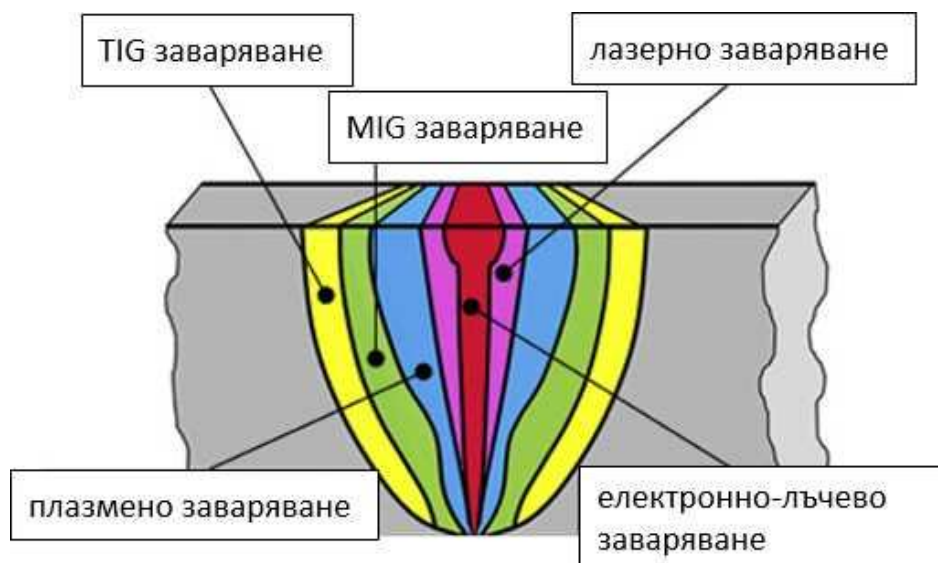
Навсякъде в дисертационния труд основните термини и определения са представени с техните съкращения и обозначения и са изнесени в отделна страница в началото на дисертацията.

## Глава 1. Перспективи за развитие на електроннолъчевите технологии

### 1.1. Постановка на задачата и избрани методи за решаване

#### 1.1.1. Актуалност

*Електроннолъчевите технологии (ЕЛТ) и инсталациите за тяхното осъществяване* са високотехнологични, екологични и ресурсоспестяващи методи за заваряване, изпарение, отлагане на тънки слоеве и покрития, повърхностна модификация, литография, топене и рафиниране на метали и техните сплави, в това число трудно топими. Те намират широко приложение в различни области на индустрията, както в производството, така и при преработката на метални отпадъци. *Електроннолъчевите процеси* се развиват през годините в гъвкави и икономични производствени инструменти [39, 68, 70, 103, 57, 116, 62], внедрени в множество индустрии като автомобилната, военната, авиационната, здравната и др. Взаимодействието на *електронния лъч* с материали се използва при процесите заваряване, топене и рафиниране, изработване на 3D структури чрез селективно топене на атомизирани метални прахове или чрез отлагане на разтопен материал, изпаряване и отлагане на тънки филми, литография, пробиване, рязане, втвърдяване, модификация на повърхността и микрообработка. Процесите обикновено протичат във висок вакуум, което не позволява нагрятия и разтопен материал да се окислява и да взаимодейства със замърсяванията в атмосферата, като по този начин дава възможност за обработка на реактивни метали и техните сплави (титан и др.). Друго предимство е високата плътност на мощност на електронния лъч, която позволява обработка на огнеупорни метали и сплави (като волфрам, молибден, ниобий и др.). Благодарение на дълбокото проникване в детайла, електронният лъч е в състояние да генерира дълбоки и тесни заваръчни шевове с минимална термично повлияна зона и без използването на допълнителни заваръчни консумативи (Фиг. 1.1).



Фиг. 1.1. Геометрия на челно съединение, направено с помощта на различни заваръчни технологии

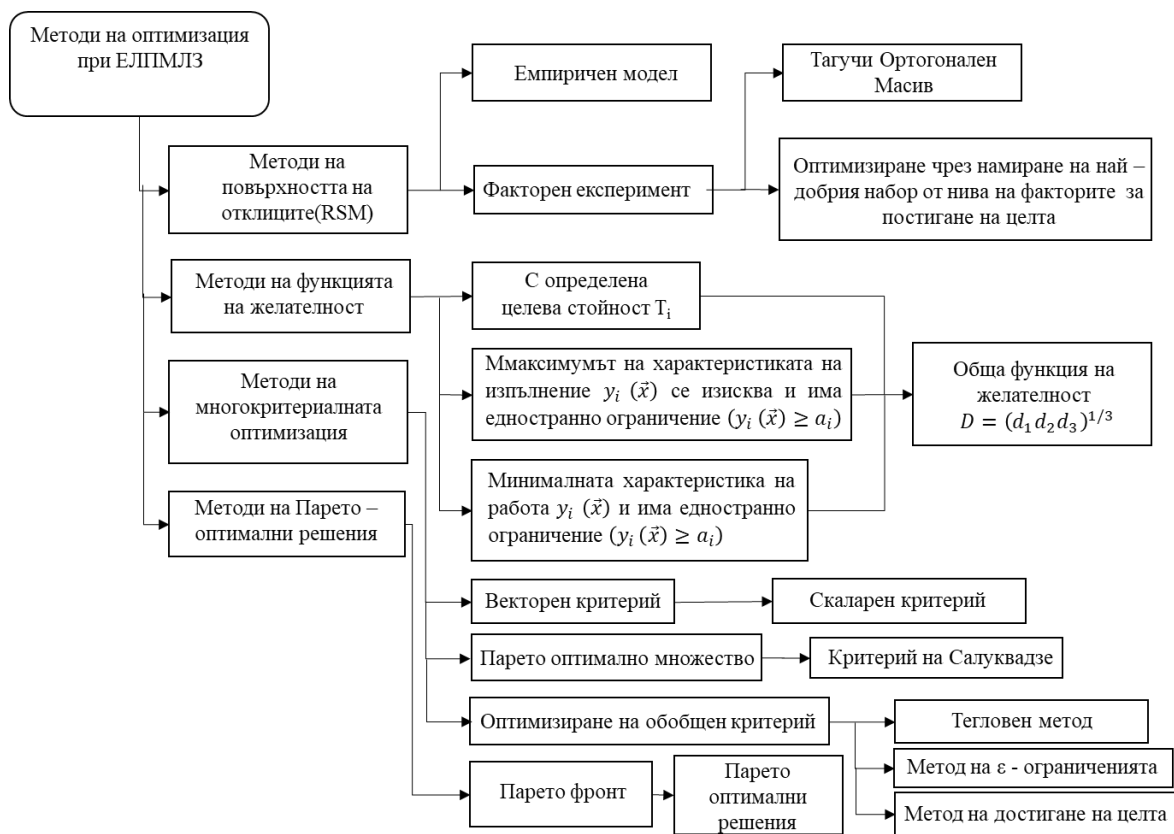
Геометрията на течната вана [102, 62] и термично повлияната зона, както и появата на дефекти [61, 19] и промяната на структурата и механичните свойства [55, 58, 56, 25] на заварените образци зависят от голям брой параметри, описващи обработения материал, характеристиките на оборудването и самия технологичен процес.

*Оборудването на инсталациите за електронно лъчево заваряване, изпаряване и повърхностна модификация на материалите (ИЕЛЗИПММ)* за осъществяване на взаимодействието на лъч от ускорени електрони с материали и за достигане на необходимото ниво на вакуум във вакуумната камера се използват ротационни, дифузионни и турбомолекулярни помпи. В [62] са анализирани експерименталните резултати и модели за налягането в зависимост от времето и геометричните характеристики на вакуумната камера и тръбните връзки с наличните помпи, както и характеристиките на помпите се оценяват и проверяват за режимите на пускане и спиране на инсталацията.

### 1.1.2. Оптимизационни методи при ЕЛТ

В Глава 1 са разгледани различни методи за намирането на оптимални стойности на управляемите фактори, които могат да бъдат приложени при оптимизирането на процесите при ЕЛПМЛЗ. Целта за оптимизиране на процесите, осъществявани при ЕЛПМЛЗ е изследване на множество от фактори и взаимодействия, които влияят на качеството на обработка на

детайла, а също прогнозиране и оптимизиране на геометрията на обработваните материали.



Фиг. 1.2. Методи за оптимизация на процесите при ЕЛПМЛЗ

Основен инструмент е използването на регресионен анализ, свързан с намирането на количествена връзка между входните и изходните променливи. Провежда се също и статистически анализ на получения модел, който има за цел определяне на адекватността му при предсказване на дадена изходна величина, като смущенията в процеса лесно се определят чрез регистриране на изходния процес, когато сигналът е постоянен. Регресионните модели, представящи функционалната връзка между механичните свойства на облъчените проби и параметрите на процеса на електронния лъч - силата на електронния лъч и времето на облъчване се използват за многокритериална оптимизация с цел максимално увеличаване на всички изследвани механични свойства [A5]. Без претенции за изчерпателност, на Фиг. 1.2 [A1] са представени различни методи за намирането на оптимални стойности на управляемите фактори, които могат да бъдат приложени при оптимизирането на процесите при ЕЛПМЛЗ.

### Метод на повърхността на отклиците (RSM)

За количествена оценка на зависимостта на механичните свойства от параметрите за обработка на електронния лъч може да бъде приложен

методът на повърхността на отклиците (RSM), представен в [42]. Това е ефективна статистическа техника за изследване на сложни процеси, при които много фактори и взаимодействия влияят на изследваните изходни характеристики. Основното предимство е намаления брой експериментални опити, необходими за осигуряване на достатъчно информация за оценка на статистически адекватни регресионни модели. RSM представлява набор от математически и статистически техники за изграждане на емпирични модели. Експериментът се състои в поредица от тестове, наречени серии, в които се правят промени във входните променливи, за да се идентифицират причините за промените в изходната реакция. По време на всеки експеримент входните данни (факторите), влияещи върху избора на стойност, променят резултата по различен начин за разлика от комбинацията от всички фактори. Важен е изборът на влияещите фактори в такава комбинация, че ефектът от всички фактори да бъде еднакво оправдан в резултата. Такава техника предлага методът на ортогоналния масив на Тагучи, при който малък набор от всички възможности е избран за намаляване на броя на експериментите до практическо ниво [A1].

#### *Метод на функцията на желателност. Метод на многокритериалната оптимизация чрез функция на желателност*

Методът (многоцелно програмиране, векторна оптимизация) е свързан с математически задачи с участието на повече функции, които да бъдат оптимизирани едновременно. При този метод трябва да се вземат оптимални решения в присъствието на компромиси между две или повече противоречиви цели. Предвижданата стойност на всяка характеристика на изпълнението  $y_i$  може да се получи с помощта на прогнозния регресионен модел.

#### *Метод на Парето – оптимални решения*

Парето-оптимални компромисни решения могат да бъдат получени в случаите на едновременно минимизиране и / или максимизиране на няколко качествени характеристики. Свойство на тези решения е, че ако те се сравнят две по две, някои от получените стойности на оптималните изходни характеристики ще бъдат по-добри, но поне една от тях ще бъде по-лоша от тази в друго компромисно решение.

Направен е литературен обзор на изследванията извършени върху прилагането на Електроннолъчевите технологии като Електронно лъчевото заваряване и електронно лъчевата повърхностна модификация. За целите на анализа на процесите в ЕЛТ е представен методът на регресионния анализ,

които представлява направление в математическата статистика с чиято помощ се анализират функционалните връзки между зависими случайни величини. Дискутиран е методът на многокритериалната оптимизация чрез функция на желателност, която ще се използва при изследването на механичните свойства на образци облъчени с електронен лъч в инсталацията ЕЛИ – 60.

### 1.1.3. Регресионен анализ

За целите на анализа на процесите в ЕЛТ се използва методът на регресионния анализ, който представлява направление в математическата статистика с чиято помощ се анализират функционалните връзки между зависими случайни величини. Статичната характеристика на процеса е крива, която представя съответствието между входния сигнал на процеса  $u$  и изходния сигнал  $y$  [82]. Оценяването на математически модел може да е основано на аналитични зависимости между входните фактори и изходните величини, но моделът може да бъде оценен и емпирично. Експериментите, необходими за създаване и оценка на модела на статичния процес допринасят за получаването на информация относно устойчивостта и чувствителността към смущения [94]. Важен е изборът на влияещите фактори в такава комбинация, че ефектът от всички фактори да бъде еднакво оправдан в резултата. Такава техника предлага методът на ортогоналния масив на Тагучи, при който малък набор от всички възможности е избран за намаляване на броя на експериментите до практическо ниво [47].

Линейните по отношение на коефициентите (линейно-параметризираните) модели могат да бъдат представени най-общо с формула (3.1):

$$(3.1) \quad \eta = \sum_{i=1}^k \theta_i f_i = \theta^T f,$$

където  $f_i$  са произволни функции на факторите  $p^T = (p_1, p_2, \dots, p_m)$ ,  $\theta_i$  са неизвестните коефициенти в модела,  $\eta$  е истинската стойност на изходната величина, а  $f^T = [f_1(p), f_2(p), \dots, f_p(p)]$  е  $k$ -мерен вектор на регресорите.

В действителност, поради наличието на случайното смущение, истинската стойност на изходната величина е неизмерима. Допуска се, че има нормално разпределение, нулево математическо очакване и постоянна дисперсия ( $\sigma_\varepsilon^2 = \text{const}$ ). В резултат на експеримента се получават данни за изходните величини при определени стойности на входните параметри за даден опит  $u$ , означени с  $y_u$  (3.2):

$$(3.2) \quad y_u = \eta_u + \varepsilon_u = \sum_{i=1}^k \theta_i f_i + \varepsilon_u \text{ при } u = 1, 2, 3, \dots, N,$$



където  $N$  е броя на опитите, а  $u$  е номера на даден опит.

Ако е известен видът на функциите  $f_i$ , техните стойности  $f_{ui}$  за даден опит се изчисляват по данните от експеримента. Матрица, чиито редове са образувани от стойностите на  $f_{ui}$  за даден опит, се нарича „разширена матрица на плана”, бележи се с  $F$  и има вида (3.3):

$$(3.3) \quad F = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{21} & \dots & f_{p1} \\ f_{12} & f_{22} & \dots & f_{p2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ f_{1N} & f_{2N} & \dots & f_{pN} \end{bmatrix},$$

Тогава уравнението (3.2), записано в матрична форма, придобива вида (3.4):

$$(3.4) \quad y = F\theta + \varepsilon,$$

където  $y^T = (y_1, y_2, y_3, \dots, y_N)$  и  $\varepsilon^T = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \dots, \varepsilon_N)$ .

Този модел се нарича „общ линеен модел”. Заради наличието на случайните смущения точните стойности на  $\theta_i$  не могат да бъдат намерени, но могат да бъдат намерени техните оценки -  $b_i$ . И, ако векторът на предсказаните с модела стойности се обозначи с  $\hat{y}^T = (\hat{y}_1, \hat{y}_2, \hat{y}_3, \dots, \hat{y}_N)$ , тогава е в сила (3.5):

$$(3.5) \quad \hat{y} = Fb$$

По този начин неизвестните оценки на коефициентите  $b_i$  могат да бъдат оценени с помощта на метода на най-малките квадрати [66, 70].

За да се избегне проблема с размерността на входните параметри, регресионните уравнения се извеждат от кодираните в граници  $[-1 \div 1]$  стойности на всеки от факторите  $x_i$ , като връзката на кодираните с натуралните стойности  $z_i$  се дава с формулата (3.6):

$$(3.6) \quad x_i = \frac{z_i - z_{i0}}{\lambda_i}, \text{ при } i = 1, 2, 3 \dots m,$$

където  $m$  е броя на факторите, вариращи в експеримента,  $z_{i0}$  е основното ниво на  $i$ -тия фактор, а с  $\lambda_i$  се означава интервалът му на вариране.

Основното ниво и интервалът на вариране могат да се изчислят чрез минималните ( $z_{i,\min}$ ) и максималните ( $z_{i,\max}$ ) стойности на факторите по време на проведения опит чрез формулите (3.7):

$$(3.7) \quad z_{i0} = \frac{z_{i,max} + z_{i,min}}{2} \text{ и } \lambda_i = \frac{z_{i,max} - z_{i,min}}{2}$$

Проверката за значимост на регресионните коефициенти, изчисляването и проверката за значимост на коефициента на детерминация -  $R^2$ , изчисляването на коефициента на множествена корелация, както и методологията за проверка за адекватност на регресионния модел са подробно описани в [33, 71, 73, 10].

#### 1.1.4. Функция на желателност

##### 1.1.4.1. Многокритериална оптимизация чрез функция на желателност

Методът на многокритериална оптимизация (многоцелно програмиране, векторна оптимизация) е свързан с математически задачи с участието на повече функции, които да бъдат оптимизирани едновременно. При този метод трябва да се вземат оптимални решения в присъствието на компромиси между две или повече противоречиви цели. Например ако при извършването на изследване за  $r$  характеристики на изпълнение  $y_i$ , в зависимост от вариацията на  $m$  параметрите на процеса  $\vec{x}$ . Предвижданата стойност на всяка характеристика на изпълнението  $\hat{y}_i$  може да се получи с помощта на прогнозния регресионен модел с обща форма (3.8):

$$(3.8) \quad (\hat{y}(\vec{x})) = \sum_{j=1}^k \hat{\beta}_{ij} f_{ij}(\vec{x})$$

където регресорите  $f_{ij}(\vec{x})$  са известни функции на параметрите на процеса  $\vec{x}$  и  $\hat{\beta}_{ij}$  са оценки на регресионния коефициент, получени чрез метод на най-малките квадрати за оценка на параметъра.

Регресионните модели се оценяват след трансформация от естествена ( $z_i$ ) на кодирана ( $x_i$ ) в диапазона от -1 до и безразмерни стойности на параметрите на процеса. Това може да стане с помощта на формула (3.9):

$$(3.9) \quad x_i = \frac{2z_i - (z_{max,i} + z_{min,i})}{(z_{max,i} - z_{min,i})}$$

където  $z_{min,i}$  и  $z_{max,i}$  са дефинирани в експерименталната област на всеки параметър на процеса.

Всеки прогнозиран отговор  $\hat{y}_i(\vec{x})$  ( $i = 1, 2, \dots, r$ ), се трансформира в индивидуална желателна функция  $d_i$ ,  $0 \leq d_i \leq 1$ . С увеличаването на желанието на съответното свойство се увеличава и стойността на функцията за желание. За да се определят отделните функции за желание на отговорите  $\hat{y}_i(\vec{x})$  могат да се използват едностранни или двустранни трансформации. Прилага се едностранна трансформация, ако има от едната страна ограничена област за отговора  $y_i(\vec{x}) \leq b_i$  или  $y_i(\vec{x}) \geq a_i$  и съответно се търси минимум или максимум. Двустранната трансформация се прилага, когато отговорите са двустранни,  $a_i \leq y_i(\vec{x}) \leq b_i$  и има целева стойност  $y_i(\vec{x}) = T_i$ , което е най-желано и има желателност  $d_i = 1$ . Съгласно тези дефиниции могат да бъдат оценени три типа индивидуални функции за желателност:

Функция на желателност с определена целева стойност  $T_i$  за характеристиката на изпълнението  $y_i(\vec{x})$  и двустранно ограничение  $a_i \leq y_i(\vec{x}) \leq b_i$  (3.10):

$$(3.10) \quad d_i(y_i) = \begin{cases} \left[ \frac{y_i - a_i}{T_i - a_i} \right]^s & \text{for } a_i \leq y_i \leq T_i \\ \left[ \frac{y_i - a_i}{b_i - a_i} \right]^t & \text{for } T_i \leq y_i \leq b_i \\ 0 & \text{for } y_i < a_i \vee y_i > b_i. \end{cases}$$

- Функция на желателност, когато максимумът на характеристиката на изпълнение  $y_i(\vec{x})$  се изисква и има едностранно ограничение ( $y_i(\vec{x}) \geq a_i$ ) (3.11):

$$(3.11) \quad d_i(y_i) = \begin{cases} 0 & \text{for } y_i < a_i \\ \left[ \frac{y_i - a_i}{b_i - a_i} \right]^s & \text{for } a_i \leq y_i \leq b_i, \\ 1 & \text{for } y_i > b_i \end{cases}$$

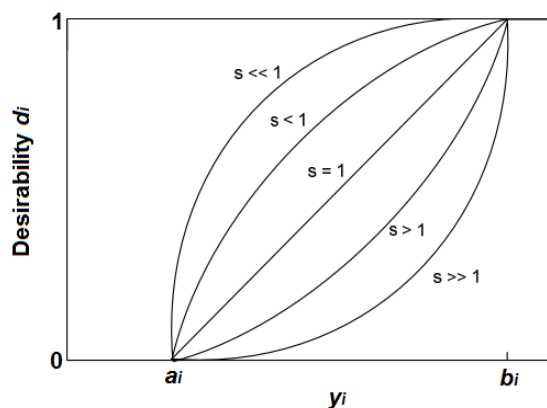
където  $b_i$ , е стойност, над която всички стойности на отговор са еднакво приемливи.

