

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА
МАШИННО-ТЕХНОЛОГИЧЕН ФАКУЛТЕТ
КАТЕДРА МАТЕРИАЛОЗНАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ НА
МАТЕРИАЛИТЕ

инж. ИВАЙЛО ЙОРДАНОВ НЕДЕЛЧЕВ

**ИЗСЛЕДВАНЕ ЕФЕКТИВНОСТТА НА ПЛАЗМОТРОН С ВИХРОВА
СТАБИЛИЗАЦИЯ НА ДЪГАТА В ПРОЦЕСА
ПЛАЗМЕНО-ПРАХОВО НАПЛАСТЯВАНЕ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация за получаване на образователна и научна степен

„Доктор“

Научна специалност: ”Технология на машиностроителните материали”
шифър: 05.01.01

Научни ръководители:

1. проф. д-р инж. Христо Костов Скулев
2. доц. д-р инж. Росен Николов Василев

Рецензенти:

- 1.....
- 2.....

ВАРНА
2015

Дисертационният труд е обсъден на в катедра “Материалознание и технология на материалите ” на разширен катедрен съвет, съгласно заповед на Ректора на ТУ-Варна № и насочен за защита.

Докторантът работи в катедра “Теоретична и измервателна електротехника”.

Автор: инж.Ивайло Йорданов Неделчев

Заглавие: Изследване ефективността на плазмотрон с вихрова стабилизация на дъгата в процеса плазмено-прахово напластяване

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА
МАШИННО-ТЕХНОЛОГИЧЕН ФАКУЛТЕТ
КАТЕДРА МАТЕРИАЛОЗНАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ НА
МАТЕРИАЛИТЕ

инж. ИВАЙЛО ЙОРДАНОВ НЕДЕЛЧЕВ

**ИЗСЛЕДВАНЕ ЕФЕКТИВНОСТТА НА ПЛАЗМОТРОН С ВИХРОВА
СТАБИЛИЗАЦИЯ НА ДЪГАТА В ПРОЦЕСА ПЛАЗМЕНО-
ПРАХОВО НАПЛАСТЯВАНЕ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация за получаване на образователна и научна степен

„Доктор“

Научна специалност: ”Технология на машиностроителните материали”

шифър: 05.01.01

ВАРНА
2015

Дисертационният труд съдържа 194 страници (основният текст е изложен в 155 страници), включително 63 фигури, 33 таблици, 3 приложения, 106 математически зависимости, оформени в увод, 5 части (обзорна с изводи, цели и задачи на дисертацията; разработка на методики за провеждане на научните изследвания и обработка на получените данни и резултати, разработка на система за мониторинг и изследване в реално време; планиране на експеримента и определяне на основните технологични и оптимизационни параметри на режима, предварителни изследвания относно измервания плазмотрон, получаване и проверка адекватността на моделите при пълния факторен експеримент, проверка за стационарност и ергодичност на получените сигнали; изчисление влиянието на главните технологични параметри, получаване на честотни зависимости на изследваните сигнали; определяне коефициента на полезно действие и коефициента на стабилност на плазмотрона, разработване на оптимален технологичен режим; общи изводи и заключения и основни приноси), списък с публикациите на автора по темата на дисертационния труд, списък на използваната литература от 108 заглавия, от които 55 на кирилица и 53 на латиница и 3 приложения.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на ----- от ----ч. в открито заседание на жури, сформирано със заповед на Ректора №-----/-----г. Материалите по защитата (дисертацията, рецензиите и становищата) са на разположение на заинтересуваните се във ФД „Докторанти“, стая 318 НУК.

I. Обща характеристика на дисертацията

1. Актуалност на проблема

Един от най-бързоразвиващите се и динамични методи за обработване на материалите чрез високоинтензивно нагряване, това са плазмените електротехнологии. Плазмено-праховото напластяване в настоящия момент представлява една авангардна и перспективна технология. То намира все по-широко приложение при възстановяване профила и формата на износени машинни елементи, за получаването на метални покрития с висока степен на износоустойчивост и корозионна устойчивост, за предварителна подготовка на повърхности с цел повишаване на ресурсните параметри на детайли, в медицината и стоматологията за нанасяне на керамични покрития върху метални основи и в много други отрасли.

За получаването на качество при ниска себестойност е необходимо предварително изследване и оптимизация на процеса от гледна точка на неговата ефективност. Предвид неговата специфика това може да стане чрез едновременно измерване в реално време на основни величини в определени контролни точки от цялата система. Един от методите за постигането на тази задача е чрез използването на мониторингова система за сбор на данни или т.нар. DAQ (Data Acquisition) система. Използването на такава система дава изчерпателна информация и чрез обработка на получените данни се създава детайлна картина на процесите в плазмотрона. Това значително би улеснило задачата за оптимизацията на режимите и повишаването на ефективността при плазмено-праховото напластяване.

2. Цел и задачи на дисертацията

Основна цел на дисертацията е: Изследване ефективността на плазмотрон с вихрова стабилизация на дъгата в процеса плазмено-прахово напластяване.