- Функция на желателност, когато се изисква минималната характеристика на работата  $y_i(\vec{x})$  и има едностранно ограничение ( $y_i(\vec{x}) \leq a_i$ ) (3.12):

$$(3.12) \quad d_i(y_i) = \begin{cases} 1 & \text{for } y_i < a_i \\ \left[ \frac{y_i - b_i}{a_i - b_i} \right]^t & \text{for } a_i \leq y_i \leq b_i, \\ 0 & \text{for } y_i > b_i \end{cases}$$

където  $a_i$ , е стойност, над която всички стойности на отговор са еднакво приемливи.

Стойностите на  $s$  и  $t$  определят степента на увеличаване на индивидуалната желателност  $d_i(y_i)$  за всеки от отговорите. Те могат да бъдат избрани да са равни на 1, по-малки или по-големи от 1. Чрез този избор стриктността на ограниченията може да бъде променена и претеглена (виж Фиг. 3.10). Ако  $s$  (или  $t$ ) е равна на 1 връзката между  $y_i$  и  $d_i$  е линеен в рамките на дефинираните ограничения за  $y_i$ ;  $s$  е по-малък от 1, когато стойностите, близки до максималната стойност, са добри и  $s$  е по-голяма от 1, ако стриктността е по-малка при отдалечаване от максималната стойност.



Фиг. 3.10. Индивидуални функции за желателност  $d_i$  за различни стойности на  $s$  в случаите, когато се изисква максимум.

Тогава общата функция на желателност може да се изчисли чрез (3.13):

$$(3.13) \quad D = (d_1 d_2 \dots d_r)^{1/r}$$

Общата функция за желателност има стойности в диапазона  $[0,1]$ . Тя се приближава до единица с увеличаването на желателността на всички отговори и е нула, когато един от отговорите е неприемлив и неговата функция за желателност  $d_i$  е равна на нула.

### 1.1.5. Цел и задачи на дисертационния труд

В настоящия дисертационен труд е поставена следната цел:

*Да се разработи идеен проект за система за автоматизирано управление на вакуумната и охладителната системи на ИЕЛЗПМ. На базата на проведени експериментални изследвания да се представи научно-обоснована методика за оптимизиране на процеси в ЕЛТ. Да се извърши експериментално изследване на влиянието на параметрите на електроннолъчевата повърхностна модификация чрез оценяване на регресионни модели, описващи функционалните зависимости между механичните свойства на облъчените образци и параметрите на електроннолъчевата обработка. На база на получени експериментални данни да се оценят преходните характеристики. Да се разработи система за управление на кръгов манипулатор с помощта на програмируем логически микроконтролер.*

За постигане на поставената цел е необходимо да се формулират и решат следните задачи:

1. Да се разработи идеен проект за система за автоматично управление на вакуумната и охладителната системи на ИЕЛЗПМ. Да се разгледат етапите на процеса ЕЛЗ, които определят основно времетраенето на въвеждането и извеждането на инсталацията в експлоатация: достигане на висок вакуум при пуск на инсталацията и охлаждането на дифузионната помпа при спиране на работата. На база на получени експериментални данни да се оценят преходните им характеристики, като се сравнят моделите за обекти от първи и втори ред.
2. Да се извърши експериментално изследване на влиянието на параметрите на електроннолъчевата повърхностна модификация - мощност на електронния лъч и време на облъчване - върху механичните свойства 0,2% условна граница на провлачване  $R_{p0,2}$ , якост на опън  $R_m$  и относително удължение след разрушаване  $A_{30}$  на тънколистни образци от неръждаема стоманени 316L. Да се оценят регресионни модели, описващи функционалните зависимости между механичните свойства на облъчените образци и параметрите на електроннолъчевата обработка - мощността на електронния лъч и времето за облъчване. Да се извърши многокритериална оптимизация при поставени изисквания и ограничения за механичните свойства с помощта на подход на обобщената функция на желателност и Парето-оптимизация.

3. Да се разработи система за управление на кръгов манипулатор с помощта на програмируем логически микроконтролер и да се калибрира движението на кръговия манипулатор в права и обратна на часовниковата стрелка посоки.

### **Заклучения към Глава 1**

В Глава 1 е представена постановката на задачата на дисертацията и е предложено описание на използваните подходи за решаването ѝ. Разгледани са различни методи за намирането на оптимални стойности на управляемите фактори, които могат да бъдат приложени при оптимизирането на процесите при ЕЛПМЛЗ. Направен е литературен обзор на изследванията, извършени върху прилагането на Електроннолъчевите технологии като Електронно лъчевото заваряване и електронно лъчевата повърхностна модификация. За целите на анализа на процесите в ЕЛТ е представен методът на регресионния анализ, който представлява направление в математическата статистика, с чиято помощ се анализират функционалните връзки между зависими случайни величини. Дискутиран е методът на многокритериалната оптимизация чрез функция на желателност, която ще се използва при изследването на механичните свойства на образци облъчени с електронен лъч в инсталацията ЕЛИ – 60.

### **Глава 2. Апаратни средства за управление на ИЕЛПМЛЗ**

За реализация на поставените цели в дисертацията е използван програмируем логически контролер (PLC) Simatic S7-300 и микроконтролер Atmega328 като са представени принципите им на работа използвани за управление на инсталацията и манипулатора.

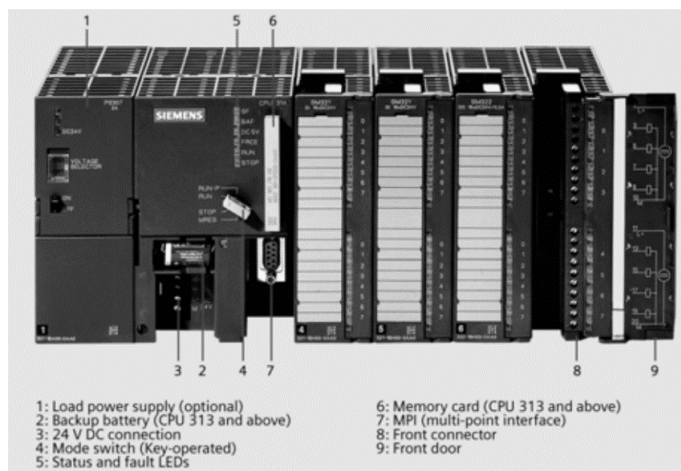
#### **2.1.Определение и история на използването на програмируеми логически контролери**

Терминът „Програмируеми логически контролери" – Programmable Logical Controller (PLC) се използва за обозначаване на програмно-управлявани електронни системи, проектирани за използване в качеството на промишлено оборудване за логическо управление на различни машини, съоръжения и технологични процеси през цифрови или аналогови входове и изходи. Този термин PLC се използва предимно от европейските производители на устройства за логическо управление. В американската литература този тип устройства са познати като Програмируеми контролери – Programmable Controller (PC). В българската литература като синоним се среща понятието Промислени контролери. Съдържанието на понятието

„Програмируеми логически контролери" е дадено през 1978 г. от NEMA (National Electrical Manufacturers Association) [117].

## 2.2. Програмируем логически контролер Simatic S7-300

В [45] по-подробно е разгледана автоматизацията на оборудването за контрол на инсталацията за електронно лъчево заваряване чрез програмируем логически контролер (PLC) SIMATIC S7-300, чиято практическа реализация ще помогне за внедряването на напълно интегрирана система за инженерна поддръжка. В SIMATIC S7 – 300 могат да бъдат създадени модули в конфигурация без да е необходим слот за I/O



Фиг. 3.6. Програмируем логически контролер Siemens Simatic S7-300

## Микроконтролер Arduino

Arduino (Фиг. 3.8) е платформа за роботика и кибер-физични проекти, базирана на входно-изходна платка и среда за програмиране, близка до езика Processing/Wiring. Arduino може да се използва за създаване на самостоятелни интерактивни обекти или да си взаимодейства с външни софтуерни програми като Flash, Processing, MaxMSP, PureData. В хардуерно отношение платформата включва голямо разнообразие от платки, като за целите на поставените в дисертационния труд задачи е избрана такава, базирана на 8-битовия микроконтролер Atmega328.



Фиг. 3.8. Платформата Arduino UNO

Чрез платформата Arduino може да бъде управлявана работата на различни манипулатори, които са технически устройства, предназначени за осъществяване на движение на обработваните материали поставени върху тях [49]. Те се състоят от отделни звена, свързани последователно или паралелно помежду си чрез подвижни съединения (стави), благодарение на което могат да заемат различна позиция спрямо обекта с който взаимодействат с цел изпълнението на конкретна задача. В индустрията основно приложение са намерили манипулаторите с фиксирана подвижност на основата и степени на свобода до 9.

В [A3] е разработена система за управление на кръгов манипулатор с помощта на микроконтролер Arduino Uno за използване на кръгов манипулатор във вакуумната камера на ИЕЛЗ. Направено е калибриране на движението на кръговия манипулатор, в права и обратна на часовниковата стрелка посоки. Оценени са модели за скоростта на движение на кръговия манипулатор в зависимост от времезакъснението между стъпките на мотор, оценена е грешката при различните скорости на въртене на манипулатора. Определен е работен диапазон за скорости на въртене в права и обратна на часовниковата стрелка посоки. Предназначението на изследвания манипулатор е за движение на образци и датчик за характеризиране на електронния лъч във вакуумната камера на инсталация за електроннолъчево заваряване, повърхностна модификация, изпарение и отлагане на тънки слоеве.

## **Заклучения към Глава 2**

В Глава 2 са посочени принципите на работа на Програмируемите контролери Siemens и Arduino, използвани за управление на инсталацията и манипулатора. Разгледана е историята на използването на програмируеми логически контролери.



## **Глава 3. Вакуумни системи в ЕЛТ**

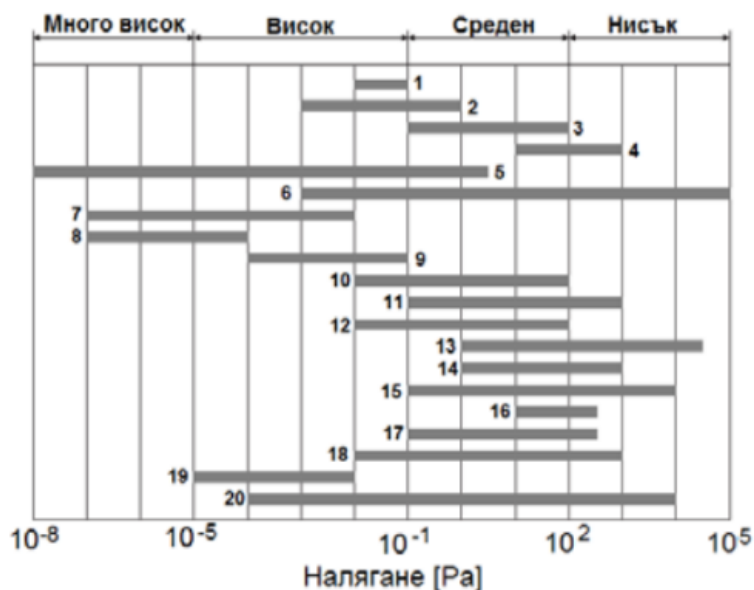
В Глава 3 са разгледани са вакуумни системи, вакуумни инсталации, вакуумни датчици, вакуумни помпи и вакуумната камера, използвани при работата на инсталациите за електроннолъчеви технологии. Обсъдени са методите на тестване на механичните свойства на образци от неръждаема стомана, които са част от целите, обект на разглеждане в Глава 5.

### **3.1 Вакуумни инсталации**

В металургията топенето или претопяването под вакуум придава нови свойства на металите и сплавите, поради което те придобиват висока механична якост, пластичност и издръжливост. Създаването на вакуум е необходимо за осигуряване на среда, свободна от примеси. Легирането на чисти материали във вакуум с прецизно дозирани добавки, например с помощта на йонни лъчи, отваря нови възможности за получаване на материали с уникални свойства, които не могат да бъдат създадени по традиционни методи [34]. Изследваната вакуумната система се състои от:

- набор от устройства за създаване на вакуум (вакуумни помпи);
- изпомпвани обеми (вакуумна камера), в които се създава вакуум;
- вакуумни тръбопроводи, оборудвани с фитинги позволяващи свързване и изключване на елементите на вакуумната система, както и регулиране на потока газ в тях;
- измервателни уреди;
- системи за управление, които осигуряват зададената логика на работа.

На Фиг. 3.11 са представени диапазоните за налягане на промишлени вакуумни процеси [6].



Фиг. 3.11. Диапазони за налягане на промишлени вакуумни процеси

Във вакуумната техника е прието налягането да се разделя на под диапазони, като степенуването на техническия вакуум е условно и е направено с оглед най-вече на различните технически средства и операционни технологии, с които се работи в различните диапазони на налягане. Такова степенуване на вакуума и характеристики на съответните диапазони са представени в Табл. 3.1 [1].

Табл. 3.1. Степени на вакуум спрямо атмосферното налягане

| Степен на вакуум | Налягане (Pa)                 | Молекули на $\text{cm}^3$ | Среден свободен пробег на молекулите $\lambda$ |
|------------------|-------------------------------|---------------------------|------------------------------------------------|
| Нисък            | 100 до 3,3 kPa                | $10^{19}$ - $10^{16}$     | 0,1-100 $\mu\text{m}$                          |
| Среден           | 3,3 kPa до 130 mPa            | $10^{16}$ - $10^{13}$     | 0,1-100 mm                                     |
| Висок            | 130 mPa до 130 $\mu\text{Pa}$ | $10^{13}$ - $10^9$        | 10 cm-1 km                                     |
| Много висок      | 130 $\mu\text{Pa}$ до 130 nPa | $10^9$ - $10^4$           | 1 km- $10^5$ km                                |
| Ултивисок        | 130 nPa и по-малко            | $<10^4$                   | $>10^5$ km                                     |

### 3.2. Вакуумни датчици

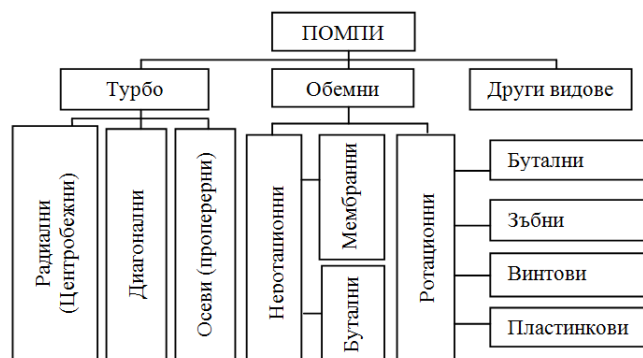
Вакуумните датчици се използват за измерване на налягане под стойността на атмосферното. Приборите за измерване на налягане се състоят от манометричен преобразувател на сигнала за налягане в електрически сигнал и измервателен блок [34]. Осъществяването на измерване във вакуумните системи може да се извърши директно или индиректно (Фиг. 3.12) [85]. Директното измерване се извършва когато измервателния уред е прикрепен към вакуумната камера, а при индиректното измерване между вакуумната помпа и вакуумната камера има междинно звено (тръбопровод), на който е монтиран измервателният уред[118].



Фиг. 3.12. Измерване на общото налягане във вакуумните системи

### 3.3. Вакуумни помпи

За създаване на голямо подналягане се използват вакуумни помпи отличаващи се по принципа си на действие и се избират в зависимост от обема на вакуумната камера и налягането, което е необходимо за провеждане на конкретния технологичен процес. Такава примерна класификация е представена на Фиг. 3.13.



Фиг. 3.13. Класификация на видовете помпи според начина им на работа

За създаването на вакуум се използват два вида помпи, всяка от която отговаря за определен диапазон. Ротационната маслена вакуумпомпа BL90 се използва за създаване на вакуум до  $5 \cdot 10^{-2}$  hPa. Маслото смазва движещите се части на помпата и намалява празното ѝ пространство. Дифузионната помпа стартира при достигане на налягане от  $5 \cdot 10^{-2}$  hPa. Работното налягане в камерата е  $2 \cdot 10^{-4}$  hPa, като след достигане на налягане от  $5 \cdot 10^{-4}$  hPa с помощта на ротационната и дифузионната помпи се стартират втората ротационна помпа и турбомолекулярната помпи.

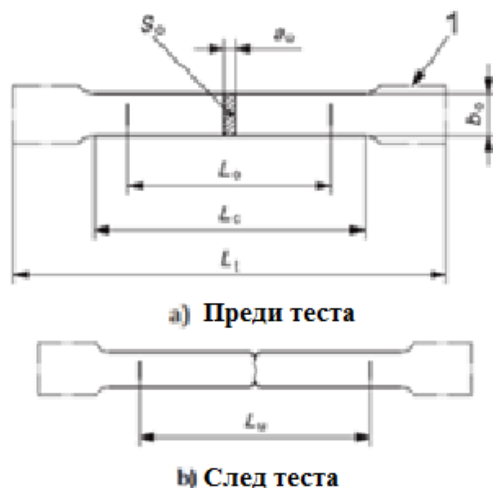
### 3.4. Вакуумна камера

Основна част на вакуумната система е вакуумната камера, предназначена за създаване на определени условия при провеждане на изследвания или други процеси във вакуум, както и изолиране на технологични процеси или устройства от контакт с околната среда. В зависимост от предназначението, камерите се делят на камери с: нисък вакуум, висок вакуум и ултра висок вакуум. Вакуумните камери обикновено са изработени от неръждаема или въглеродна стомана. Изборът на материал за производството на камери се определя от тяхното предназначение и параметрите, които трябва да бъдат осигурени във вакуумното отделение.

### 3.5. Тестване на механичните свойства на образци

В [112] е извършено изследване на аустенитната неръждаема стомана 316/316L с цел изследване на пластини след облъчването им с електронен лъч при различна мощност и време на облъчване. Стоманата 316L е хром-никел-молибденова сплав, разработена за осигуряване на подобрена устойчивост на корозия в умерено корозивни среди. Свойствата на този вид неръждаема стомана я определят като предпочитана сплав за различни архитектурни, индустриални и транспортни приложения. Следвайки стандарта БДС EN ISO 6892-1: 2016 [50], са взети предвид размерите и механичните промени в облъчените плочи. Обработените тестови тела от неръждаема стомана 316L са проектирани да създават постоянно напречно

сечение на тестовото тяло и да постигат по-висока точност на измерването. Всяко обработено тяло се състои от работно пространство, две преходни секции, в които се променят напречното сечение и две захващащи секции (Фиг. 3.16).



Фиг. 3.16. Обработени образци с правоъгълно напречно сечение

В стандарт ISO 6892-1: 2016 има приложение, което съдържа допълнителни препоръки за определяне на механичните свойства чрез компютърно контролирана машина за изпитване на опън [50].

### 3.6. Определяне на процента на пластичното удължение при максимална сила

Методът се състои в определяне на елонгацията при максимална сила на кривата на удължаване, получена с екстензометър и изваждане на еластичното натоварване. Изчислява се процентът на пластичното удължение при максимална сила,  $A_g$  с формула (3.14):

$$(3.14) \quad A_g = \left( \frac{\Delta L_m}{L_e} - \frac{R_m}{m_E} \right) \times 100$$

където:

- $L_e$  - е дължината на образца;
- $m_E$  е наклонът на еластичната част на кривата на натоварване;
- $R_m$  е якостта на опън;
- $\Delta L_m$  - е разширението при максимална сила.

### **Заклучения към Глава 3**

В Глава 3 са разгледани вакуумни системи, вакуумни инсталации, вакуумни датчици, вакуумни помпи и вакуумната камера, използвани при работата на инсталациите за електроннолъчеви технологии. Обсъдени са методите на тестване на механичните свойства на образци от неръждаема стомана, които са част от целите, обект на разглеждане в Глава 5.

### **Глава 4. Интегрирана система за управление на електроннолъчево заваряване**

В настоящата глава е разгледано автоматичното управление на вакуумната и охладителна системи на намираща се в ИЕ-БАН инсталация за електроннолъчево заваряване, изпарение и повърхностна модификация (ИЕЛЗИПМ) (Фиг. 4.1). На база на проведени експерименти са оценени модели, описващи отделни модули, системи и елементи от електроннолъчевата инсталация. Направен е проект за управление, базиран на налични и допълнителни технически средства за автоматизация. Получени са преходните характеристики на параметрите на процеса, които са критични за времетраенето на въвеждането в работен режим и спиране на работата на инсталацията. Оценените параметри на преходните характеристики са уточнени чрез минимизиране на средно квадратичната грешка по отношение на стойностите на времезакъсненията.



Фиг. 4.1. Инсталация за електроннолъчево заваряване, изпарение и повърхностна модификация

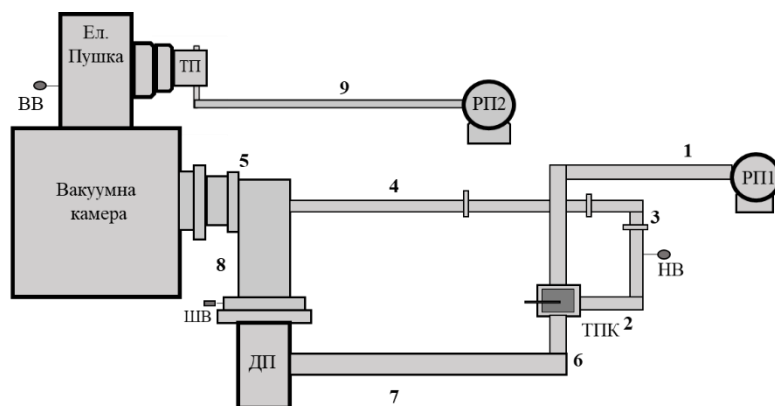
За да бъде процесът на електроннолъчево заваряване възпроизводим и ефективен е необходимо да се оптимизира управлението му. Направена е идентификация на технологичните параметри, свързани с процесите пускане и спиране на инсталацията, които са критични за времетраенето на целия работен цикъл. Разработен е проект за система за автоматично

управление на вакуумната и охладителната системи на инсталация за електроннолъчево заваряване, изпарение и повърхностна модификация на материали. Реализирането на тази първа стъпка от автоматичното управление на инсталацията ще позволи по-пълноценното използване на наличното скъпо оборудване и ще послужи за основа на последваща автоматизация на технологичните процеси.

Управлението на самия процес е свързано с избор на режими на процесите, които се реализират. При задаване на стойности на параметрите на процеса могат да се отчетат редица оптимизационни критерии, свързани с показателите на качеството на получавания продукт, както и отчитането на шумовите фактори и вариациите на параметрите на процеса при производствени условия.

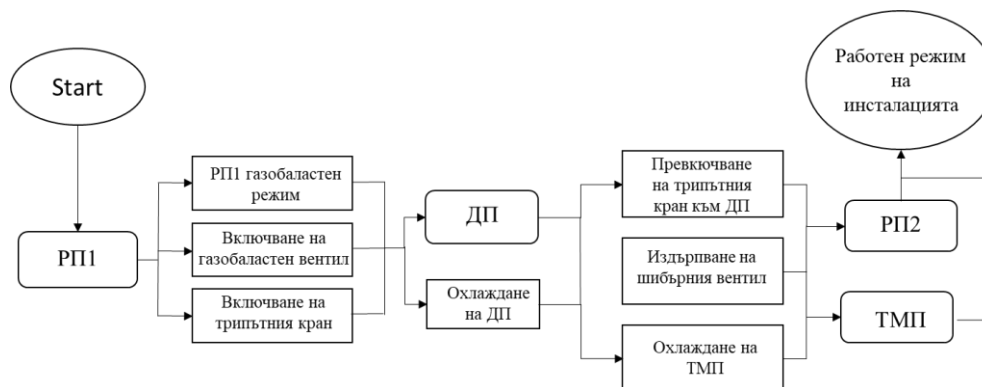
#### 4.1 Архитектурна рамка при електроннолъчеви процеси

Осъществяването на работния процес в ИЕЛЗИПМ (Фиг. 4.2) може да бъде представено чрез архитектурни модели, които дават възможност за цялостен преглед на всички елементи на системата от различни гледни точки. Те могат да се разглеждат като процес на описание на отделните компоненти съставляващи инсталацията (Фиг. 4.3 и Фиг. 4.4).



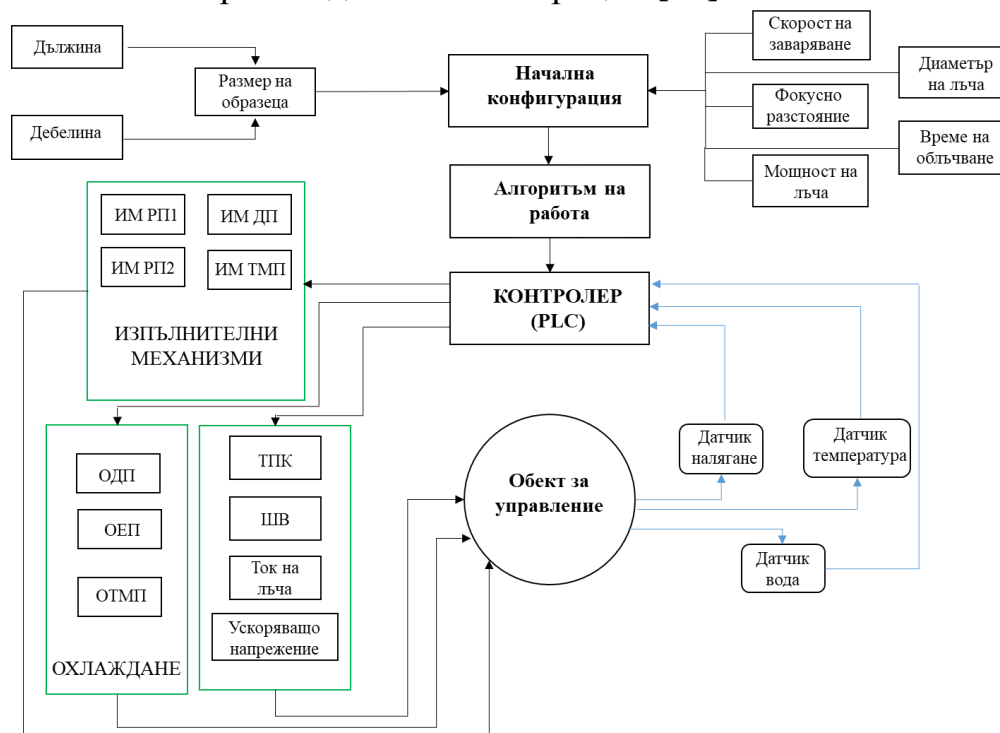
Фиг. 4.2 Инсталация за електроннолъчево заваряване, изпарение и повърхностна модификация (РП1, РП2 – ротационни помпи; ТПК – три пътен кран; ДП – дифузионна помпа; ШВ – шибърен вентил; НВ – нисък вакуум; ВВ – висок вакуум; ТП – турбомолекулярна помпа)

Основните проблеми, които могат да се решават чрез тях са общо системни въпроси включващи определянето на структурата, организацията, взаимовръзката между отделните елементи, взаимодействието с външната среда, функционалното управление както на цялата система така и на отделните елементи в нея (Фиг. 4.3).



Фиг. 4.3 Архитектурна рамка на стартирането на Инсталация за електроннолъчево заваряване, изпарение и повърхностна модификация

В [6] следвайки стандарта IEC62264-3 е представена йерархичната структура на процеса, която го разделя на различни етапи от неговото управление. Стандартът определя дейностите, които се изпълняват при управлението на производствените операции [49].

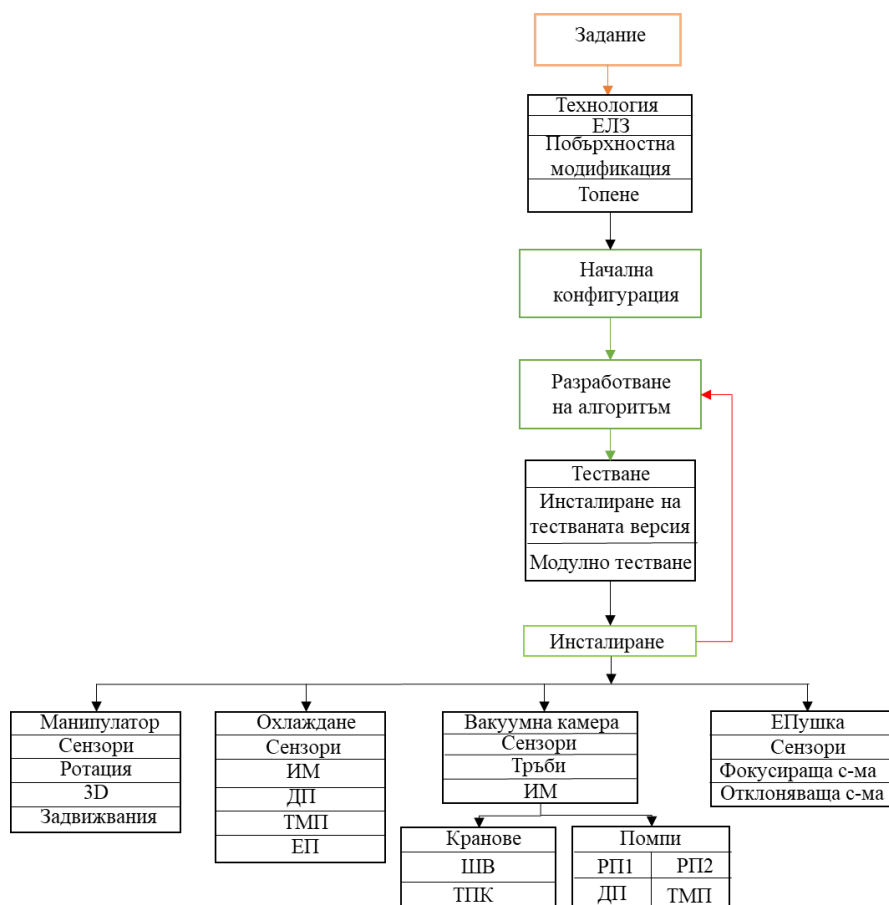


Фиг. 4.4 Архитектурна рамка на елементите включени в Инсталация за електроннолъчево заваряване, изпарение и повърхностна модификация

Високо усъвършенстваните автоматизирани процеси, включително вакуумната система с управление на помпата и налягането, управление на системата за охлаждане, управление на манипулатора, контрол на високо напрежение и емисии, електронно управление на движението на лъча и неговите характеристики, както и компютърно базирано автоматично



разпределение на контрола на мощността на лъчът са представени в (6), където е посочена обобщена архитектурна рамка показана на Фиг.4.5:



Фиг. 4.5. Архитектурна рамка на управлението Инсталация за електроннолъчево заваряване, изпарение и повърхностна модификация

На фигурата е показан алгоритъма на работа на инсталацията за електронно лъчево заваряване с взаимовръзките между различните елементи. Технологиата може да бъде включена в зависимост от заявката (ЕЛЗ, модификация на повърхността, топене), следващата стъпка представена в структурата на архитектурната рамка е „Началната конфигурация“. В нея се включват началните условия за работа по заданието показани на Фиг. 4.3 и Фиг. 4.4.

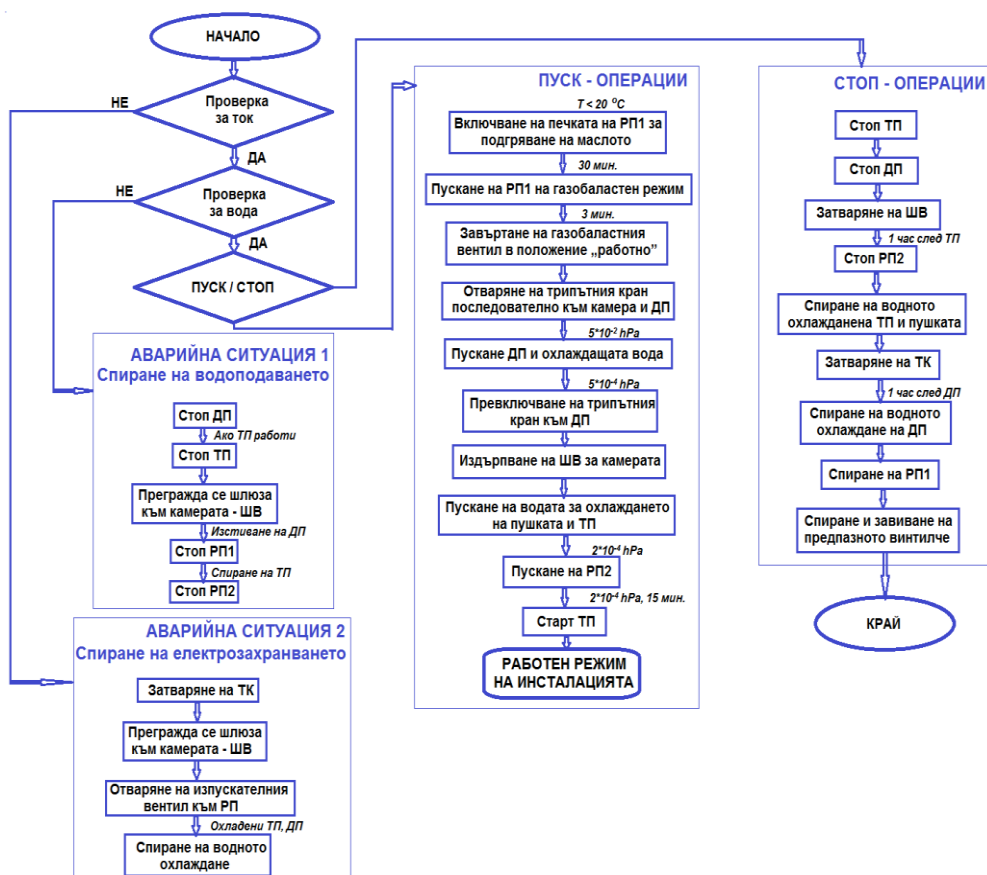
След изпълнение на алгоритъма се извършват поредица от тестове (симулиране) на процеса след инсталиране на програмата на контролера. Ако се появят несъответствия със заданието програмата се връща към корекция на алгоритъма на работа, след което се извършват нови тестове и при успех се преминава към изпълнение на алгоритъма на работа по пускане на инсталацията, включваща приемането на информация от датчиците и управлението на изпълнителните механизми на манипулатора,

охладителната система на помпите, вакуумната камера и електронната пушка (Фиг. 4.4).

Технологичните данни, събрани по време на процеса, позволяват да се наблюдава качеството и да се подпомогне подобряването на процеса на тестване на произведените компоненти; тези данни могат да бъдат записани за бъдещ анализ на отношенията между коригираните параметри на процеса и качеството и стабилността на заваръчните шевове.

## 4.2. Алгоритъм на работа на ИЕЛЗ.

Последователността от операции при пускане и спиране на инсталацията за ЕЛЗ, време на изпълнение и критерии за изпълнение, както и действията при двете основни аварийни ситуации – спиране на водоподаването и спиране на електрозахранването са представени на Фиг. 4.6 [45, 17].

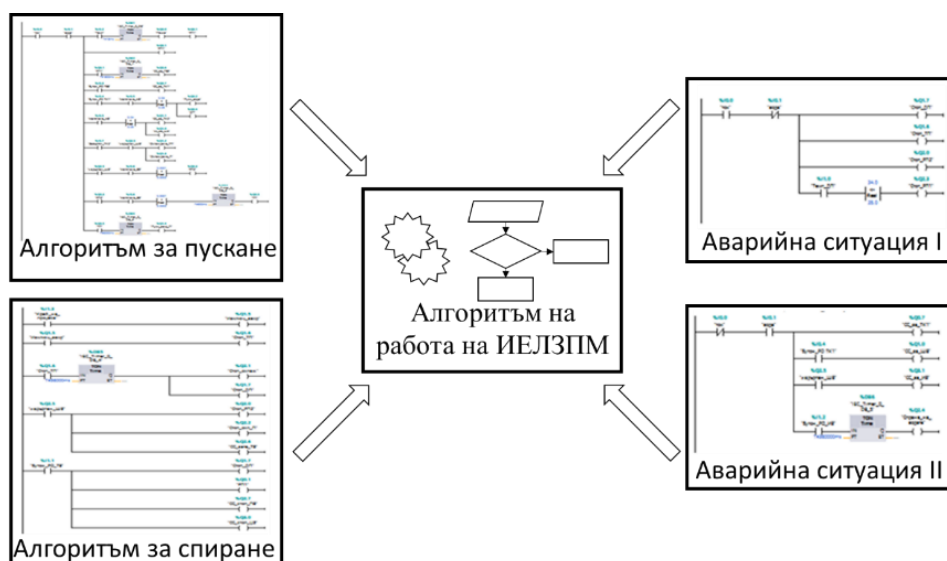


Фиг.4.6. Алгоритъм за управление на инсталацията за ЕЛЗ: пускане и спиране на инсталацията

ИЕЛЗ е сложна система от процеси, които могат да бъдат проектирани за постигане на технологични задачи. Критериите за време и изпълнение за всяка отделна операция, ако са налични, са представени над съответния блок (Фиг. 4.6).

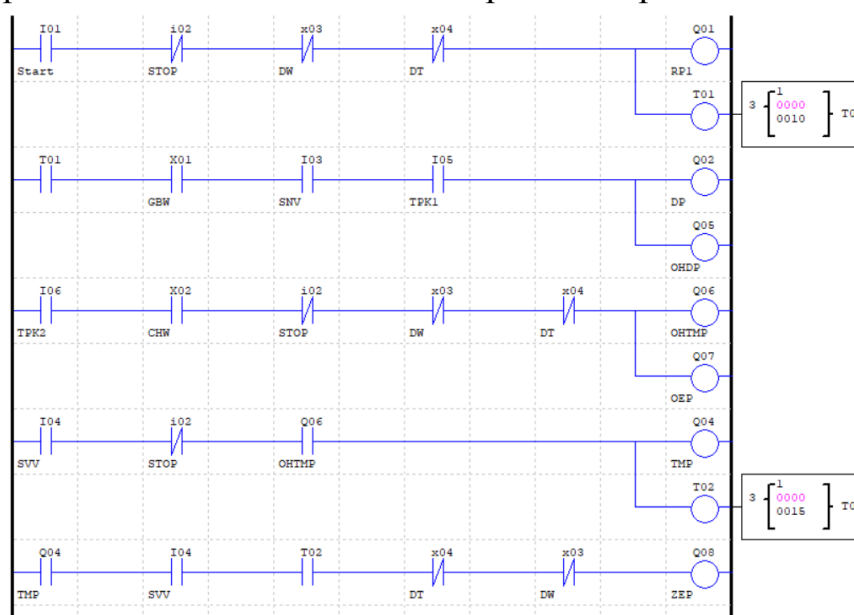
### 4.3. Управление на ИЕЛЗ чрез софтуера на PLC – ладер диаграма

Алгоритмът за управление на ИЕЛЗ, представен в предишната точка, може да бъде реализиран по програмен път като за целта е използван програмируем логически контролер SIMATIC S7-300. Подробно описание на подпрограмите за пускане, спиране и отработване на аварийните ситуации при прекъсване на подаването на вода и електрическо захранване, реализирани като ладер диаграми, е направено в [41]. Обобщение на казаното е представено на фиг. 4.7, в центъра на която се намира алгоритъмът, заместващ четирите подпрограми в една обща.