Така поставената цел се решава чрез съответните конкретни задачи:

1. Получаване на предварителни данни за оценка на волт-амперната характеристика на АПН-50 и температурата на плазмената струя.
2. Планиране експеримента с цел определяне значимите фактори оказващи влияние върху ефективността на процеса плазмено-прахово напластяване.
3. Оценка на влиянието на технологичните параметри върху електрическите величини на системата.
4. Изследване и изготвяне на реална оценка на електрическия, топлинния и общия КПД на апаратурата за плазмено напластяване АПН-50.
5. Оценка стабилността на апаратурата за плазмено-прахово напластяване при основните работни режими.
6. Разработка на технологичен режим за напластяване на прахови материали на никелова основа на база получените и обработени данни от изследването.

3. Обект и място на изследване

Обект на изследване в настоящата работа е методът за плазмено-прахово напластяване в частност ефективността на плазмотрон с вихрова стабилизация на дъгата, като

се установят технологичните възможности на метода за оптимизиране режимните параметри по теоретичен и експериментален път и се създадат методики и средства, обезпечаващи цялостния мониторинг на процеса както и повишаването на качеството на покритията и производителността.

Изследванията са проведени в базата на фирма „PLAZMA” ЕООД гр.Аксаково и лаборатория 309Е по „Електрически измервания“ в катедра „Теоретична и измервателна електротехника“ към Технически Университет – Варна.

4. Научна новост на изследването

Като научна новост може да се определи предложената методика за изследване и мониторинг на процесите при индиректен плазмотрон; получените теоретични резултати определящи влиянието на основните технологични фактори; доказаната адекватност на получените математични модели при планирания експеримент за установяване на влиянието на основните технологични фактори; дефинирането и получаването на практически данни за ефективността и стабилността на плазмотрона при изследваните технологични режими; доказан критерий за стабилност на дъгата в процеса плазмено-прахово напластяване; доказана методика за изчисление на общия коефициент на полезно действие на индиректен плазмотрон; разработеният пакет програми чрез който е извършено изследването. Технологичните изследвания и данни също могат да бъдат отнесени към новите резултати, тъй като допринасят за попълване знанията за протичането на процеса плазмено-прахово напластяване с прахове на никелова основа и за по-ефективно и рационално използване на апаратурата за плазмено-прахово напластяване.

5. Реализация на резултатите

Основните практически приноси се отнасят до приложение на метода на плазмено-праховото напластяване с прахове на никелова основа, усъвършенстване и оптимизация на използвания индиректен плазмотрон. Оптимизирането на режимните параметри на процеса чрез предложената методика за мониторинг с оглед подобриенето на различни конструкции на индиректни плазмотрони и съставяне на конкретни технологии за плазмено-прахово напластяване с прахове на никелова основа, също е реален практически принос на разработката.

Практическа реализация на метода е разработването на технологичен режим за плазмено-прахово напластяване, чрез който се постига максимална ефективност на процеса при високо качество на покритията.

6. Аprobация на резултатите

Основните резултати от изследванията са докладвани и публикувани в следните научни форуми и издания:

- Известия на съюза на учените във Варна - 1, 2012г., ISSN: 1310-5833.
- Международна конференция “Електроенергетика 2014”, ISBN 978-954-20-0497-4 2014г.
- XIX научен симпозиум с международно участие “Метрология и метрологично осигуряване 2009” - гр. Созопол, 10 -14 септември 2009г.
- Трети международен научен конгрес, ТУ-Варна, България, 4 - 6 Октомври 2012г.
- сп. „Машиностроителна техника и технологии“, 2014г. ISSN 1310-5833.

- Работата е одобрявана периодично и като цяло на заседания на катедра „МТМ“ при МТФ на ТУ-Варна.

7. Публикации по дисертацията

Основните етапи от разработването на дисертационния труд са отразени в 6 публикации, списък на които е приложен в края на автореферата.

В автореферата е приета номерация на фигурите и формулите, съответстваща на тази от дисертацията.

II. Кратко изложение на основните резултати от дисертацията

ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРЕН ОБЗОР

В прегледа на литературата е разгледан индиректен плазмотрон с вихрова стабилизация на дъгата. Разгледан е и процесът на самоустановяване на електрическата дъга в камерата на плазмотрона, както и основни възли от апаратурата. Представени са различни модели на електрическата дъга и критериите за нейната пространствена и параметрична стабилност. Дефинирани са: коефициентът на полезно действие и коефициентът на стабилност и е анализирана системата газов процеп - захранващ източник, като основен елемент на изследване в оборудването за плазмено напластяване. В края на главата са направени изводи от литературното проучване и са формулирани целта и задачите на дисертационната работа.

ГЛАВА 2. ИЗПОЛЗВАНА АПАРАТУРА И МЕТОДИКИ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

В тази глава са разгледани основните модули на апаратурата за напластяване на индиректния плазмотрон АПН-50. Разгледана е в детайли системата за сбор на данни и използваните измервателни преобразуватели за трансформиране на измерваните сигнали и е направен преглед на методиките за настоящите изследвания. Показани са начините за планиране на експеримента и е избран подходящ план за оценка на влиянието на главните технологични фактори в процеса. Показани са математическите методи за обработка на получените сигнали, които имат случаен характер. Разгледана е софтуерната среда в която са разработени програмите за измерване и мониторинг на процеса.

ГЛАВА 3. ПРЕДВАРИТЕЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ

3.1. Основни фактори, влияещи върху стабилността на електрическата дъга и ефективността на плазмено-праховото напластяване

Факторите, влияещи върху стабилността на електрическата дъга и ефективността на процеса плазмено-прахово напластяване могат да бъдат разпределени в две основни групи:

- А. Конструктивни;
- Б. Технологични.