Фиг. 4.7. Подпрограми за пускане, спиране и отработване на аварийни ситуации

На Фиг. 4.8 е представен обобщаващият алгоритъм на работа на ИЕЛЗПМ.



Фиг. 4.8. Ладер диаграма на алгоритма на работа на ИЕЛЗПМ

На фигурата са отбелязани:

DW – Датчик Вода;  
DT – Датчик Ток;  
GBW–Газобаластен Вентил  
SNV–Сензор нисък вакуум;  
TRK1, TRK2–три пътен кран позиция 1 и 2;  
CHW – Шибърен вентил;  
SVV–Сензор висок вакуум;  
RP1 – Ротационна помпа 1;  
RP2 – Ротационна помпа 2;

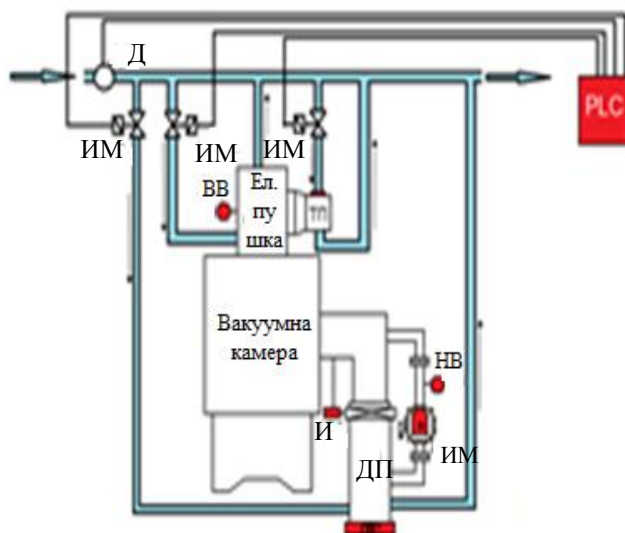
DP – Дифузионна помпа;  
TMP–Турбомолекулярна помпа;  
OHDP–Охлаждане Дифузионна помпа;  
OHTMP–Охлаждане Турбомолекулярна помпа;  
OEP–Охлаждане електронна пушка;  
ZEP–Захранване електронна пушка;

Алгоритъмът за управление може да бъде представен и под формата на функционални блок-схеми.

#### 4.4. Управление на вакуумната и охлаждаелна системи

Охладителната система при разглежданата инсталация за ЕЛЗ се състои от три независими кръга (Фиг. 4.9):

- охлаждане на електронната пушка;
- охлаждане на турбомолекулярната помпа;
- охлаждане на дифузионната помпа.



Фиг. 4.9. Охладителна система на Инсталация за електроннолъчево заваряване, изпарение и повърхностна модификация

Охладителната система понастоящем е свързана директно към водоснабдителната система, а пускането и спирането става ръчно чрез

кранове. Наличието на вода се следи от оператора, което може да доведе до авария при инцидентно спиране на водата.

Автоматизирането на охладителната система е свързано с въвеждане на датчик за налягане на водата и три изпълнителни механизми (електромагнитни вентили за вода, нормално затворени) за управление на отделните охлаждащи кръгове. На фигурата е представена схема на проектираната автоматична система за управление на охладителната система, която изцяло използва наличните компоненти, както и добавянето на минимален брой нови датчици и изпълнителни механизми, с оглед на високата себестойност за технически средства за управление на охладителните инсталации. Системата може да бъде доизградена с допълнителни вентили за водата на охлаждането, датчици за налягане на вода на изходите от трите охладителни кръга (за отчитане на непроходимост през някой от кръговете), както и звукова сигнализация при наличие на аварийна ситуация при спиране на тока или водата.

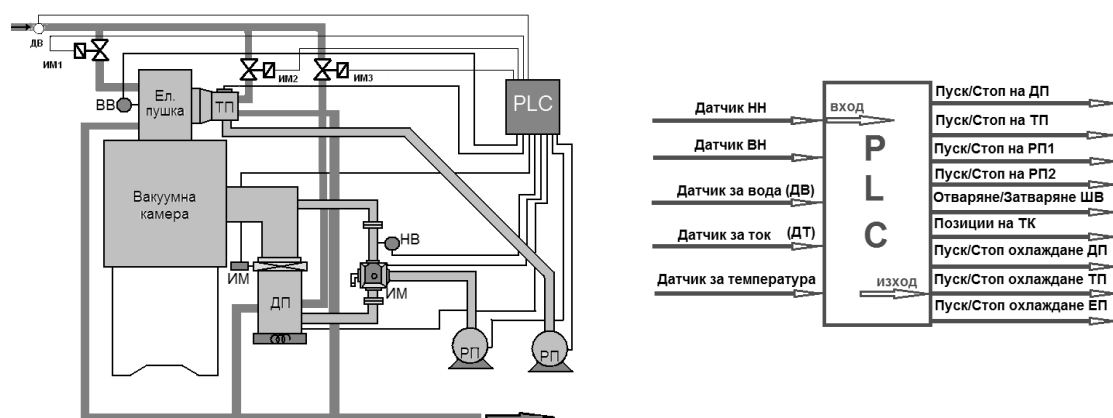
#### **4.4.1. Управление на вакуумната система**

Следвайки алгоритъма за управление (Фиг. 4.6), е проведено експериментално пускане и спиране на инсталацията за електроннолъчево заваряване. Отчетени са температурата на дифузионната помпа и показанията на датчиците за високо и ниско налягане. Общата продължителност на експеримента е 5 часа и 15 мин. Това време не включва провеждане на реален процес на заваряване на материали, изпарение или повърхностна модификация в инсталацията, а само нейното въвеждане в и съответно извеждането ѝ от работен режим.

В [23] е моделирано налягането във вакуумната камера на високо вакуумна инсталация за електроннолъчево заваряване и се изследват двете налични помпи – ротационна помпа BL90 (РП1) и дифузионна помпа РУТ 600 (ДП). Получените резултати са съпоставени с експериментално получени данни. В [6] е разгледано автоматичното управление на вакуумната и охладителна системи на намираща се в ИЕ-БАН ИЕЛЗ. Направен е проект за управление, базиран на налични и допълнителни технически средства за автоматизация.

В [17] е представено проектираната автоматична система за управление на вакуумната и охладителната системи, която изцяло използва наличните компоненти, както и добавянето на минимален брой нови датчици и изпълнителни механизми, с оглед на високата себестойност за технически средства за управление на вакуумни инсталации показана на

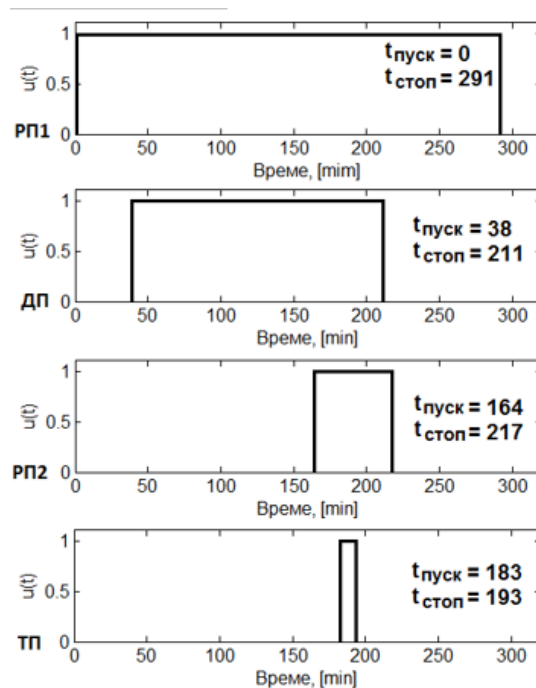
Фиг. 4.10. Системата може да бъде доизградена с допълнителни датчици за вакуум, вентили за водата на охлаждането, вакуумни вентили, датчици за налягане на вода на изходите от трите охладителни кръга (за отчитане на непроходимост през някой от кръгове), както и звукова сигнализация при наличие на аварийна ситуация при спиране на тока или водата. На фигурата са представени също и основните входно-изходни сигнали на програмируемия логически контролер.



Фиг. 4.10. Управление на вакуумната и охладителна системи на инсталация за Инсталация за електроннолъчево заваряване, изпарение и повърхностна модификация:

а) схема; б) основни входно-изходни сигнали за програмируем контролер (ТП – турбомолекулярна помпа, ДП – дифузионна помпа, РП – ротационна помпа, ДВ – датчик за вода, ИМ – изпълнителен механизъм, НВ – датчик за нисък вакуум, ВВ – датчик за висок вакуум, ШВ – шибърен вентил, ТК – три пътен кран, ЕП – електронна пушка, PLC – програмируем логически контролер)

Вакуумната система на ИЕЛПМЛЗ се състои от следните елементи (Фиг. 4.2): две ротационни помпи, дифузионна помпа, турбомолекулярна помпа, два датчика за вакуум (НВ, ВВ), шибърен вентил (ШВ), три пътен кран (ТК), други вентили, кранове и връзки [6, 17, 69]. Турбомолекулярната помпа е свързана с електронната пушка, поради изискването за по-висок вакуум в тази зона. На Фиг. 4.2 е представена вакуумната система схематично, като различни участъци от тръбопроводната система са означени от 1 до 9. На Фиг. 4.11 е представена графика на входните импулси, които представляват включване или спиране на помпите – дифузионна помпа (ДП), турбомолекулярна помпа (ТП) и двете ротационни помпи (РП1 и РП2).



Фиг. 4.11. Входни сигнали – работа на помпите

Етапите, които определят основно времетраенето на процесите на въвеждане и извеждане на инсталацията в експлоатация са: достигане на висок вакуум при пуск на инсталацията и охлаждането на дифузионната помпа при спиране на работата. Тези процеси са разгледани по-подробно и преходните им характеристики, след изглаждане и нормиране са апроксимирани с такива за обекти от първи и втори ред. След определянето на времеконстантите  $T$ , тяхната стойност е оптимизирана по метода на сканирането с променлива стъпка, чрез минимизиране на средно квадратичната грешка RMSE (4.1):

$$(4.1) \quad \text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i^* - y_i)^2}{n}}$$

където  $y_i^*$  са изгладените експериментални и  $y_i$  оценените стойности по формулите за съответните преходни характеристики. Получените резултати са дадени в Табл. 4.2.

Табл. 4.2. Параметри на преходните характеристики от първи и втори ред за изменението на температурата на ДП, ниското и високото налягане (пускане) във вакуумната камера

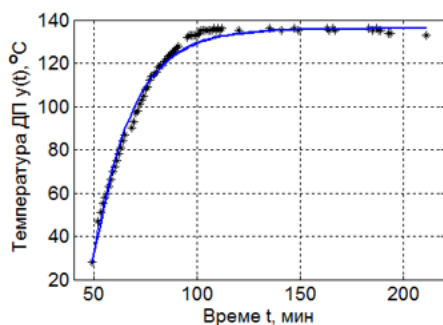
|                                          | y(0)  | k           | $\tau$  | T         | y <sub>1</sub> (t) | RMSE <sub>1</sub> | T <sub>1</sub> | T <sub>2</sub> | y <sub>2</sub> (t) | RMSE <sub>2</sub> |
|------------------------------------------|-------|-------------|---------|-----------|--------------------|-------------------|----------------|----------------|--------------------|-------------------|
| Температура на ДП - пуск                 | 28    | 107.6<br>67 | 49      | 18.7      | 1a                 | 3.1853            | 17.60          | 1.10           | 2a                 | 2.9519            |
| Температура на ДП - спиране              | 28    | 102         | 22<br>2 | 36.7      | 1б                 | 3.8672            | 0.10           | 36.6<br>0      | 2б                 | 3.9478            |
| Висок Вакуум - пуск                      | 0.007 | 0.028       | 13<br>5 | 11.9<br>0 | 1б                 | 0.0020            | 5.50           | 5.55           | 2б                 | 0.0017            |
| Нисък Вакуум (до пускане на ДП)          | 10    | 60          | 4.5     | 1.65      | 1б                 | 3.0551            | 1.65           | 0.01           | 2б                 | 3.1212            |
| Нисък Вакуум - пуск (след пускане на ДП) | 1     | 8           | 11<br>2 | 22.9<br>0 | 1б                 | 0.3043            | 22.00          | 1.05           | 2б                 | 0.2970            |

В таблицата са използвани следните означения за модели от първи ред:

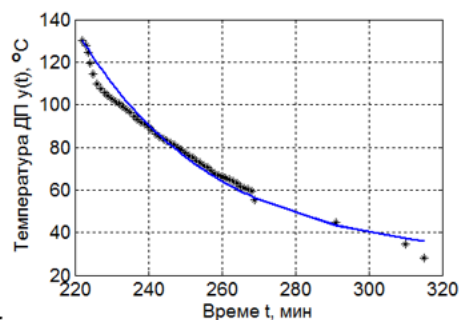
модел 1а:  $k \left[ 1 - e^{-\frac{(t-\tau)}{T}} \right]$ , модел 1б:  $k \left[ e^{-\frac{(t-\tau)}{T}} \right]$ , модели от втори ред: модел

2а:  $k \left[ 1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} e^{-\frac{(t-\tau)}{T_1}} + \frac{T_2}{T_1 - T_2} e^{-\frac{(t-\tau)}{T_2}} \right]$ , модел 2б:  $k \left[ \frac{T_1}{T_1 - T_2} e^{-\frac{(t-\tau)}{T_1}} - \frac{T_2}{T_1 - T_2} e^{-\frac{(t-\tau)}{T_2}} \right]$ .

На Фиг. 4.12 – Фиг. 4.14 са показани графично експерименталните (означени със звездички) и оценените чрез модели от първи и втори ред (непрекъснати линии) преходни характеристики на температурата на ДП, ниския и висок вакуум (при пускане) във вакуумната камера.



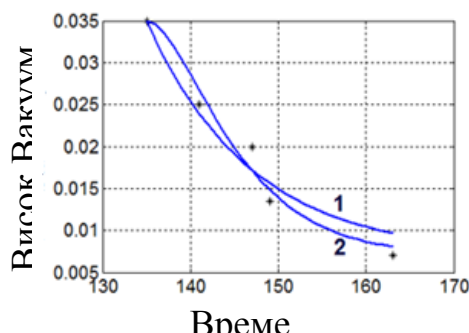
а)



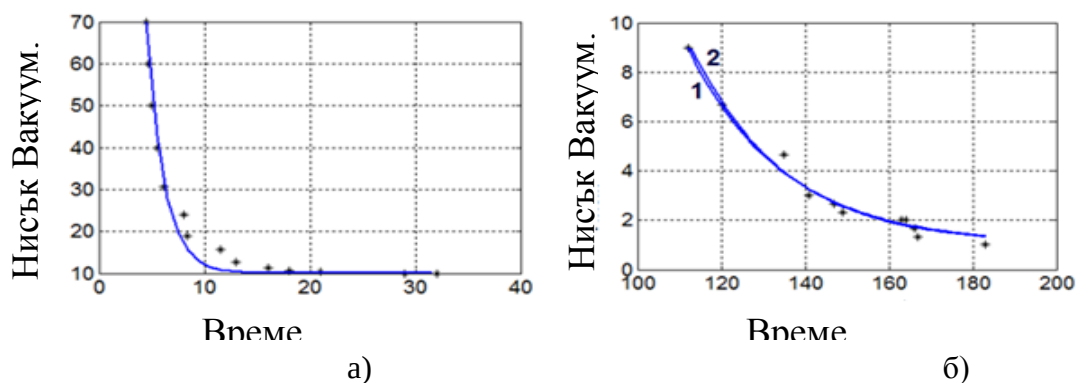
б)



Фиг. 4.12. Преходна характеристика на температурата на ДП – експериментални (звездички) и оценени стойности: а) пуск; б) спиране



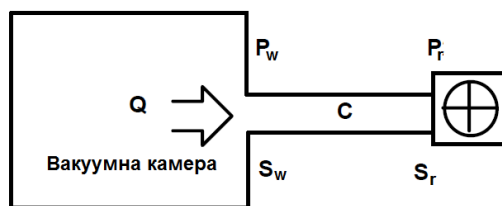
Фиг. 4.13. Преходна характеристика на високото налягане във вакуумната камера – експериментални (звездички) и оценени стойности (непрекъснати линии): 1 – модел от първи ред, 2 – модел от втори ред



Фиг. 4.14. Преходна характеристика на ниското налягане във вакуумната камера при стартиране на процеса: а) преди пускането на дифузионната помпа (ДП), б) след пускане на ДП – експериментални (звездички) и оценени стойности (непрекъснати линии): 1 – модел от първи ред, 2 – модел от втори ред

От фигурите се вижда, че по-съществена разлика в преходните характеристики от първи и втори ред има само в случая на високото налягане във вакуумната камера (Фиг. 4.13), докато в останалите случаи кривите съвпадат.

Изчисляването на системата за изпомпване се осъществява в съответствие с общоприетата във вакуумната техника методика [5, 69]. Освен характеристиките, описани в т.4.4.1, е необходимо също така да се отчетат и температурния режим, размери на заваряваното изделие, вида на материала и неговата газонаситеност, течове, дължащи се на недобра изолация и повреди в тръбопроводите. На Фиг. 4.17 е представена проста схема на свързване на вакуумната камера с помпа с означение на основните параметри.



Фиг. 4.17. Схема на свързване на вакуумната камера с помпа

Връзката между тези параметри е (4.2):

$$(4.2) \quad Q = SP, Q = (P_w - P_r)C = \left( \frac{Q}{S_w} - \frac{Q}{S_r} \right) C \text{ или } \frac{1}{C} = \frac{1}{S_w} - \frac{1}{S_r},$$

където:

- Q - дебит на газа, протичащ през тръбопровода, hPa-l/s;
- $P_w$  – налягане във вакуумната камера;
- $P_r$  – налягане на входа на помпата;
- $S_w$  - достигната скорост на изпомпване (обемен дебит), l/s;
- $S_r$  - номинална скорост на изпомпване на помпата, l/s;
- C – проводимост, l/s.

Работният вакуум на ротационната помпа е  $P_r = 1,33 \cdot 10^{-3}$  hPa, а на дифузионната помпа е  $P_r = 2 \cdot 10^{-4}$  hPa. Допустимата разлика в наляганията при дифузионната помпа е  $P = P_w - P_r \leq 40$  hPa. За определяне на проводимостта C е необходимо да се провери какъв е потокът на движение на газа. Произведението на средното налягане ( $\bar{P}$ ) и диаметъра на тръбата d за даден газ при определена температура може да служи за количествено характеризиране на различните видове газови потоци:

- $\bar{P} \geq 6 \cdot 10^{-1}$  hPa.cm – критерий за вискозен режим (4.3):

$$(4.3) \quad C = 135 \frac{d^4}{L} \bar{P}, l/s$$

- $1,3 \cdot 10^{-2} \leq \bar{P} \leq 6 \cdot 10^{-1}$  hPa.cm - критерий за междинен режим Кнудсен) (4.4):

$$(4.4) \quad C = \frac{135d^4 \bar{P} + 12,1d^3}{L}, l/s$$

- $\bar{P} \leq 1,3 \cdot 10^{-2}$  hPa.cm - критерий за молекулен режим (4.5):

$$(4.5), \quad C = 12,1 \frac{d^3}{L}, l/s$$

където  $L$  е аксиална дължина на тръбопровода [cm]. Проводимостта  $C$  на  $n$  последователно (4.6.1) и паралелно (4.6.2) свързани елементи е съответно:

$$(2.6.1) \quad \frac{1}{C} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}$$

$$(4.6.2) \quad C = \sum_{i=1}^n C_i .$$

Когато тръбопровода съдържа колена или други кривини (като ъглови клапани), те могат да бъдат взети под внимание при приемане на по-голяма ефективна дължина на тръбопровода  $L_{eff}$ . Това може да се изчисли, както следва (4.7):

$$(4.7) \quad L_{eff} = L + 1,33 \frac{\theta}{180^\circ} d$$

където  $\theta$  е ъгълът на коляното, [ $^\circ$ ].

Времето  $t$  [s], необходимо за изпомпване от налягане  $P_1$  до налягане  $P_2$ , може да се пресметне по формулата (4.8):

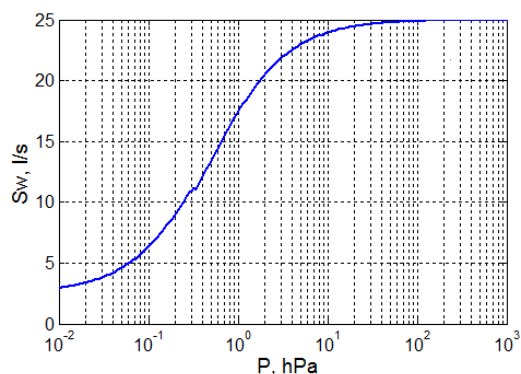
$$(4.8) \quad t = 2,3 \frac{V}{S_w} \lg \frac{P_1}{P_2} ,$$

където:  $V$  е обемът на вакуумната система, заедно с тръбите.

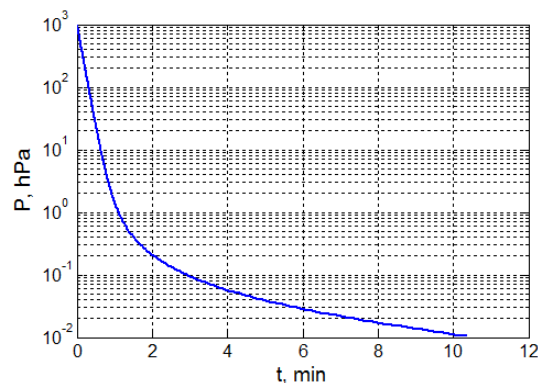
Достигната скорост на изпомпване (обемен дебит),  $S_w$ , l/s, може да се определи чрез (4.9)

$$(4.9) \quad S_w = \frac{S_r C}{S_r + C} .$$

На Фиг. 4.18 е представена изчислената зависимост на достигната скорост на изпомпване  $S_w$  от налягането във вакуумната камера. Фиг.4.19 представя зависимостта на налягането във вакуумната камера  $P$  от времето  $t$  при работа само на ротационната помпа РП1.



Фиг. 4.18. Достигната скорост на изпомпване  $S_w$  за ротационна помпа РП1

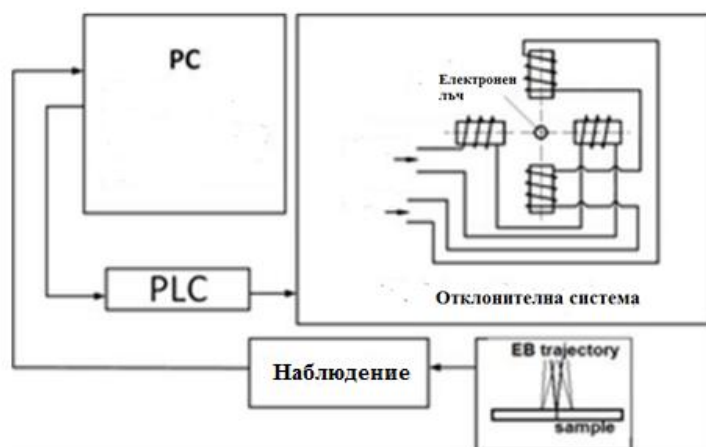


Фиг. 4.19. Налягане във вакуумната камера  $P$  в зависимост от времето  $t$  при работа на ротационна помпа РП1.

#### 4.4.2. Управление на движението на електронния лъч

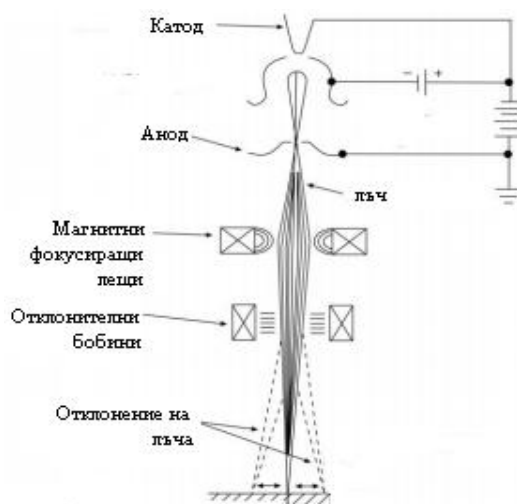
Свободното и прецизно движение по случайни траектории определя възможните приложения на процесите в ЕЛТ при извършване на различни научни експерименти върху различни материали.

В [37] авторите предлагат управлението на автоматично позициониране на електронния лъч върху заварявания с електронен лъч детайл да се реализира чрез двуканална система за управление, представена схематично на Фиг. 4.22. На фигурата са посочени компютъра (PC), подаващ управляващите сигнали към контролер (PLC), който управлява отклонителната система, състояща се от четири бобини. Блокът за наблюдение служи за обратна връзка. Движението на електронните лъчи е резултат от кумулативното действие на два контролни синусоидални сигнали (напрежение), предавани към отклонителните намотки.



Фиг. 4.22. Отклонителна система

В [А4] е представена работата на отклоняващата система на ИЕЛЗ. Системите за отклонение и фокусировка на електронния лъч определят параметрите при взаимодействието на лъча с материалите, те са част от електронната пушка в която се образува електронния лъч (Фиг. 4.23). От високоволтовия източник се подават електрони към катода, който минавайки през анода образува лъч, основните компоненти на които са ускоряващо напрежение и ток на лъча.



Фиг. 4.23. Електронно-оптична схема на пушка за електронно заваряване

Електронния лъч се управлява от електромагнитните фокусиращи лещи и четири разположени на  $90^\circ$  една спрямо друга отклонителни електромагнитни бобини, отклоняващи електроните формиращи лъча в различни посоки в зависимост от разликата в захранващия ток на намотките на отклоняващите бобини. Броят на намотките на отклоняващите бобини, необходими за отклоняване на енергийния лъч на електроните  $U$  под ъгъл  $\theta$ , се определя от съотношението (4.12):

$$(4.12) \quad (IW)_{dev} = 2.65 \frac{d\sqrt{U}}{l} \sin \theta;$$

където  $l$ -ширина, mm;

Например за намотки с вътрешен диаметър  $d = 60$  mm и ширина  $l = 60$  mm с енергия 50kV, максималното отклонение на лъча  $\theta = 15^\circ$  ще бъде достигнато при  $(IW) = 160$  навивки. Намотките на бобините се разпределят така, че системата създава хомогенно магнитно поле, способно да отклонява лъча, без да променя формата си.

Отношението, определящо ъгъла на отклонение на лъча е (4.13):

$$(4.13) \quad I_{def} = k_3 \sqrt{U} \sin \theta;$$

където:

$I_{\text{def}}$ - ток на отклоняващата система;

$k_3$ -коэффициент на пропорционалност  $= \mu_0 / 4\pi$ ;

$\mu_0$  -магнитна константа;

$U$  - напрежение;

$\theta$  - ъгъл на отклонение на лъча спрямо осите на електронната оптична система;

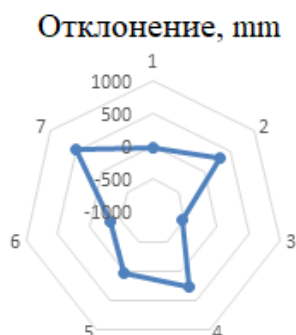
Използвайки формулата за тока на отклонение са изчислени за токовете и напреженията на ускорение под какъв ъгъл и на какво разстояние ще отклони лъча.

В Табл. 4.3 са посочени експерименталните данни за отклонението на лъча при следните параметри:  $U = 50\text{kV}$ , токът, подаден към бобините  $I_{\text{def}} = 40 \div 100\text{mA}$ , дължината на лъча  $z = 340\text{ mm}$ :

Табл. 4.3. Експериментални данни I

| Z[mm] | U[kV] | $I_{\text{def}}$ [A] | $K_3$ | $\Theta$ [°] | DEF, [mm] |
|-------|-------|----------------------|-------|--------------|-----------|
| 340   | 50    | 40                   | 2     | -0,04967     | -16,9005  |
| 340   | 50    | 50                   | 2     | 0,749633     | 316,5095  |
| 340   | 50    | 60                   | 2     | -0,99722     | -526,299  |
| 340   | 50    | 70                   | 2     | 0,643029     | 254,749   |
| 340   | 50    | 80                   | 2     | 0,09921      | 33,84257  |
| 340   | 50    | 90                   | 2     | -0,78158     | -337,413  |
| 340   | 50    | 100                  | 2     | 0,992295     | 520,651   |

От получените в таблицата данни на Фиг. 4.26 е посочено къде ще пада лъча при съответната стойност.



Фиг.4. 26. Отклонение на лъча при различни вариации на тока и напрежението

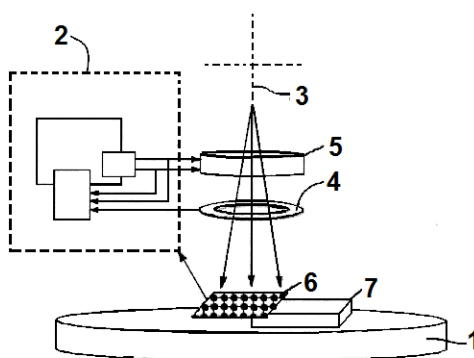
Променяйки параметрите на токовете и напреженията, подавани към електромагнитните бобини, лъчът може да бъде отклонен в желаната посока в зависимост от заварявания продукт. Друг параметър, който може да бъде

променен, е фокусното разстояние чрез промяна на височината и позицията на продукта чрез манипулатор, контролиран от PLC или microPLC.

#### 4.4.3. Управление на процеса отлагане на материал чрез електронен лъч при ЕЛПМ

В [29] е разработен и проверен модел за образуване на вторично (бремсстралунг) рентгеново лъчение по време на взаимодействието на електронния лъч с пълнител. Представен е и модел на сензор за откриване на положението на пълненият проводник спрямо оста на електронния лъч, които установява и как се променя рентгеновото вторично лъчение бремсстралунг в зависимост от параметрите на процеса, като: параметри на трептене на лъча, ускоряващо напрежение, ток на лъча и диаметър на лъча в мястото на взаимодействие, диаметърът на проводника, материалите на основата и телта за пълнене и изместването от центъра на трептене на лъча.

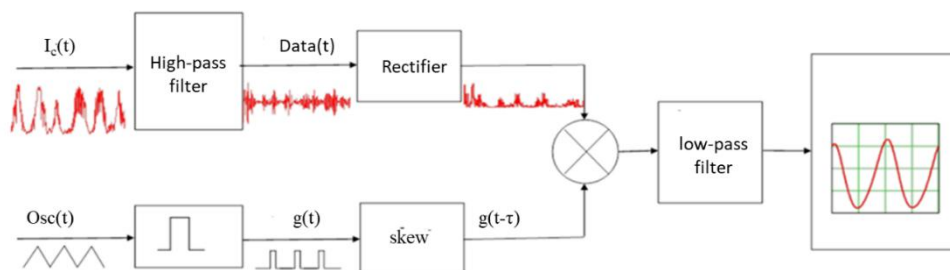
Схема на експерименталната постановка за електроннолъчево отлагане, използваща в реално време управлението на положението на добавъчния материал (проводник) спрямо електронния лъч, базирано на периодично сканиране на зоната на отлагане чрез движение по растерна пътека (точка по точка), е показана на Фиг. 4.29 [31, 109].



Фиг. 4.29. Опитна постановка на метод за контрол чрез периодично сканиране на зоната на отлагане: 1 - въртяща се маса; 2 - блок за управление на системата; 3 - електронен лъч; 4 - сензор за отразени електрони; 5 - отклоняващи бобини; 6 – зона на сканиране; 7 - нанесен материал.

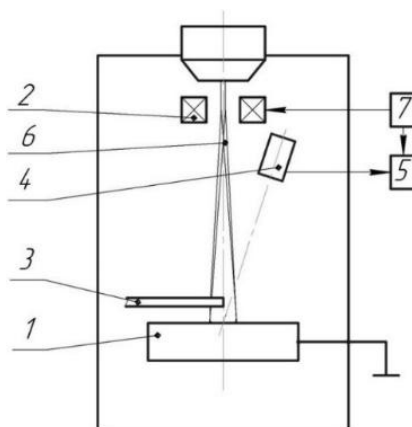
В предварителните изследвания авторите на [91] експериментално потвърждават възможността за контрол на положението на проводника въз основа на вторично излъчване от зоната на отлагане с електронни лъчи с помощта на методи за синхронно натрупване (Фиг. 4.31). При него електронният лъч непрекъснато се колебае по траектория, която се пресича с пълнителния проводник. Вълновата форма на вторичното лъчение се

обработка с помощта на синхронно детектиране или кохерентно натрупване. Вълновата форма на вторичното излъчване се приема като рентгеново лъчение, вторични високо енергийни електрони или светлинно излъчване от зоната, където електронният лъч взаимодейства с материала на продукта и проводника за пълнене.



Фиг. 4.31. Диаграмата на реализацията на метода на синхронно натрупване

Лабораторният експеримент е показан на Фиг. 4.32.



Фиг. 4.32. Схема на експеримента по отношение на взаимодействието на електронния лъч с цилиндрична волфрамова мишена. 1 - подложка, изработена от стомана 12X18H10T; 2 - отклоняващи бобини; 3 - волфрамов прът; 4 - рентгенов сензор; 5 - обработващо звено; 6 - електронен лъч; 7 - блок за управление на тока на отклоняващите бобини;

Експериментално е установено [15], че енергийният поток на вторичното рентгеновото лъчение (бремсстралунг) е пряко пропорционален на електронния ток, атомния номер на материала на целта и квадрата на ускорящото напрежение  $U$  (4.14):

$$(4.14) \quad \Phi_e = k_0 I Z U^2$$

където  $k_0$  е коефициентът на пропорционалност,  $I$  е токът на електронния лъч,  $Z$  е атомният номер на обработения основен материал,  $U_0$

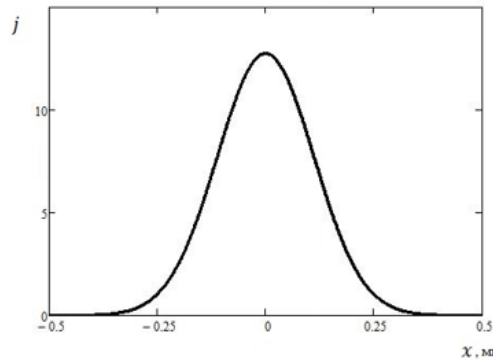


е ускоряващото напрежение. Според експериментални данни, при ускоряващи напрежения до 200 kV, коефициентът  $k_0 = (0,8 \pm 0,2) \times 10^{-9} \text{В}^{-1}$  [109].

Разпределението на мощността на електронния лъч в петното на взаимодействие се описва чрез нормално разпределение на Гаус (4.16):

$$(4.16) \quad j(x, y) = \frac{1}{\sigma_x \sigma_y 2\pi} \cdot e^{\frac{-x^2}{2\sigma_x^2} - \frac{-y^2}{2\sigma_y^2}}$$

където  $x$  е  $x$  координатата;  $y$  е координатата на  $y$ ;  $\sigma_x$  е стандартното отклонение по оста  $x$ ;  $\sigma_y$  е стандартното отклонение по оста  $y$ ;  $\sigma_x^2$  е дисперсията по оста  $x$ ;  $\sigma_y^2$  е дисперсията по оста  $y$  и е показано на Фиг 4.35:



Фиг. 4.35 Разпределение на мощността в напречното сечение на електронния лъч по оста  $x$ . Ефективен диаметър 0,5 мм.

Величината на енергийния поток на рентгеновото лъчение от елемент  $dS$  се изчислява, като се използва израза (4.17):

$$(4.17) \quad d\Phi_e(\varphi) = j(x, y) \cdot J_\varphi(\varphi) dS = k_0 j(x, y) Z U_0^2 \left[ 1 - \left( \frac{\varphi}{90} \right)^3 \right]^{\frac{1}{2}} dS$$

Дясната страна на израза (4.16) може да бъде апроксимирана с помощта на функцията  $\cos \varphi^{\frac{1}{3}}$ . Тогава изразът (4.17) приема формата (4.18):

$$(4.18) \quad d\Phi(\varphi, y) = k_0 j(x, y) Z U_0^2 \cos(\varphi)^{\frac{1}{3}} dS = k_0 j(x, y) Z U_0^2 \cos(\varphi)^{\frac{1}{3}} dy d\varphi D/2$$

Изразявайки ъгъл  $\varphi$  през координатата по оста  $x$ , която преминава през центъра на напречното сечение на пълнителния проводник, успоредно на повърхността на основата и насочена през телта, се получава следното за потока на вторичното рентгеново лъчение от телта (4.19, 4.20, 4.21).

$$(4.19) \quad \cos \varphi^{\frac{1}{3}} = \left[ 1 - \left( \frac{2x}{D} \right)^2 \right]^{\frac{1}{6}};$$

$$(4.20) \quad d\phi D/2 = dx \left[ 1 - \left( \frac{2x}{D} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}};$$

$$(4.21) \quad d\Phi(x, y) = k_0 j(x, y) Z U_0^2 \left[ 1 - \left( \frac{2x}{D} \right)^2 \right]^{\frac{2}{3}};$$

където D е диаметъра на течността за пълнене.