Броят и силата на влияние на конструктивните параметри, зависи силно от вида на плазмотрона: начина на установяване и фиксиране на дъгата, броя на камерите, място, брой и ъгъл на въвеждане на транспортния газ и праха и т.н. Безспорно е влиянието и на технологичните параметри. Тъй като те изразяват динамиката на процеса, разхода на производствени ресурси и енергоемкостта, то те са пряк показател за стабилността на електрическата дъга и ефективността на плазмотрона.

Практиката показва, че за стандартен еднокамерен плазмотрон основните конструктивни параметри са между 15 и 20, докато технологичните са около 10-12 на брой. Технологичните параметри с най-голямо значение са показани в таблица 3.1

В резултат на анализа за целите на изследването са избрани два плазмообразуващи газа: аргон като основен и транспортен и азот като допълнителен. В такъв случай след като е ясен изборът на основен, допълнителен и на транспортен плазмообразуващ газ, основните технологични параметри, които оказват влияние на стабилността и енергоемкостта на процеса са от x_1 до x_6 в таблица 3.1.

№	Означение	Единица	Наименование
x_1	I	A	ток
x_2	$Q_{\text{опг}}$	l/min	разход на основен плазмообразуващ газ
x_3	$Q_{\text{дпг}}$	l/min	разход на допълнителен плазмообразуващ газ
x_4	$Q_{\text{прах}}$	gr/h	дебит на прах
x_5	$Q_{\text{тг}}$	l/min	разход на транспортен газ
x_6	$Q_{\text{охл}}$	kg/h	дебит на охлаждащия агент
x_7	G1	-	вид на основния плазмообразуващ газ
x_8	G2	-	вид на допълнителния плазмообразуващ газ
x_9	Gt	-	вид на транспортния газ
x_{10}	Ni(смес)	-	вид на праха за напластяване

От тях параметрите x_5 и x_6 съответно разход на транспортен газ и дебит на охлаждащия агент са с много слабо влияние върху процеса в сравнение с останалите четири параметъра, което се обяснява със следното:

- Дебитът на транспортен газ като цяло е под 5-7% от този на плазмообразуващите газове. При граници на вариране на този фактор в рамките дори на 50% от основното му ниво, то следва да се получи изменение под 5% в сравнение с цялото количество газ преминало през дюзата на плазмотрона. Това означава, че при планирането на експеримента, факторът е с малка тежест и може да се пренебрегне.

- Фактор x_6 има по-скоро отношение към конструкцията на цялата система, тъй като макар и свързан с динамиката на топлообмена, дебита на охлаждащия агент не се променя по време на експеримента, но оказва влияние на топлинния баланс и работната точка на плазмотрона. Това означава, че в условията на експериментите за кой да е модел плазмотрон монтиран към апаратурата, той е строго фиксиран и неговото влияние е константно за всички опити.

От горните разсъждения следва, че за изследване влиянието на технологичните параметри върху стабилността на дъгата и ефективността на процеса, най-голямо влияние оказват четирите основни параметъра: x_1 , x_2 , x_3 и x_4 . Тяхното влияние може да бъде анализирано чрез методиката за планиране на многофакторен експеримент, описана в глава II.

3.2. Определяне коефициентите на регресия в математическия модел при ПФЕ

За получаване на математическия модел е избран оптимален композиционен план В4. Диапазонът на изменение на факторите има три основни нива – долно, основно и горно. Избира се среден интервал на вариране на факторите (от ± 25 до $\pm 100\%$) и за основното ниво се прави извадка от девет паралелни опита. От технологичните параметри изброени по-горе в конкретика за самия експеримент са избрани факторите x_1 – x_4 от таблица 3.1, които са с най-голямо влияние.

В таблица 3.2 са дадени стойностите на съществените фактори по нивата на изменение и интервала на вариране.

Броят на опитите на план В4 е N=24. Броят на коефициентите в модела е k=15. Броят на факторите е избран m=4. Матрицата на планиране за план В4 е дадена в таблица 1 на Приложение II.

Моделът на план В4 може да се изрази с полинома:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^4 b_i x_i + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=i+1}^4 b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^4 b_{ij} x_i^2 \quad (3.1)$$

Таблица 3.2. Интервали и нива на вариране на съществените фактори					
Фактор		Интервал на изменение	Долно ниво (-1)	Средно ниво (0)	Горно ниво (1)
x1 (I _T)	A	100	300	400	500
x2 (Q _{Ar})	l/min	10	20	30	40
x3 (Q _N)	l/min	2	0	2	4
x4 (Q _{Ni})	gr/h	400	0	400	800

След решение на матричното уравнение (3.3) се намират коефициентите от вектора **B** на модела (3.1). По-долу са показани стойностите на векторите **B** за двата основни параметъра в изследването – стабилност на дъгата и ефективност на процеса. За ефективността коефициентите изразяват изходната електрическа мощност, тъй като тя е определяща за КПД. Това е така поради факта, че входната електрическа мощност при изследваните режими е константна и ефективността на преобразуване на енергията се изразява чрез мощността отделена от източника (УСИ). В такъв случай коефициентите изразяват мощност (W). Това са:

$$B = [12563; 3335; 1243,33; 3886,67; 63,33; 461,875; 939,375; -10,625; -240,625; 131,875; -45,625; 586,458; -468,542; 861,458; -1078,54];$$