Изразът (4.21) важи за  $-D/2 < x < D/2$ . Отчитайки разпределението на енергията на електронния лъч (4.16), потокът от вторичното рентгеново лъчение бремсстралунг за целия регион (включително плоския субстрат) се описва с израза (4.22):

$$(4.22) \quad \Phi = \begin{cases} k_0 Z U_0^2 \iint \left[ 1 - \left( \frac{2 \cdot x}{D} \right)^2 \right]^{\frac{2}{3}} \cdot \frac{1}{\sigma_x \sigma_y 2\pi} \cdot e^{\frac{-x^2}{2\sigma_x^2} + \frac{-y^2}{2\sigma_y^2}} dx dy, & -\frac{D}{2} < x < D/2 \\ k_0 Z U_0^2 \iint \frac{1}{\sigma_x \sigma_y 2\pi} \cdot e^{\frac{-x^2}{2\sigma_x^2} + \frac{-y^2}{2\sigma_y^2}} dx dy, & x \leq -\frac{D}{2}, \quad x \geq D/2 \end{cases}$$

Когато лъчът се измести спрямо жицата с  $\Delta X$  (4.23):

$$(4.23) \quad \Phi(\Delta X) = \begin{cases} k_0 Z U_0^2 \iint \left[ 1 - \left( \frac{2 \cdot x}{D} \right)^2 \right]^{\frac{2}{3}} \cdot \frac{1}{\sigma_x \sigma_y 2\pi} \cdot e^{\frac{-(x-\Delta X)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{-y^2}{2\sigma_y^2}} dx dy, & -\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2} \\ k_0 Z U_0^2 \iint \frac{1}{\sigma_x \sigma_y 2\pi} \cdot e^{\frac{-(x-\Delta X)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{-y^2}{2\sigma_y^2}} dx dy, & x \leq -\frac{D}{2}, \quad x \geq \frac{D}{2} \end{cases}$$

При измерване на интензивността на излъчване с помощта на сензор, формата на вълната намалява с увеличаване на разстоянието l от областта на взаимодействието на лъча с проводника и субстрата до колектора. За точков източник, при липса на затихване на радиацията от средата, интензитетът намалява обратно с квадрата на разстоянието от източника (4.24):

$$(4.24) \quad J(\Delta X) = \begin{cases} \frac{k_0 Z U_0^2}{l^2} \iint \left[ 1 - \left( \frac{2 \cdot x}{D} \right)^2 \right]^{\frac{2}{3}} \cdot \frac{1}{\sigma_x \sigma_y 2\pi} \cdot e^{\frac{-(x-\Delta X)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{-y^2}{2\sigma_y^2}} dx dy, & -\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2} \\ \frac{k_0 Z U_0^2}{l^2} \iint \frac{1}{\sigma_x \sigma_y 2\pi} \cdot e^{\frac{-(x-\Delta X)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{-y^2}{2\sigma_y^2}} dx dy, & x \leq -\frac{D}{2}, \quad x \geq \frac{D}{2} \end{cases}$$

Изразът (4.24) е статичен модел на сензора за откриване на положението на проводника спрямо електронния лъч въз основа на формата на вълната на вторичното рентгеново лъчение бремсстралунг.

Анализът на израз (4.24) показва наличието на екстремум на вълната, когато оста на електронния лъч е подравнена с оста на телта. Въвеждат се осцилации на електронния лъч през проводника с помощта на функцията (4.25):

$$(4.25) \quad x(t) = A \cdot \sin(2\pi\omega t);$$

където  $A$  е амплитудата на трептенията,  $\omega$  е честотата на трептенията,  $t$  е времето. Въвежда се обозначението  $\alpha = \omega t$ . Нека  $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$ . Тогава израза (4.24) приема формата (4.26):

$$(4.26) \quad J(\Delta X, \alpha) = \begin{cases} \frac{k_0 Z U_0^2}{l^2} \iint \left[ 1 - \left( \frac{2 \cdot x}{D} \right)^2 \right]^{\frac{2}{3}} \cdot \frac{1}{2\pi\sigma^2} \cdot e^{\frac{-(x-\Delta X - A \cdot \sin(\alpha))^2 - y^2}{2\sigma^2}} dx dy, & -\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2} \\ \frac{k_0 Z U_0^2}{l^2} \iint \frac{1}{2\pi\sigma^2} \cdot e^{\frac{-(x-\Delta X - A \cdot \sin(\alpha))^2 - y^2}{2\sigma^2}} dx dy, & x \leq -\frac{D}{2}, x \geq \frac{D}{2} \end{cases}$$

Промяната във формата на вълната на рентгеновото лъчение на бремсстралунг с течение на времето (4.26) може да бъде представена като серия на Фурие от една променлива (4.27):

$$(4.27) \quad J(\Delta X) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} C_m(\Delta X) e^{jm\alpha}$$

където серийните коефициенти се определят от (4.28):

$$(4.28) \quad C_m(\Delta X) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} J(\Delta X) e^{-jm\alpha} d\alpha$$

Имайки предвид (4.26) се получава (4.29):

$$(4.29) \quad C_m = \begin{cases} \frac{k_0 Z U_0^2}{2\pi l^2} \int_{-\pi}^{\pi} \iint e^{-jm\alpha} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{2 \cdot x}{D} \right)^2 \right]^{\frac{2}{3}} \cdot \frac{1}{2\pi\sigma^2} \cdot e^{\frac{-(x-\Delta X - A \cdot \sin(\alpha))^2 - y^2}{2\sigma^2}} dadxdy, & -\frac{D}{2} < x < \frac{D}{2} \\ \frac{k_0 Z U_0^2}{2\pi l^2} \int_{-\pi}^{\pi} \iint e^{-jm\alpha} \cdot \frac{1}{2\pi\sigma^2} \cdot e^{\frac{-(x-\Delta X - A \cdot \sin(\alpha))^2 - y^2}{2\sigma^2}} dadxdy, & x \leq -\frac{D}{2}, x \geq \frac{D}{2} \end{cases}$$

Взаимоотношенията (4.27) и (4.29) представляват математически модел на вълновата форма на рентгеновото лъчение на бремсстралунг като елемент, имащ честотен спектър на изходната форма на вълната, дадени периодични колебания на електронния лъч през телта. Математическият модел позволява да се открият компонентите на формата на вълната от сензор с честоти  $m\alpha$ , където  $m$  е цяло число. В тригонометрична форма (4.27) става (4.30):

$$(4.30) \quad J(\Delta X, \alpha) = \frac{d_0}{2} + 4 \sum_{m=-\infty}^{\infty} d_m \cos(m\alpha) + b_m \sin(m\alpha)$$

където серийните коефициенти се определят от (4.31, 4.32, 4.33):

$$(4.31) \quad d_0(\Delta X) = \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} J(\Delta X, \alpha) d\alpha;$$

$$(4.32) \quad d_m(\Delta X) = \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} J(\Delta X, \alpha) \cos(m\alpha) d\alpha;$$

$$(4.33) \quad b_m(\Delta X) = \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} J(\Delta X, \alpha) \sin(m\alpha) d\alpha;$$

В такъв случай (4.34):

$$(4.34) \quad b_m = \begin{cases} \frac{k_0 Z U_0^2}{4\pi l^2} \int_{-\pi}^{\pi} \int \sin(m\alpha) \cdot \left[1 - \left(\frac{2 \cdot x}{D}\right)^2\right]^{\frac{2}{3}} \cdot \frac{1}{2\pi\sigma^2} \cdot e^{\frac{-(x-\Delta X - A \cdot \sin(\alpha))^2 - y^2}{2\sigma^2}} d\alpha dx dy, & -\frac{D}{2} < x < D/2 \\ \frac{k_0 Z U_0^2}{4\pi l^2} \int_{-\pi}^{\pi} \int \sin(m\alpha) \cdot \frac{1}{2\pi\sigma^2} \cdot e^{\frac{-(x-\Delta X - A \cdot \sin(\alpha))^2 - y^2}{2\sigma^2}} d\alpha dx dy, & x \leq -\frac{D}{2}, x \geq D/2 \end{cases}$$

Като се даде  $m = 1$ , изразът (4.34) описва образуването на вълновата форма, след като тя е обработена по метода на синхронно натрупване. Изразът представя математически модел на сензор за откриване на положението на проводника спрямо електронния лъч въз основа на формата на вълната на рентгеновото лъчение бремсстралунг.

Проверка на значимостта на получения модел с помощта на теста на Фишер, чиято изчислена стойност се намира като съотношение на дисперсията на първоначалната серия от наблюдения на изследвания индикатор и безпристрастна оценка на дисперсията на остатъчната последователност за този модел (4.37):

$$(4.37) \quad F = \frac{R^2}{1-R^2} \cdot \frac{(n-m-1)}{m}$$

където  $m$  е броят на параметрите на модела;  $R^2$  е коефициент на определяне, изчислен по формулата (4.38):

$$(4.38) \quad R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - y_x)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}$$

където  $\bar{y}$  е средноаритметичната стойност на действителните стойности, изчислена по формулата (4.39):

$$(4.39) \quad \bar{y} = \frac{\sum y_i}{n}$$

Изчислената стойност на критерия на Фишер за получения модел е  $F = 612$ , докато коефициентът на множествена корелация (квадратният корен на коефициента на определяне  $R^2$ ) е 0,978.

Критичната таблична стойност на критерия на Фишер за отхвърляне на нулевата хипотеза за незначителност на модела е  $F_t(0,05) = 2,05$ , за ниво на значимост  $\alpha = 0,05$  и степени на свобода  $\nu = n-1$ , Изчислената стойност

значително надвишава стойността на таблицата, което показва детерминистичната природа на доброто съответствие на получения математически модел. Следователно може да се счита, че получения модел е проверен.

## **Заключения и изводи към Глава 4**

В Глава 4 е представено управлението, функционалните области и архитектурната рамка на електроннолъчевите процеси. Разгледано е автоматичното управление на вакуумната и охладителна системи на намираща се в ИЕ-БАН инсталация за електроннолъчево заваряване, изпарение и повърхностна модификация (ИЕЛЗИПМ). На база на проведени експерименти са оценени модели, описващи отделни модули, системи и елементи от електроннолъчевата инсталация. Направен е проект за управление, базиран на налични и допълнителни технически средства за автоматизация. Получени са преходните характеристики на параметрите на процеса, които са критични за времетраенето на въвеждането в работен режим и спиране на работата на инсталацията. Оценените параметри на преходните характеристики са уточнени чрез минимизиране на средноквадратичната грешка по отношение на стойностите на времезакъсненията. На базата на алгоритъма на работа на инсталацията са начертани Ладер диаграмите на процеса на пускането ѝ. Направена е идентификация на технологичните параметри, свързани с процесите пускане и спиране на инсталацията, които са критични за времетраенето на целия работен цикъл. Разгледан е методът на сканирането с променлива стъпка, чрез минимизиране на средно квадратичната грешка RMSE, чрез които са изчислени преходните характеристики на температурата на дифузионната помпа и , ниското и високото налягане (пускане) във вакуумната камера. Представена е изчислената зависимост на достигната скорост на изпомпване от налягането във вакуумната камера. Изследвана е зависимостта на налягането във вакуумната камера от времето при работа само на ротационната помпа РП1. Разгледани са методите за отклонение на електронния лъч в световни и наши изследвания. Представена е симулация и емпирично е показана възможността за отклонение на електронния лъч чрез промяна на тока, приложен към отклоняващите електромагнитни намотки, разположени в електронната пушка. Разгледано е управлението на процеса отлагане на материал чрез електронен лъч при ЕЛПМ Показан е математически модел на вълновата форма на рентгеновото лъчение на бремсстралунг като елемент, имащ честотен спектър на изходната форма на вълната, дадени периодични колебания на електронния лъч през телта.

Математическият модел позволява да се открият компонентите на формата на вълната от сензор. Резултатите от численото изпълнение са сравнени с експериментални данни, получени по време на лабораторния експеримент. Сравнението показва добро съответствие между теоретичните и лабораторните данни. Експериментите са проведени при условия, близки до теоретичните параметри. За да се оцени правилността на предположенията и за да се провери адекватността на получения модел, резултатите от симулацията са сравнени с експериментални данни. Докато волфрамовата тел се движи с постоянна скорост в посока, перпендикулярна на електронния лъч, лъчът се колебае в същата посока. Компютърен сензор за данни, оборудван с многоканален аналогово-цифров интерфейс, е използван за запис на рентгеновата форма на вторичното рентгеново лъчение бремсстралунг. В същото време е записана форма на вълната, пропорционална на тока в отклоняващата бобина. Резултатите от записа са записани във файл за последваща обработка. Амплитудите на бремсстралунговата форма с честота на трептене са изчислени с помощта на експериментални проби от данни с помощта на метода на синхронно детектиране. Полученият математически модел е проверен с помощта на лабораторни и теоретични данни чрез изчисляване на средната грешка на приближение или средното отклонение на изчислените стойности от действителните стойности. Извършена е проверка на значимостта на получения модел с помощта на теста на Фишер, чиято изчислена стойност се намира като съотношение на дисперсията на първоначалната серия от наблюдения на изследвания индикатор и безпристрастна оценка на дисперсията на остатъчната последователност за този модел.

## **Глава 5. Управление на движението на кръгов манипулатор чрез микроконтролер и използването му за повърхностна модификация на неръждаема стомана тип 316L**

### **5.1. Използвани елементи за извършване на управление на кръгов манипулатор**

Разработена е система за управление на кръгов манипулатор с помощта на микроконтролера Arduino Uno. Манипулаторът се задвижва от стъпков биполярен мотор [46]. Направено е калибриране на движението на кръговия манипулатор, в права и обратна на часовниковата стрелка посоки. Оценени са модели за скоростта на движение на кръговия манипулатор в зависимост от времезакъснението между стъпките на мотора, оценена е грешката при различните скорости на въртене на манипулатора. Определен

е работен диапазон за скорости на въртене в права и обратна на часовниковата стрелка посоки.

Разработената система за управление на кръгов манипулатор е показана на Фиг. 5.1.



Фиг. 5.1. Кръгов манипулатор

Тя се състои от следните елементи:

1. микроконтролер Arduino Uno,
2. биполярен стъпков мотор,
3. манипулатор, състоящ се от неподвижна основа и движеща се чрез зъбци горна част, съставена от няколко закрепени помежду си елементи (резбован диск, определящ рамото на въртящи момент, с диаметър 7 mm, големият диск е с диаметър  $\varnothing$  15 cm и е градуиран за по-голямо удобство при работа),
4. редуктор, състоящ се от винт и полутвърда връзка, която позволява по-мекото предаване на въртящия момент от стъпковия мотор към манипулатора,
5. драйвер за стъпкови мотори A4988 на Allegro.

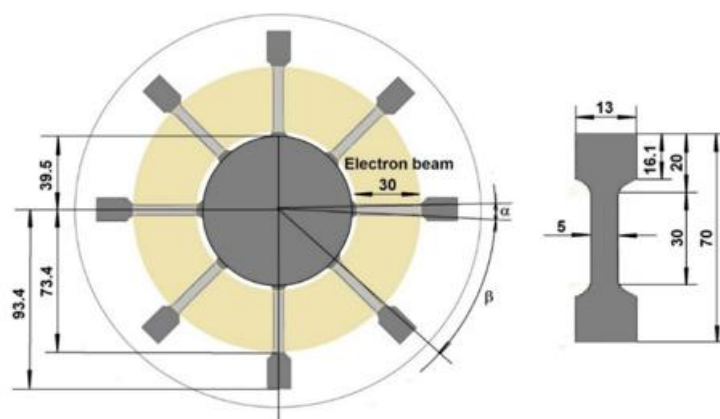
Използваният биполярен мотор има 200 стъпки за оборот, с ъгъл на стъпка от 1.8 градуса. Той се захранва с напрежение 24 V, консумира до 1.2 A и осигурява въртящ момент от 3.2 kg/cm, има съпротивление на намотка 3.3  $\Omega$  и индуктивност 2.8mH на фаза. Валът на мотора е с диаметър 5 mm, D-образен и с дължина 24 mm.

Драйверът A4988 разполага с регулируем ограничител на силата на тока и дава възможност да се избират от пет различни размера на стъпката, с която да се движи мотора. Работи с напрежения от 8 V до 35 V и може да подава до 2 A на намотка и има защита по ток.

Полутвърдата връзка между валовете на стъпковия мотор и манипулатора се осъществява чрез шинни лентички с широчина на лентичката 5 mm и дължина 30 mm. Пластините са свързани към валовете

на мотора и манипулатора чрез дискчета с широчина от 5 mm. Общото разстояние между стъпковия мотор и манипулатора е 80 mm.

За провеждане на експериментите, за модифициране на повърхността на осем неръждаеми стоманени проби чрез облъчване с електронен лъч във вакуум (Фиг. 5.3), първоначално е необходимо да се определи броя на оборотите (стъпките) на мотора, необходими за направата на пълен оборот на подвижната част на кръговия манипулатор [48]. Установено е, че пълното завъртане на кръговия манипулатор съответства на 4012 стъпки ( $1.8^\circ$ ) или 20.08 пълни оборота на вала на мотора.



Фиг. 5.3. Експериментална настройка за модифициране на повърхността на осем неръждаеми стоманени (316L) проби чрез облъчване с електронен лъч във вакуум

При направеното изследване скоростта на движение на биполярния стъпков мотор се променя чрез времезакъснението между стъпките на движение на биполярния стъпков мотор  $\tau$ . Това от своя страна променя скоростта на движение диска на манипулатора за сметка на пропорционалното увеличение на въртящия момент. Измерено е времето  $T_{пр}$  за завъртането на манипулатора на 1 оборот ( $360^\circ$ ) в права и  $T_{обр}$  времето за завъртане в обратна на часовниковата стрелка посоки. Всеки от експериментите е повторен 5 пъти, с цел определяне на грешките при различните скорости на въртене. В Табл. 5.1 са представени, изчислените средни стойности за времената  $T_{пр}$  и  $T_{обр}$  и съответните дисперсии  $s_u^2$ , определени по формулите(5.1)

$$(5.1) \quad \bar{y}_u = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{ui} \quad s_u^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_{ui} - \bar{y}_u)^2 \quad u = 1, 2, \dots, N,$$

където:

- n е броят на повторенията (n=5);
- N е броя на скоростите, при които са снети данни (N=18),

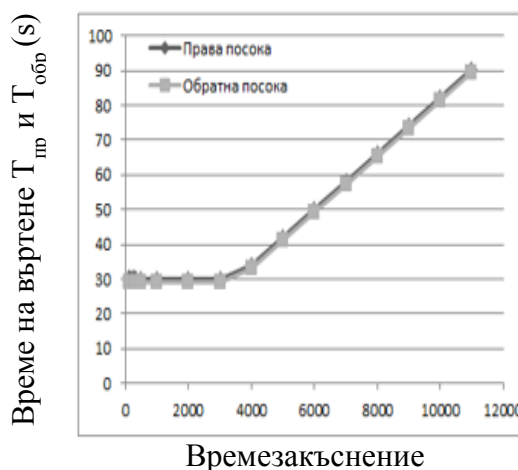


-  $y_{ui}$  са отчетените експериментални времена в права и обратна на часовниковата стрелка посоки при дадена скорост ( $u$ ) и някои от повторенията ( $i$ ).

Табл. 5.1: Експериментални резултати

| №  | $\tau$      | $T_{пр}$ | $s^2_{пр}$ | $T_{обр}$ | $s^2_{обр}$ | D      |
|----|-------------|----------|------------|-----------|-------------|--------|
|    | [ $\mu s$ ] | [s]      | [ $s^2$ ]  | [s]       | [ $s^2$ ]   | [°]    |
| 1  | 100         | 30,24    | 0,09025    | 29,118    | 0,00502     | 361,13 |
| 2  | 150         | 30,13    | 0,00348    | 29,188    | 0,03872     | 361,38 |
| 3  | 200         | 30,19    | 0,00473    | 29,112    | 0,02102     | 361,25 |
| 4  | 250         | 31,23    | 0,04693    | 29,254    | 0,14368     | 361,50 |
| 5  | 300         | 30,15    | 0,00982    | 29,000    | 0,02490     | 361,13 |
| 6  | 350         | 30,14    | 0,00323    | 29,060    | 0,01245     | 361,25 |
| 7  | 500         | 30,03    | 0,0242     | 29,080    | 0,00800     | 361,25 |
| 8  | 1000        | 30,12    | 0,00482    | 29,096    | 0,01498     | 361,75 |
| 9  | 2000        | 30,10    | 0,00892    | 29,040    | 0,00595     | 362,00 |
| 10 | 3000        | 30,05    | 0,01047    | 28,998    | 0,03312     | 361,88 |
| 11 | 4000        | 34,04    | 0,00402    | 32,986    | 0,02183     | 362,25 |
| 12 | 5000        | 42,07    | 0,01502    | 41,058    | 0,02337     | 362,13 |
| 13 | 6000        | 50,07    | 0,03258    | 49,056    | 0,07778     | 361,00 |
| 14 | 7000        | 58,24    | 0,00107    | 57,158    | 0,03517     | 361,75 |
| 15 | 8000        | 66,28    | 0,01083    | 65,234    | 0,01193     | 362,00 |
| 16 | 9000        | 74,37    | 0,01022    | 73,336    | 0,00368     | 362,50 |
| 17 | 10000       | 82,47    | 0,00383    | 81,324    | 0,04043     | 362,25 |
| 18 | 11000       | 90,51    | 0,01332    | 89,368    | 0,03797     | 362,75 |

На Фиг. 5.4 е представено времето за завъртане в права и обратна на часовниковата стрелка посоки  $T_{пр}$  и  $T_{обр}(s)$  в зависимост от времезакъснението  $\tau$  [ $\mu s$ ] между стъпките на движение на биполярния стъпков мотор ( $\mu s$ ). Вижда се, че почти няма разлика в измерените времена в двете посоки (разликата е от порядъка на 1 секунда).