За стабилността на дъгата, коефициентите в **B** изразяват динамичното съпротивление, изразено в милиомове (mΩ). Поради слабото влияние на източника на напрежение (неговото динамично съпротивление клони към нула $R_{дуси} \rightarrow 0$) значение за $K_{СТ}$ има динамичното съпротивление на дъгата. Коефициентите в този случай са:

$$B = [233,063; -49,6111; 11,1111; -33,0556; 1,16667; -13,5625; -8,8125; -5,4375; 4,3125; 9,9375; -14,0625; 16,9375; 5,4375; 5,9375; 1,9375].$$

Тогава след пресмятане на регресионните константи полиномът на модела за ефективността придобива вида:

$$U_{КПД} = 12563 + 3335\dot{x}_1 + 1243,33\dot{x}_2 + 3886,67\dot{x}_3 + 63,33\dot{x}_4 + 461,875\dot{x}_1\dot{x}_2 + 939,375\dot{x}_1\dot{x}_3 - 10,625\dot{x}_1\dot{x}_4 - 240,625\dot{x}_2\dot{x}_3 + 131,875\dot{x}_2\dot{x}_4 - 45,625\dot{x}_3\dot{x}_4 + 586,458\dot{x}_1^2 - 468,542\dot{x}_2^2 + 861,458\dot{x}_4^2 - 1078,54\dot{x}_4^2 \quad (3.8)$$

Аналогично за стабилността на дъгата моделът е:

$$U_{КСТ} = 233,063 - 49,611\dot{x}_1 + 11,111\dot{x}_2 - 33,056\dot{x}_3 + 1,167\dot{x}_4 - 13,563\dot{x}_1\dot{x}_2 - 8,813\dot{x}_1\dot{x}_3 - 5,438\dot{x}_1\dot{x}_4 + 4,313\dot{x}_2\dot{x}_3 + 9,938\dot{x}_2\dot{x}_4 - 14,063\dot{x}_3\dot{x}_4 + 16,938\dot{x}_1^2 + 5,438\dot{x}_2^2 + 5,938\dot{x}_4^2 + 1,938\dot{x}_4^2 \quad (3.9)$$

За проверката за адекватността на моделите са необходими: броят на опитите от матрицата на модела (N=24), броят на коефициентите в регресионното уравнение (k=15) и броят на проведените опити за даден режим (n=9). Тогава по броят на степените на свобода $v=N-k=9$ и чрез проведените опити в една точка от плана – $n-1=8$, от таблица 2 на Приложение II се установява табличното значение на коефициента на Фишер – F_T

при ниво на значимост $\alpha=0,05$. За двата модела се установява таблична стойност на коефициента на Фишер $F_T=3,4$. Изчислението на действителната стойност на този коефициент става чрез израза:

$$F = \frac{(n-1) \sum_{u=1}^N (y_u - \hat{y}_u)^2}{(N-k) \sum_{u=1}^n (y_u - \bar{y})^2}, \quad (3.10)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{u=1}^n y_u$$

където:

Моделът се приема за адекватен при:

$$F < F_T. \quad (3.11)$$

За модела на ефективността се изчислява коефициент на Фишер – $F_{\text{кнд}}=2,27$, докато съответният коефициент за модела на стабилността на дъгата е $F_{\text{кст}}=1,70$.

От направените изчисления се доказва адекватността и на двата модела, тъй като се изпълнява условие (3.11).

От така получените модели се установява, че най-голямо влияние върху изследваните два изходни параметъра имат фактори x_1 и x_3 , а именно работен ток (I_T) и дебит на азот (Q_N). Значително по-слабо е влиянието на дебита на аргон (Q_{Ar}), и пренебрежимо малко на дебита на праха за напластяване (Q_{Ni}).

3.3. Волтамперна характеристика на източника и изходна мощност

За определяне особеностите на режима е необходимо предварително да се знае работната точка от ВАХ на изправителя. Тя е в силна зависимост от режимните параметри, касаещи плазмообразуването: в малка степен от фактор x_2 (Q_{Ar}) и в по-голяма от фактор x_3 (Q_N). По този начин става възможно да се снемат статичните и динамичните характеристики на режима.

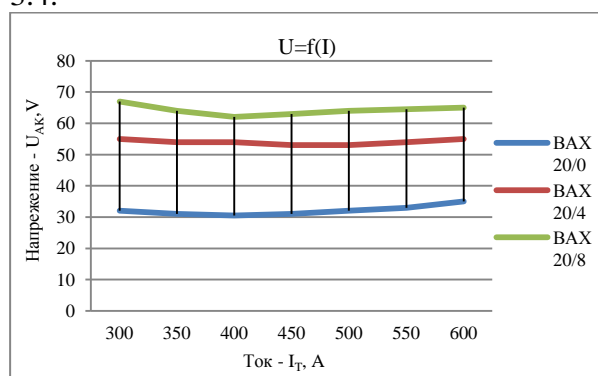
Таблица 3.4. ВАХ при вариране на фактори x_1 , x_2 и x_3									
	$Q_{Ar}=20\text{l/min}$			$Q_{Ar}=30\text{l/min}$			$Q_{Ar}=40\text{l/min}$		
I	Q_N	U	P	Q_N	U	P	Q_N	U	P
[A]	l/min	[V]	[kW]	l/min	[V]	[kW]	l/min	[V]	[kW]
300	0	32	9,6	0	36	11,4	0	37	11,1
	4	55	16,5	4	55	16,5	4	55	16,5
	8	67	20,1	8	62	18,9	8	65	19,5
	11	70	21	11	69	20,7	11	70	21
350	0	31	10,85	0	35	12,25	0	37,5	13,13
	4	54	18,9	4	55,5	19,43	4	56	19,6
	8	64	22,4	8	63	22,05	8	66	23,1
400	0	30,5	12,2	0	35	14	0	38	15,2
	4	54	21,2	4	56	22	4	58	23,2
	8	62	24,8	8	65	26	8	66,5	26,6
	11	70	28	11	72	28,8	11	72	28,8

В таблица 3.4 са показани измерванията за тока и напрежението при различни стойности на фактори x_2 (Q_{Ar}) и x_3 (Q_N). В условия на постепенно натоварване на източника чрез регулиране на работния ток от 300А до 600А, е измерено напрежението

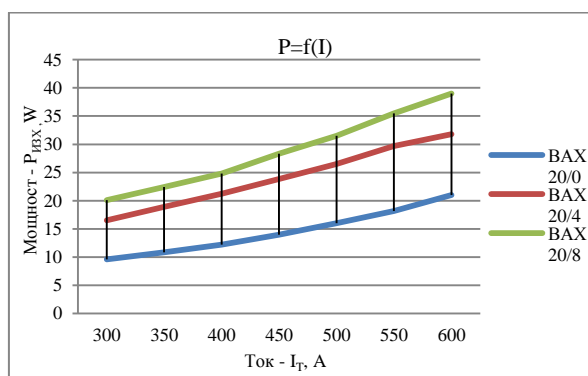
на изхода на УСИ. Измерването е извършено чрез използване на амперметър с обхват от 600А и външен шунт с параметри: $I=600\text{A}$ и $U=60\text{mV}$ и волтметър с обхват 300V. Клас на точност на използваните уреди: $A=1,0$.

	Таблица 3.4. ВАХ при вариране на фактори x_1 , x_2 и x_3								
	0	31	13,95	0	35,5	15,98	0	38	17,1
450	4	53	23,85	4	57	25,65	4	58	26,1
	8	63	28,35	8	65,5	29,48	8	67	30,15
	0	32	16	0	36	18	0	39	19,5
500	4	53	26,5	4	58	29	4	58,5	29,25
	8	64	31,5	8	66	32,5	8	68	34
	11	70	35	11	72	36	11	73	36,5
550	0	33	18,15	0	37	20,35	0	40	22
	4	54	29,7	4	58,5	32,18	4	59	32,45
	8	64,5	35,48	8	67	36,85	8	69,5	38,23
600	0	35	21	0	38	22,8	0	41	24,6
	4	55	31,8	4	59	34,8	4	60	36
	8	65	39	8	68	40,8	8	70	42
	11	72	43,2	11	72	43,2	11	75	45

ВАХ е получена при стойности на вариране на основните зависими фактори в широки граници. За фактор x_2 (Q_{AR}) границите бяха определени от 20l/min. до 50l/min., докато за фактор x_3 тези гранични стойности са от 0l/min. до 8l/min. Показана е и мощността, измерена на изхода на УСИ при всички нива на вариране на основните фактори. Графиките, отразяващи данните в таблица 3.4 са представени на фигури 3.1 – 3.4.

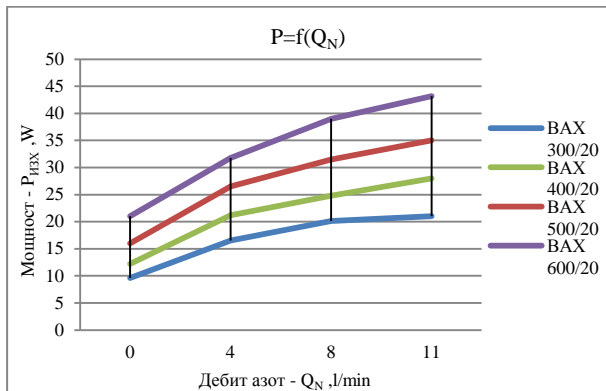


Фигура 3.1. ВАХ на УСИ при $Q_{AR}=20\text{ l/min}$ и $Q_N=0-8\text{ min}$.

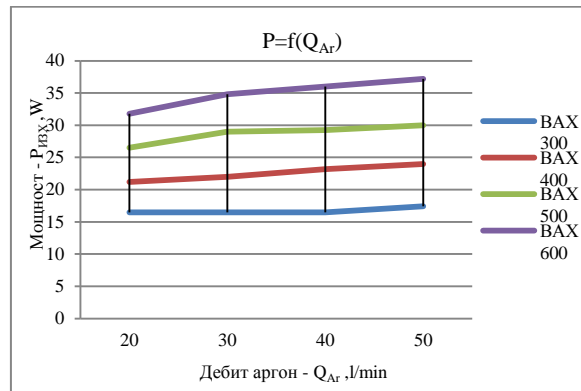


Фигура 3.2. Консумирана мощност в зависимост от работния ток при $Q_{AR}=20\text{ l/min}$ и $Q_N=0-8\text{ l/min}$.