Фиг. 5.4. Време за завъртане в права и обратна на часовниковата стрелка посоки (s) в зависимост от времезакъснението  $\tau$  между стъпките на движение на биполярния стъпков мотор ( $\mu s$ )

Оценените модели за времената  $T_{np}$  [s] и  $T_{обр}$  [s] в зависимост от времезакъснението  $\tau$  [ $\mu s$ ] са (5.2, 5.3):

$$(5.2) \quad T_{np} = \begin{cases} 30.14, & \text{за } \tau \leq 3ms \\ 4.087 + 0.0077986 \tau, & \text{за } \tau \geq 3ms \end{cases}$$

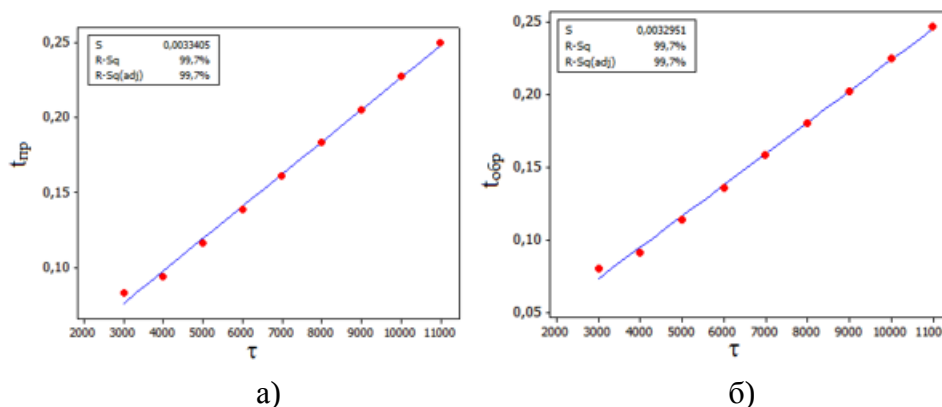
$$(5.3) \quad T_{обр} = \begin{cases} 29.09, & \text{за } \tau \leq 3ms \\ 3.103 + 0.0077871 \tau, & \text{за } \tau \geq 3ms \end{cases}$$

За характеризиране на движението на кръговия манипулатор са определени стойностите на скоростите на въртене  $\omega$  на манипулатора (градуси/секунда) и времето за завъртане  $t$  на  $1^\circ$  (секунди/градус), в зависимост от времезакъснението  $\tau$  между стъпките на движение на биполярния стъпков мотор, при отчитане на ъгълите на завъртане  $D$  и приемането, че те са еднакви в права и обратна посоки (5.4, 5.5):

$$(5.4) \quad t_{np} = \begin{cases} 0.08344, & \text{за } \tau \leq 3ms \\ 0.011619 + 0.00002149 \tau, & \text{за } \tau \geq 3ms \end{cases}$$

$$(5.5) \quad t_{обр} = \begin{cases} 0.0805, & \text{за } \tau \leq 3ms \\ 0.008896 + 0.00002146 \tau, & \text{за } \tau \geq 3ms \end{cases}$$

Получените зависимости са изобразени на Фиг. 5.7 за стойности на времезакъснението  $\tau$  между стъпките на движение на биполярния стъпков мотор над  $3000 \mu s$ .



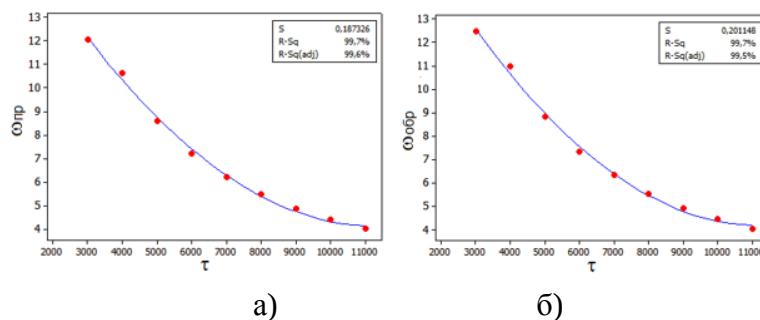
Фиг. 5.7. Времето за завъртане  $t$  на  $1^\circ$  (секунди/градус) в зависимост от времезакъснението  $\tau$  в а) права и б) обратна на часовниковата стрелка посоки

На фигурите с точки са означени получените данни на база експерименти, а с непрекъснати линии са представени предсказаните стойности чрез оценените модели. Регресионните модели на скоростите на въртене  $\omega$  на манипулатора за времезакъснения  $\tau$  над 3000  $\mu\text{s}$  и съответните коефициенти на множествена корелация  $R$  са представени в Табл. 5.2.

Табл. 5.2: Регресионни модели от втори ред за скоростите на въртене  $\omega$  на манипулатора в зависимост от времезакъснения  $\tau$  над 3000  $\mu\text{s}$

|                       | Регресионни модели                             | $R$    |
|-----------------------|------------------------------------------------|--------|
| $\omega_{\text{пр}}$  | $18.9706 - 0.0026251 \tau + 0.00000012 \tau^2$ | 0.9985 |
| $\omega_{\text{обр}}$ | $19.8183 - 0.0027897 \tau + 0.00000012 \tau^2$ | 0.9985 |

Коефициентите на множествена корелация  $R$ , както и коефициентите на детерминация  $R_2$  ( $R\text{-sq}$ ), са мярка за точността на моделите, изменят се в диапазон от 0 до 1 и колкото по-близки са до 1 толкова по-точни са ценените модели. Получените нови зависимости са представени на Фиг. 5.8.

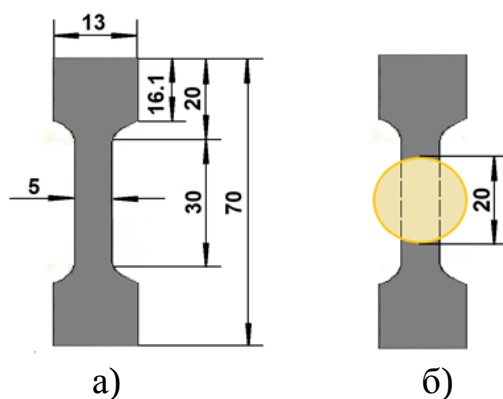


Фиг. 5.8. Скорости на въртене  $\omega$  на манипулатора (градуси/секунда) в зависимост от времезакъснението  $\tau$  в а) права и б) обратна на часовниковата стрелка посоки

### 5.3. Повърхностна модификация на неръждаема стомана тип 316L

В [A5] е представено изследване на изменението на механичните свойства на стомана 316L след модификация на повърхността с електронен лъч. Пробите са обработени в инсталация в ИЕ БАН - ЕЛИТ – 60. Експериментите са проведени с промяна на мощността на лъча в диапазона от 0,6 до 0,9 kW и различни времена на облъчване между 1 и 120 секунди. На получените резултати е извършен регресионен анализ.

Дебелината на облъчените образци е 0.5 mm и на Фиг. 5.11, а) са дадени техните размери. За извършване на експериментите няколко (до 6-7) плочи са поставени върху масивен блок от неръждаема стомана, предпазващ медния водоохлаждаем тигел във вакуумната камера.



Фиг. 5.11. Размери на а) облъчените образци (mm) и б) облъчената електронния лъч област

В [A5] образци от аустенитна неръждаема стомана 316L (SS 316L) са облъчени в инсталация с електронен лъч с мощност 60 кВт и по този начин се осъществява модификация на повърхността на обработените тънки плочи. За да се изучи влиянието на изменението на параметрите на процеса върху промените в механичните свойства на тънките стоманени пластини SS 316 е извършен първоначален набор от експерименти и комбиниран с някои нови експерименти. Изследва се влиянието на параметрите на процеса - мощността на електронния лъч и времето на облъчване и микроструктурите на тестваните проби. Оценени са регресионни модели за зависимостите на механичните свойства на облъчените образци от параметрите на процеса на промяна на електронния лъч. Многокритериалната оптимизация на изискванията за механичните

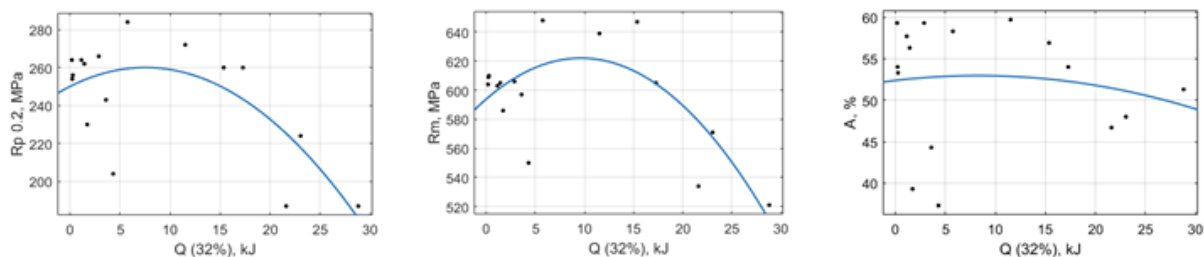
свойства се извършва с помощта на подход за цялостна функция на желателност и подход на Парето - оптимизация.

Първоначалният експериментален план е допълнен с няколко нови експеримента (последните три опита в Табл. 5.6) за изследване на влиянието на изменението на параметрите на обработка на мощността на електронен лъч ( $z_1$ ) и времето на облъчване ( $z_2$ ) върху промените в механичните свойства на тънките пластини SS 316L.

Табл. 5.6. Резултати от изпитвания при облъчване с електронен лъч на образци от стомана SS 316L

| No. | $z_1$ , kW | $z_2$ , s | $x_1$ | $x_2$      | $R_{p0.2}$ , MPa | $R_m$ , MPa | A, % | $Q_{EB}$ , kJ |
|-----|------------|-----------|-------|------------|------------------|-------------|------|---------------|
| 1   | 0.6        | 1         | -1    | -1         | 264              | 604         | 59.3 | 0.6           |
| 2   | 0.6        | 6         | -1    | -.91596639 | 264              | 603         | 57.7 | 3.6           |
| 3   | 0.6        | 15        | -1    | -.76470588 | 266              | 606         | 59.3 | 9.0           |
| 4   | 0.6        | 90        | -1    | 0.49579832 | 260              | 605         | 54.0 | 54.0          |
| 5   | 0.6        | 120       | -1    | 1          | 224              | 571         | 48.0 | 72.0          |
| 6   | 0.75       | 1         | 0     | -1         | 254              | 609         | 54.0 | 0.75          |
| 7   | 0.75       | 6         | 0     | -.91596639 | 262              | 605         | 56.3 | 4.5           |
| 8   | 0.75       | 15        | 0     | -.76470588 | 243              | 597         | 44.3 | 11.25         |
| 9   | 0.75       | 90        | 0     | 0.49579832 | 187              | 534         | 46.7 | 67.5          |
| 10  | 0.75       | 120       | 0     | 1          | 187              | 521         | 51.3 | 90.0          |
| 11  | 0.9        | 1         | 1     | -1         | 256              | 610         | 53.3 | 0.9           |
| 12  | 0.9        | 6         | 1     | -.91596639 | 230              | 586         | 39.3 | 5.4           |
| 13  | 0.9        | 15        | 1     | -.76470588 | 204              | 550         | 37.3 | 13.5          |
| 14  | 0.6        | 30        | -1    | -.51260504 | 284              | 648         | 58.3 | 18.0          |
| 15  | 0.6        | 60        | -1    | -.00840336 | 272              | 639         | 59.7 | 36.0          |
| 16  | 0.6        | 80        | -1    | 0.32773109 | 260              | 647         | 56.9 | 48.0          |

Фиг. 5.13 представя зависимостта на механичните свойства 0.2% условна граница на провлачване  $R_{p0.2}$ , якост на опън  $R_m$  и относително удължение след разрушаване  $A_{30}$  на входната топлинна енергия на образца  $Q_s$  (32% от топлинната енергия на електронния лъч  $Q_{EB}$ ). Фигурите потвърждават липсата на пряка зависимост между вложената топлинна енергия и механичните свойства.



Фиг. 5.13. Зависимост на механичните свойства 0.2% условна граница на провлачване  $R_{p0.2}$ , якост на опън  $R_m$  и относително удължение след разрушаване  $A_{30}$  върху входната проба топлинна енергия  $Q_s$  (32% от топлинната енергия на електронния лъч  $Q_{EB}$ ).

Следователно, механичните свойства и структурите на облъчените проби могат да бъдат контролирани от параметрите на процеса на мощност на електронния лъч и време на облъчване. За тази цел е необходима оценка на влиянието на разглежданите параметри на процеса върху механичните свойства на третираните проби SS 316, заедно с тяхната едновременна оптимизация.

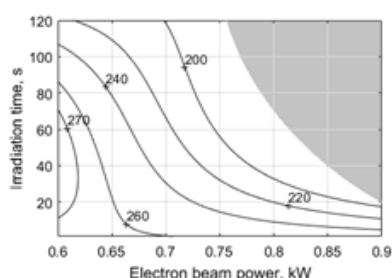
#### 5.4. Моделиране на свойствата на стоманата 316L

Основен инструмент е използването на регресионен анализ, свързан с намирането на количествена връзка между входните и изходните променливи. В [A1] е проведен и статистически анализ на получения модел, който има за цел определяне на адекватността му при предсказване на дадена изходна величина, като смущенията в процеса лесно се определят чрез регистриране на изходния процес, когато сигналът е постоянен. Прогнозните регресионни модели за кодирани, стойностите на параметрите на процеса са представени в Таблица 5.8, заедно със стойностите на коефициентите на определяне  $R^2$  (квадратен коефициент на корелация R) и коригираните коефициенти за определяне  $R_{adj}^2$ , което не зависи от остатъчните степени на свобода за оценените модели [42].

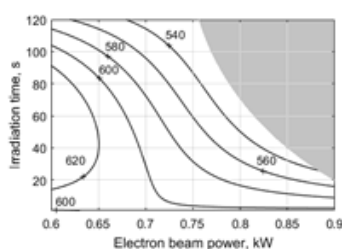
Табл. 5.8. Регресионни модели

| Регресионни модели |                                                                                                | $R^2$ , % | $R_{adj}^2$ , % |
|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------------|
| $R_{p0.2}$         | $197.1177 - 77.387397x_1 - 35.423583x_2 + 25.884715x_2^2 - 15.22466x_1x_2 + 56.740372x_1x_2^2$ | 97.537    | 96.306          |
| $R_m$              | $559.00776 - 86.074997x_1 - 43.054884x_2 - 26.730194x_1x_2 + 61.930022x_1x_2^2$                | 93.672    | 91.370          |
| $A_{30}$           | $40.391703 - 18.390113x_1 + 13.328137x_2^2 + 5.1566054x_1x_2 + 19.094406x_1x_2^2$              | 86.743    | 81.922          |

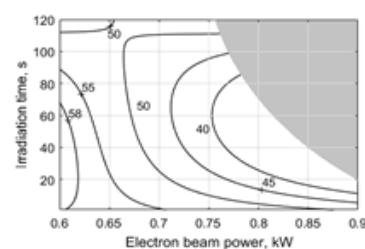
Фиг. 5.14 представя контурните участъци на механичните свойства: а) 0.2% условна граница на провлачване  $R_{p0.2}$ , б) якост на опън  $R_m$  и в) относително удължение след разрушаване  $A_{30}$  като функция от параметрите на процеса – мощност на електронния лъч ( $z_1$ ) и време за облъчване ( $z_2$ ).



а)



б)



в)

Фиг. 5.14. Контурни участъци на механичните свойства: а) 0.2% условна граница на провлачване  $R_{p0.2}$ , б) якост на опън  $R_m$  и в) относително удължение след разрушаване  $A_{30}$  на пластини от SS 316L като функция от параметрите на процеса – мощност на електронния лъч ( $z_1$ ) и време за облъчване ( $z_2$ ).

Задачата за оптимизация в [A5] е свързана с едновременното максимизиране на всички механични свойства на обработените пластини от SS 316L и може да бъде формулирана по следния начин:

$$\begin{cases} R_{p0.2}(z_1, z_2) \rightarrow \max & \text{for } 0.6 \leq z_1 \leq 0.9 \text{ kW}, 1 \leq z_2 \leq 120 \text{ s}, \\ R_m(z_1, z_2) \rightarrow \max & \text{for } 0.6 \leq z_1 \leq 0.9 \text{ kW}, 1 \leq z_2 \leq 120 \text{ s}, \\ A(z_1, z_2) \rightarrow \max & \text{for } 0.6 \leq z_1 \leq 0.9 \text{ kW}, 1 \leq z_2 \leq 120 \text{ s}. \end{cases}$$

Средните стойности, изчислените стойностите с помощта на регресионните модели, стандартните отклонения и абсолютните грешки са изчислени за всички механични свойства и са показани в Табл. 5.13.

Табл. 5.13. Резултати – валидиращи експерименти

| t, s                  | P, kW | $R_{p0.2}$ , MPa | $R_m$ , MPa | $A_{30}$ , % |
|-----------------------|-------|------------------|-------------|--------------|
| 43                    | 0.6   | 272              | 632         | 60.3         |
| 43                    | 0.6   | 281              | 647         | 58.6         |
| 43                    | 0.6   | 278              | 659         | 59.3         |
| 43                    | 0.6   | 262              | 648         | 57.7         |
| Средна стойност       |       | 273.25           | 646.50      | 58.975       |
| Оценена стойност      |       | 277.78           | 644.53      | 59.80        |
| Стандартно отклонение |       | 8.38             | 11.09       | 1.100        |
| Абсолютна грешка, %   |       | 1.6              | 0.3         | 1.4          |

В [A1] е разгледана 0,2% пластична деформация чрез представянето на 2 фактора като входни променливи на инсталацията за електроннолъчево заваряване: фактор 1 – време на облъчване и фактор 2 – мощност на електронния лъч. За отчитане на влиянието на ефекта от тези два фактора, всеки от които има стойности от 3 нива.  $L18 (6^1 3^1)$  в ортогоналния масив на Тагучи се предполага, че няма взаимодействие между два фактора, които влияят на критериите за ефективност. В Табл. 5.14 са представени експерименталните данни, влияещи на механичните свойства на стомана SS316L

Табл. 5.14. Експериментални данни

| №  | фактор А –<br>Време [s] | фактор В –<br>мощност [kW] | 0,2% пластична<br>деформация[R <sub>0.2</sub> ] |
|----|-------------------------|----------------------------|-------------------------------------------------|
| 1  | 1                       | 0,6                        | 264                                             |
| 2  | 1                       | 0,75                       | 254                                             |
| 3  | 1                       | 0,9                        | 256                                             |
| 4  | 6                       | 0,6                        | 264                                             |
| 5  | 6                       | 0,75                       | 262                                             |
| 6  | 6                       | 0,9                        | 230                                             |
| 7  | 12                      | 0,6                        | 1                                               |
| 8  | 12                      | 0,75                       | 1                                               |
| 9  | 12                      | 0,9                        | 246                                             |
| 10 | 15                      | 0,6                        | 266                                             |
| 11 | 15                      | 0,75                       | 243                                             |
| 12 | 15                      | 0,9                        | 204                                             |
| 13 | 90                      | 0,6                        | 260                                             |
| 14 | 90                      | 0,75                       | 187                                             |
| 15 | 90                      | 0,9                        | 1                                               |
| 16 | 120                     | 0,6                        | 224                                             |
| 17 | 120                     | 0,75                       | 187                                             |
| 18 | 120                     | 0,9                        | 1                                               |

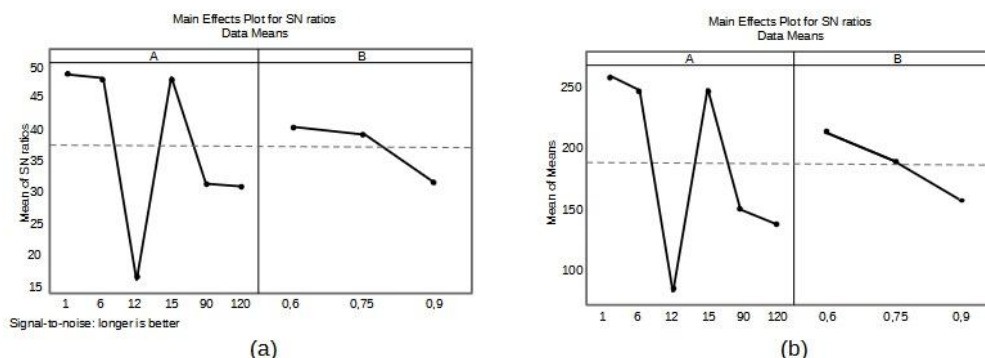
Чрез анализ по метода на Тагучи са получени данни за съотношението на сигнал/шум и средните стойности на времето и мощността в отношение на пластичната деформация – Табл. 5.15.