Фигура 3.1 представя ВАХ на източника при различни нива на дебит на азота. Вижда се, че УСИ има характеристика на източник на напрежение, като нивото на отдаваната мощност нараства с увеличаване на дебита на азота (x_3). Фигури 3.2 - 3.4 показват факторите оказващи влияние на изходната мощност. От тях се установява, че от режимните параметри най-силно влияние върху изходната мощност оказва дебита на азот (x_3) както и работния ток, което е очаквано, тъй като в израза за мощността той е в пряка зависимост с нея. В по-малка степен $P_{изх}$ се изменя при промяната дебита на основния плазмообразуващ газ – аргона. Нарастването на $P_{изх}$ е незначително при двукратно и трикратно увеличение на дебита на аргон. Това се обяснява с по-ниската енталпия на аргона в сравнение с тази на азота (фигура 1 на Приложение I).



Фигура 3.3. Консумирана мощност в зависимост от дебита на азот при $Q_{AR}=20$ l/min и $I_T=300-600A$



Фигура 3.4. Консумирана мощност в зависимост от дебита на аргон при $Q_N=4$ l/min и $I_T=300-600A$

3.4. Коэффициент на полезно действие

Консумираната мощност от АПН-50 се разделя на две основни части: полезна – участваща пряко в процеса на напластяване - генерирането на плазма, разтопяването на праха за напластяване и нанасянето му върху детайла и загубна, която не е пряко свързана с напластяването – поддържа основните процеси и нормалната работа на апаратурата.

Полезната мощност се определя от:

1. Енергия за плазмообразуване – включва йонизационната и отделителната работа при генерирането на плазма от въведените газове. Тя е енергоемка защото включва фазовия преход газ-плазма.
2. Енергия за разтапяне на праха за напластяване – също включва енергия на фазов преход - твърдо тяло-течност.
3. Кинетичната енергия, която се предава на образуваната плазма. Тя е пропорционална на скоростта на потока, излизащ от дюзата на плазмотрона.
4. Енергия за нагряване основата за напластяване.

Загубната мощност зависи от множество процеси, съпътстващи плазмообразуването и прахоподаването. Основните ѝ съставки са:

1. Енергия, отдавана при охлаждането на плазмата от стените на газоразрядната камера.
2. Загряване на приелектродните области, където се захваща дъгата.
3. Изпарение на разтопения прах за напластяване.
4. Загуби в захранващия източник – изправител, трансформатор, дросел.

Излъчване – излъчване от дъгата и плазмената струя под формата на светлина, топлина и електромагнитно лъчение.

КПД на плазмотрона може да бъде разглеждан, като произведение от КПД на различните фази на трансформиране на енергията от захранващия източник до нанасянето на праховото покритие. Основно КПД се представя като:

$$\eta = \eta_E \cdot \eta_T, \quad (3.12)$$

където η_E е КПД на електрическия тракт до изхода на плазмотрона, а η_T е топлинния КПД на плазмотрона.

С помощта на измерените работен ток (I_T) и напрежение върху плазмотрона (U_{AK}), както и на входните трифазни електрически параметри (U_L , I_L), η_E се определя чрез отношението:

$$\eta_E = \frac{U_T \cdot I_T}{\sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L} \cdot 100\% \quad (3.13)$$

От друга страна топлинния КПД - η_T , представляващ отношението между мощността на изходящата плазма и входната електрическа мощност, може да се изрази чрез:

$$\eta_T = \frac{q_{\Pi}}{UI}, \quad (3.14)$$

където мощността на плазмата се изразява като:

$$q_{\Pi} = c_p QT. \quad (3.15)$$

В израза (3.15), c_p е специфичния топлинен капацитет на плазмообразувания газ, а Q е неговия дебит. За определяне на мощността на плазмата тогава, ключова роля има нейната средномасова температура – T . Тя може да бъде измерена или изчислена посредством следния израз :

$$T = \frac{\bar{E}I}{\pi d_k \alpha_k} \left[1 - e^{\left(-\frac{\pi d_k \alpha_k L_d}{c_p Q} \right)} \right], \quad (3.17)$$

където:

- L_d , m – дължина на дъгата;
- d_k , m – диаметър на камерата;
- \bar{E} , V/m – средна стойност на интензитета на електрическото поле по дължината на дъгата;
- U , V – напрежение на дъгата,
- I , A – ток на дъгата,
- q_{Π} , W – мощност на изходящата плазма.
- α_k , W/m²K – коефициент на топлопреминаване от плазмата към камерата.

Товага, израза за топлинния КПД ще се представи като:

$$\eta_{\Pi} = \frac{q_{\Pi}}{UI} = \frac{c_{pcp} QT}{UI} = \frac{\bar{E} c_{pcp} Q}{U \pi d_k \alpha_{kcp}} \left[1 - e^{\left(-\frac{\pi d_k \alpha_{kcp} L_d}{c_p Q} \right)} \right]. \quad (3.20)$$

Следователно, достатъчно е да бъде намерена средномасовата температура на плазмата, за да може да се установи топлинния КПД на плазмотрона.

С нарастване на дължината на дъгата мощността на газа и температурата нарастват рязко и КПД се стреми към максимум. Увеличаването на топлоотдаването към камерата на плазмотрона увеличава и загубите за охлаждане, което води до значително намаляване на КПД. Топлинният КПД изразява степента на преобразуване на електрическата енергия в топлинна енергия на плазмената струя на изхода на плазмотрона. Скоростта на изходящата плазма, също има значение при баланса на мощностите на плазмотрона, тъй като една част от електрическата мощност на дъгата придава скоростта на образуваната плазма в изходящата точка на дюзата. Нейният дял от общия дял на топлинната мощност на плазмата като цяло е малък, но за точността на изследването трябва и е възможно да бъде оценен. С помощта на изходната скорост на плазмата или дебита на газа, тази мощност може да бъде изчислена чрез:

$$q_v = F \cdot v_{\Pi} = p \cdot Q = p \cdot S \cdot v_{\Pi}, \quad (3.21)$$

където:

- q_v , W - кинетична мощност на плазмата,
- v_{Π} , m/s - скорост на плазмата,
- p , Pa - налягане на изхода на плазмотрона,
- Q , m³/s - дебит на плазмообразуващ газ,
- S , m² - сечение на дюзата на плазмотрона.

С помощта на (3.15) – (3.19), се установява дялът на кинетичната мощност от общата топлинна мощност на плазменния поток. За два режима (P1 – $Q_{Ar}/Q_N=20/2l/min$ (300A) и P2 – $Q_{Ar}/Q_N=40/4l/min$ (500A)) топлинната мощност на плазмената струя q_{Π} е изчислена на база измерени температури. Данните за топлинната и кинетичната мощ-

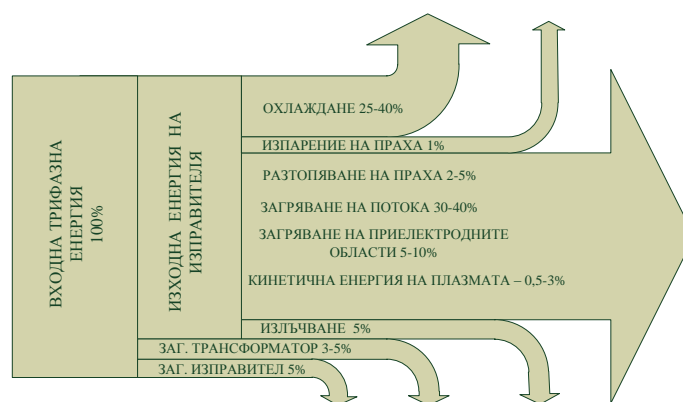
ност - q_{II} и q_V , както и тяхното процентно отношение са представени в таблици 3.10 – 3.12.

	T	c_p (Ar)	c_p (N)	Q (Ar)	Q(N)	q_{II}
	K	J/kg.K	J/kg.K	l/min	l/min	W
P1	10530	523	1042	20	2	2317
P2	16520	523	1042	40	4	7270

	p	Q (Ar)	Q(N)	q_v (Ar)	q_v (N)	q_v
	Pa	l/min	l/min	W	W	W
P1	10^5	20	2	34	3,4	65
P2	10^5	40	4	67	6,7	124,6

			Q_{Ar}/Q_N	Q_{Ar}/Q_N
			l/min	l/min
			20/2	40/4
P1	T1, K	10500	1,71	3,33
P2	T2, K	16500	0,55	1,07

Обща декомпозиция на входната електрическа мощност на процеса е представена на фигура 3.8. В мощността за загряването на газа се включва и тази за ускорението на плазмата при напускането на плазморона. Фигура 3.8 представя загубите на входната енергия от точката на присъединяване към трифазното захранване, до генерирането и напускането на плазмата и разтопения прах от дюзата на плазмотрона.



Фигура 3.8. Разпределение на входната енергия в процеса плазмено-прахово напластяване

3.5. Коэффициент на стабилност на дъгата

Тъй като K_{CT} се изразява чрез разликата между динамичните съпротивления на дъговия разряд и източника, то той ще зависи не само от тяхната абсолютна стойност,

но и от знака им. При спадаща характеристика на източника или електрическият разряд, динамичното им съпротивление е отрицателно. Чрез предварително намерената ВАХ на изправителя, може да се пресметне диференциалното съпротивление на източника в изследвания токов диапазон. От предварителното снемане на ВАХ на УСИ се установява, че тя е относително плавно спадаща. Тъй като ВАХ е „твърда“ характеристика, то УСИ проявява характер на източник на напрежение т.е. динамичното му съпротивление е отрицателно и твърде малко като стойност: $\frac{\partial U}{\partial I} \leq 0$. От друга страна работната точка на разряда се намира в стръмен падащ участък на кривата на ВАХ, там където той вече е преминал от тлеещ в дъгов. Стръмността на ВАХ на разряда е по-голяма от тази на източника. Като цяло системата е стабилна и тя основно зависи от динамичното съпротивление на електродъговия разряд. Следователно, ако разгледаме динамичното съпротивление като отношение на крайните нарастъци на напрежението и тока в изходната верига, клонящи към нула и разполагаме със съответните данни за от ВАХ на източника, то можем да определим K_{CT} за всеки един режим на работа. Изхождайки от данните в таблица 3.4, може да се пресметне динамичното съпротивление на източника. В таблица 3.13 са представени стойностите за динамичното съпротивление на източника.