Табл. 5.15. Съотношение сигнал/шум и средни стойности

| Ниво  | сигнал/шум |       | средни стойности |        |
|-------|------------|-------|------------------|--------|
|       | А          | В     | А                | В      |
| 1     | 48.23      | 40.11 | 258.00           | 213.17 |
| 2     | 48.01      | 39.17 | 252.00           | 189.00 |
| 3     | 15.94      | 31.57 | 82.67            | 156.33 |
| 4     | 47.47      |       | 237.67           |        |
| 5     | 31.25      |       | 149.33           |        |
| 6     | 30.81      |       | 137.33           |        |
| Delta | 32.29      | 8.54  | 175.33           | 56.83  |
| Rank  | 1          | 2     | 1                | 2      |



На Фиг. 5.17 са представени съотношението сигнал/шум (a) и средните стойности (b) на времето и мощността на лъча спрямо пластичната деформация на облъчените пластини.



Фиг. 5.17. Съотношение сигнал/шум (a) и средни стойности (b)

По метода на Тагучи за проектиране на експеримента (DOE – design of experiment) са пресметнати регресионните уравнения за факторите А (1) и В (2):

$$(1) \quad A = 68.1 - 0.147 R_{0.2}$$

$$(2) \quad B = 0.8010 - 0.000274 R_{0.2}$$

В Табл. 5.17 са представени данните от дисперсионния анализ за времето на облъчване на пробите и мощността на електронния лъч.

Табл. 5.17. Дисперсия на времето на облъчване и електронния лъч

|                         |                  | DF | Adj SS  | Adj MS  | F-Value | P-Value |
|-------------------------|------------------|----|---------|---------|---------|---------|
| за времето на облъчване | Регресия         | 1  | 4058    | 4058    | 1.86    | 0.191   |
|                         | $R_{0.2}$        | 1  | 4058    | 4058    | 1.86    | 0.191   |
|                         | Грешка           | 16 | 34892   | 2181    |         |         |
|                         | Несъответствие   | 11 | 25330   | 2303    | 1.20    | 0.446   |
|                         | Абсолютна грешка | 5  | 9562    | 1912    |         |         |
|                         | Общо             | 17 | 38950   |         |         |         |
| за мощността на лъча    | Регресия         | 1  | 0.01401 | 0.01401 | 0.88    | 0.363   |
|                         | $R_{0.2}$        | 1  | 0.01401 | 0.01401 | 0.88    | 0.363   |
|                         | Грешка           | 16 | 0.25599 | 0.01600 |         |         |
|                         | Несъответствие   | 11 | 0.19412 | 0.01765 | 1.43    | 0.366   |
|                         | Абсолютна грешка | 5  | 0.06187 | 0.01238 |         |         |
|                         | Общо             | 17 | 0.27000 |         |         |         |

Изчислените регресионни модели дават връзката между механичните свойства на облъчените проби, мощността на електронния лъч и времето на облъчване. За да бъде направена оптимизация на желано механично

свойство според избора на параметрите на процеса на модифициране на повърхността и конкретното приложение на материала, зависимостите следва да бъдат моделирани. На база регресионните уравнения е извършен дисперсионен анализ, за да се оцени модела за зависимостта на изследваната пластична деформация от параметрите на процеса на модификация на електронния лъч: мощността на електронния лъч и времето на облъчване.

## **Заклучения и изводи към Глава 5**

В Глава 5 са представени експерименталните резултати по управлението на кръгов манипулатор чрез платформата Ардуино при използването му в установка осъществяване на процеса на повърхностна модификация на неръждаема стомана тип 316L. Представени са блоковете и елементите на специално изградената подсистема за управление на кръговия манипулатор, чието задвижване е осъществено с помощта на стъпков мотор. Определен е броят на стъпките на мотора, необходими за реализиране на пълен оборот на подвижната част на манипулатора. Извършено е изследване на скоростта на движение на биполярния стъпков мотор в зависимост от времезакъснението  $\tau$  между стъпките на ъгловото преместване. Това от своя страна променя скоростта на движение на диска на манипулатора за сметка на пропорционалното увеличение на въртящия момент. Извършени са 5 експеримента с цел определяне на грешките при различните скорости на въртене. За характеризиране на движението на кръговия манипулатор са определени стойностите на скоростите на въртене  $\omega$  на манипулатора (градуси/секунда) и времето за завъртане  $t$  на  $1^\circ$  (секунди/градус), в зависимост от времезакъснението  $\tau$  между стъпките на движение на биполярния стъпков мотор при отчитане на ъглите на завъртане  $D$  и приемането, че те са еднакви в права и обратна посоки. Извършено е изследване на изменението на механичните свойства на стомана 316L след модификация на повърхността с електронен лъч. Пробите са обработени в инсталация в ИЕ БАН - ЕЛИТ – 60. Извършено е изследване на влиянието на параметрите на процеса – мощността на електронния лъч и времето на облъчване и микроструктурите на тестваните проби. Оценени са регресионни модели за зависимостите на механичните свойства на облъчените образци от параметрите на процеса на промяна на електронния лъч. Моделирането на свойствата на стоманата 316L е осъществено чрез използването на регресионен анализ, свързан с намирането на количествена връзка между входните и изходните променливи. Проведен е статистически анализ на получения модел, който има за цел определяне на адекватността му при предсказване на дадена

изходна величина, като смущенията в процеса лесно се определят чрез регистриране на изходния процес, когато сигналът е постоянен. Разгледана е 0,2% пластична деформация чрез представянето на 2 фактора като входни променливи на инсталацията за електроннолъчево заваряване: фактор 1 – време на облъчване и фактор 2 – мощност на електронния лъч. Чрез анализ по метода на Тагучи са получени данни за съотношението сигнал/шум и средните стойности на времето и мощността в отношение на пластичната деформация. На база регресионните уравнения е извършен дисперсионен анализ, за да се оцени модела за зависимостта на изследваната пластична деформация от параметрите на процеса на модификация на електронния лъч: мощността на електронния лъч и времето на облъчване.

## **НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ**

### **Научно-приложни приноси**

1. С помощта на метода на синхронно детектиране и на базата на експериментално получени данни е създаден математически модел на процеса на електронно-лъчево заваряване.
2. Разгледано е управлението на процеса на отлагане на материал чрез електронен лъч при ЕЛПМ. Показан е математически модел на вълновата форма на рентгеновото лъчение на бремсстралунг като елемент, имащ честотен спектър на изходната форма на вълната, дадени периодични колебания на електронния лъч през телта. Математическият модел позволява да се открият компонентите на формата на вълната от сензор. Резултатите от численото изпълнение са сравнени с експериментални данни, получени по време на лабораторния експеримент.
3. Оценени са регресионни модели за зависимостите на механичните свойства на облъчените образци от параметрите на процеса на промяна на електронния лъч. Многокритериалната оптимизация на изискванията за механичните свойства се извършва с помощта на подход за цялостна функция на желателност и подход на Парето – оптимизация, многокритериалната оптимизация се използва с цел максимално увеличаване на всички изследвани механични свойства. Прогнозните модели се проверяват чрез провеждане на експерименти с модификация на повърхността на електронния лъч на проби от неръждаема стомана 316L при стойности на параметрите на процеса, равни на изчислените оптимални.
4. Разгледана е 0,2% пластична деформация чрез представянето на 2 фактора и е извършен анализ по метода на Тагучи. Получени са данни

за съотношението на сигнал/шум и средните стойности на времето и мощността в отношение на пластичната деформация. На база регресионните уравнения е извършен дисперсионен анализ, за да се оцени модела за зависимостта на изследваната пластична деформация от параметрите на процеса на модификация на електронния лъч: мощността на електронния лъч и времето на облъчване.

### **Приложни приноси**

1. Представени са методи за намирането на оптимални стойности на управляемите фактори, които могат да бъдат приложени при оптимизирането на процесите при ЕЛПМЛЗ.

2. Представено е автоматичното управление на вакуумната и охладителна системи на намираща се в ИЕ-БАН инсталация за електроннолъчево заваряване, изпарение и повърхностна модификация (ИЕЛЗИПМ).

3. На базата на данни от реално проведени експерименти са оценени модели, описващи отделни модули, системи и елементи от електроннолъчевата инсталация.

4. От резултатите на проведените експерименти са представени преходните характеристики на параметрите на процеса, които са критични за времетраенето на въвеждането в работен режим и спиране на работата на инсталацията. Оценените параметри на преходните характеристики са уточнени чрез минимизиране на средно квадратичната грешка по отношение на стойностите на времезакъснението.

5. На базата на алгоритъма на работа на инсталацията са начертани Ладер диаграмите на процеса на пускането ѝ. Направена е идентификация на технологичните параметри, свързани с процесите пускане и спиране на инсталацията, които са критични за времетраенето на целия работен цикъл.

6. Разгледани са методите за отклонение на електронния лъч в световни и национални изследвания. Представена е симулация и емпирично е показана възможността за отклонение на електронния лъч чрез промяна на тока, приложен към отклоняващите електромагнитни намотки, разположени в електронната пушка.

### **СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД**

1. Володя Джаров, Ясен Горбунов, „Оптимизационни подходи при електроннолъчево заваряване, повърхностна модификация и литография“, Сборник с доклади от Национална научно – техническа конференция с международно участие „АВТОМАТИЗАЦИЯ В МИННАТА ИНДУСТРИЯ И МЕТАЛУРГИЯТА “БУЛКАМК’22, ISSN: 1314-4537, 27 – 28.X. 2022г;

2. V Dzharov, E Koleva, V Vassileva, R Yordanova, S Yankova. Modelling of the mechanical properties of steel 316L after EB treatment. 13-th Int. Conf. on Electron Beam Technologies – EBT2018, 18-22 June 2018, Varna, Bulgaria, Journal of Physics: Conference Series, 1089 (1), 012004, 2018, doi: 10.1088/1742-6596/1089/1/012004, ISSN: 1742-6588 <http://stacks.iop.org/1742-6596/1089/i=1/a=012004>, (JIR =0.241);

3. Elena Kolva, Volodya Dzharov, Peter Yordanov. Automation control of EBW installation by SIMATIC S7-300 PLC. 12th Int. Conf. on Electron Beam Technologies – EBT2016, 13-18 June 2016, Varna, Bulgaria, ELEKTROTECHNICA & ELEKTRONICA E+E, Vol. 51. №5-6/2016, ISSN 0861-4717;

4 E. Koleva, V. Dzharov, Movement Control of Rotary Manipulator by Arduino Controller, International Scientific Conference “High technologies. Business. Society 2016”, 14-17 March 2016, Borovets, Bulgaria, V. 5/191pp. 47-50, 2016, ISSN: 1310-3946;

5. Volodya Dzharov, „CONTROL OF THE ELECTRON BEAM DEFLECTION SYSTEM OF AN ELECTRON BEAM INSTALLATION” (21-26) // Евразийский Союз Ученых. Физико - математические науки. 2020/08/20; 76(2):21-26, DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2020.2.76.900, Выпуск: 76, Том: 2, Страницы в выпуске: 21-26, ISSN: 2411-6467 (Print), ISSN: 2413-9335 (Online), <https://euroasia-science.ru>

## **SUMMARY**

The thesis presents the formulation of the task and a proposed description of the approaches used to solve it. We have considered different methods for finding optimal values of the controllable factors that can be applied in the optimization of the processes at Electron Beam Surface Modification, Lithography and Welding (EBSMLW). A literary analysis of the research carried out on the application of Electron beam technologies such as Electron beam welding and electron beam surface modification has been made. For the purposes of the analysis of the processes in EBT, the method of regression analysis is presented, which is a direction in mathematical statistics with the help of which the functional relationships between dependent random variables are analyzed. The method of multi-criteria optimization through a desirability function is discussed, which will be used in the study of the mechanical properties of samples irradiated with an electron beam in the EBI-60 installation. The principles of operation of Siemens and Arduino Programmable controllers used to control the installation and the manipulator are presented. Vacuum systems, vacuum installations, vacuum sensors, vacuum pumps and the vacuum chamber used in the operation of electron beam technology installations are examined. Methods of testing the mechanical properties of stainless steel specimens are discussed, which are part of the objectives covered in Chapter 5. The management, functional areas, and architectural framework of electron beam processes are presented. The automatic control of the vacuum and cooling systems of an installation

for electron beam welding, vaporization and surface modification located in IE-BAS was examined. On the basis of conducted experiments, models describing individual modules, systems and elements of the electron beam installation were evaluated. A management project was made based on available and additional technical means of automation. The transient characteristics of the process parameters, which are critical for the duration of the start-up and shutdown of the installation, have been obtained. The estimated parameters of the transient characteristics are refined by minimizing the root mean square error with respect to the time delay values. On the basis of the plant's operation algorithm, the ladder diagrams of the process of its launch are drawn. The technological parameters related to the start-up and shutdown processes of the installation, which are critical for the duration of the entire work cycle, have been identified. The method of variable step scanning was considered, by minimizing the root mean square error RMSE, by which the transient characteristics of the temperature of the diffusion pump and , the low and high pressure (release) in the vacuum chamber were calculated. The calculated dependence of the reached pumping speed on the pressure in the vacuum chamber is presented. The dependence of the pressure in the vacuum chamber on the time during operation of only the rotary pump RP1 was investigated. The methods of electron beam deflection in world and our researches are considered. A simulation is presented and the possibility of deflecting the electron beam by changing the current applied to the deflecting electromagnetic coils located in the electron gun is empirically shown. The control of the material deposition process by electron beam in ELSM is considered. A mathematical model of the bremsstrahlung X-ray waveform is shown as an element having the frequency spectrum of the output waveform given periodic oscillations of the electron beam through the wire. The results of the numerical implementation are compared with experimental data obtained during the laboratory experiment. The comparison shows good agreement between theoretical and laboratory data. The experiments were carried out under conditions close to the theoretical parameters. In order to evaluate the correctness of the assumptions and to verify the adequacy of the obtained model, the simulation results were compared with experimental data. A computer data sensor equipped with a multi-channel analog-digital interface was used to record the X-ray form of the secondary bremsstrahlung X-ray. At the same time, a waveform proportional to the current in the deflection coil is recorded. The recording results are saved to a file for post-processing. The amplitudes of the bremsstrahlung shape with oscillation frequency were calculated using experimental data samples using the synchronous detection method. The significance of the obtained model was checked using the Fisher test, the calculated value of which is found as the ratio of the variance of the initial series of observations of the studied indicator and an unbiased estimate of the variance of the residual sequence for this model. The experimental results on the control of a manipulator through the Arduino platform and its use for surface modification of stainless steel type 316L are discussed. The elements for performing control of the circular manipulator by means of a stepper motor are presented. The number of revolutions (steps) of the motor necessary to make a full revolution of the

movable part of the circular manipulator is determined. A study of the motion speed of the bipolar stepper motor was carried out and it was found that it is changed by the time delay between the motion steps of the bipolar stepper motor  $\tau$ . 5 experiments were performed in order to determine the errors at different rotation speeds. The time  $T_{sd}$  for turning the manipulator 1 revolution ( $360^\circ$ ) in the straight direction and  $T_{osd}$  the time for turning in counter-clockwise directions was measured. The time delay  $\tau$  between the steps of the bipolar stepper motor was examined in the range of 3 ms to 11 ms and it was found that the change in the standard deviation  $s$  was already statistically stable at upper control limits for the standard deviation. To characterize the movement of the circular manipulator, the values of the rotation speeds  $\omega$  of the manipulator (degrees/second) and the rotation time  $t$  per  $1^\circ$  (seconds/degree) are determined, depending on the time delay  $\tau$  between the steps of the bipolar stepper motor movement, considering the angles of rotation  $D$  and assuming that they are the same in forward and reverse directions. The study shows that the first-order approximations of the rotation speeds  $\omega$  of the manipulator ( $^\circ/s$ ) are not good enough, and second-order models giving better results are evaluated. A study of the change in the mechanical properties of 316L steel after electron beam surface modification was carried out. The samples were processed in an installation at IE BAS - EBI - 60. The experiments were carried out with a change in the beam power in the range from 0.6 to 0.9 kW and different irradiation times between 1 and 120 seconds. The focal length of the electron beam is 340 mm, and the spot size of the electron beam is 20 mm in diameter and changes to 30 mm at the expense of the deflection angle. Irradiation was stopped before melting the samples. A regression analysis was performed on the obtained results. A study of the influence of the process parameters - the power of the electron beam and the irradiation time - and the microstructures of the tested samples was carried out. Regression models were evaluated for the dependences of the mechanical properties of the irradiated samples on the parameters of the electron beam change process. The multi-criteria optimization of the mechanical property requirements is performed using an overall desirability function approach and a Pareto optimization approach. The predictive models are verified by conducting electron beam surface modification experiments on 316L stainless steel samples at process parameter values equal to the calculated optimum. The study was carried out in accordance with the standard EN ISO 6892 -1: 2016. Laboratory test results are shown for the mechanical properties 0.2% notional yield strength  $R_{p0.2}$ , tensile strength  $R_m$  and relative elongation at break  $A_{30}$  after fracture (for 30 mm initial specimen length) of SS 316L specimens irradiated by defocused electron beam. The experimental results of the mechanical properties and structures of the irradiated samples show that they can be controlled by the process parameters electron beam power and irradiation time (and indirectly by the quality of the input thermal energy). For this purpose, an evaluation of the influence of the considered process parameters on the mechanical properties of the treated SS 316 samples is required, together with their simultaneous optimization. Modeling of the properties of the 316L steel was carried out by using regression analysis related to finding a quantitative relationship between the input and

output variables. A statistical analysis of the obtained model was also carried out, which aims to determine its adequacy in predicting a given output quantity, and disturbances in the process are easily determined by recording the output process when the signal is constant. 0.2% plastic deformation was considered by introducing 2 factors as input variables of the electron beam welding plant: factor 1 – irradiation time and factor 2 – electron beam power. Signal-to-noise ratio and time-averaged and power-averaged data with respect to plastic deformation were obtained by Taguchi analysis. Based on the regression equations, a variance analysis was performed to evaluate the model for the dependence of the studied plastic deformation on the parameters of the electron beam modification process: the electron beam power and the irradiation time.