I_T, A	$R_d, m\Omega$		
	$Q_N, = 0 \text{ l/min}$	$Q_N, = 2 \text{ l/min}$	$Q_N, = 4 \text{ l/min}$
300	-20	-20	-20
350	-10	-10	-10
400	10	0	-20
450	20	10	0
500	20	10	20

Стойностите от таблица 3.13 показват, че в диапазона на 300-350А има слабо спадане на ВАХ и в този участък $R_d < 0$, докато при работни токове около 400А характеристиката е почти хоризонтална на абцисата и $R_d \approx 0$. Положително динамично съпротивление се установява едва при високи работни токове от порядъка на 450-500А. Този характер на изменение на ВАХ е идентичен при дебити на плазмообразуващите газове $Q_N=0-4\text{l/min}$ и $Q_{Ar}=20-40\text{l/min}$. Като цяло стойностите на R_d са много малки и ВАХ проявява характер на източник на напрежение. В такъв случай стабилността на системата почти изцяло зависи от характера на изменение на електродъговия разряд и от стойността и знака на динамичното му съпротивление.

3.6. Обработка на измерените чрез NI-DAQ сигнали

Извършени са серия експерименти, целящи определянето на изходните величини в реално време при динамичен режим на работа на системата. Предвид стохастичните флуктуации на заряда в плазмения канал и промяната на неговата проводимост и геометрични размери, стойностите на измерваните величини имат случаен характер. Това налага тяхната статистическа обработка и съответно провеждането на многократни измервания.

Тези измервания са направени, като по време на процеса DAQ системата извършва серия записи, всеки от които за изследвания режим се състои от деветкратно записване на времедиаграма с продължителност 1сек. на работния ток I_T и напрежението U_{AK} между електродите на плазмотрона.

3.6.1. Проверка за стационарност

За достоверност на получените резултати е необходима проверка за стационарност и ергодичност на измерените случайни сигнали, както за напрежението, така и за тока. Проверката става по метода на сериите. Реализацията се разделя на равни 9-времени интервала. За всеки интервал се изчисляват математическото очакване и дисперсията съгласно изрази (2.15) и (2.16). На получените резултати се определя общата средна стойност - \bar{U}_{AKcp} и $\bar{\sigma}_{U_{AK}}^2$ и се сравняват с получените за всеки интервал. Ако $\bar{U}_{AKcp} > U_{AKi}$ се отразява знак (+), ако $\bar{U}_{AKcp} < U_{AKi}$ се отразява знак (-). Подреждат се знаците по реда на излизането им и последователността от еднакви знаци образуват серия - г. От таблица 3 на Приложение III се отчита критичната стойност - $r_{кр}$. Процеса е стационарен, ако $r > r_{кр}$.

Направена е проверка чрез получените реализации на основните режими за тока I_T : 300A, 400A и 500A и при дебит на азот Q_N : 0, 2 и 4 l/min.

За дискретизация при $n=9$, критерия за стационарност $r(v; \alpha/2) = 2,26$ при ниво на значимост $\alpha = 0,05$ (Приложение I таблица 3).

вид	резултати									Бр.
\bar{U}_{AKcp}	+	+	-	+	-	-	+	-	+	5
$\bar{\sigma}_{U_{AKcp}}^2$	+	-	-	+	+	-	-	+	+	5

Всички изследвани реализации удовлетворяват критерия за стационарност. При всички девет реализации се получават малки отклонения на стойността на измерваната величина от усреднената стойност.

вид	резултати									Бр.
\bar{I}_{Tcp}	+	+	-	+	-	-	+	-	+	5
$\bar{\sigma}_{I_{Tcp}}^2$	+	-	-	+	+	-	+	+	+	6

Средноквадратичното отклонение на случайните величини за всички режими бе в рамките на допустимата грешка при измерването и може да се счита, че измерените чрез автоматизираната DAQ система величини, проявяващи случаен характер са стационарни.

Процесите на поляризация в газа и краткотрайните промени на заряда в образуваната плазма около дъговия разряд, протичат за време $t_f=50-200\mu s$, а за нуждите на експеримента е изследван сигнал с продължителност $t_r=1s$.

$$t_r \gg t_f, \quad (3.25)$$

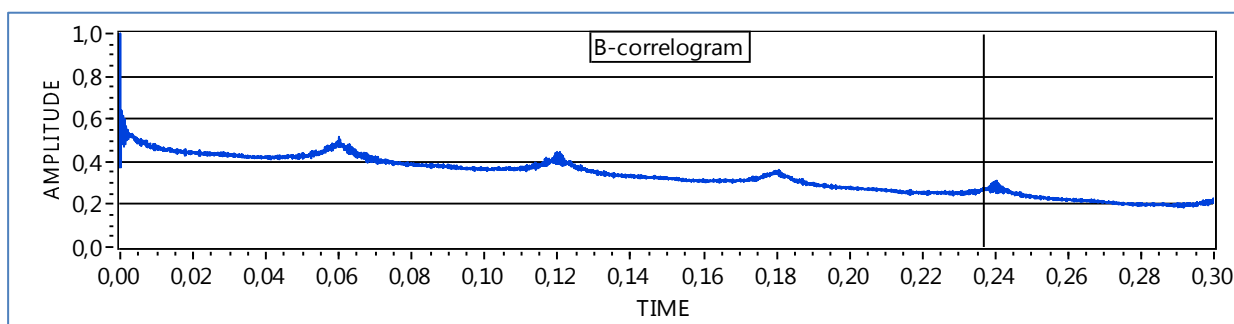
Усредняването на параметрите на изследвания случаен сигнал с време на една реализация многократно по-голямо от най-големия интервал на една флукуация в плазмения канал, е гаранция за ниски нива на случайната грешка и достоверност на получените резултати.

3.6.2. Проверка за ергодичност

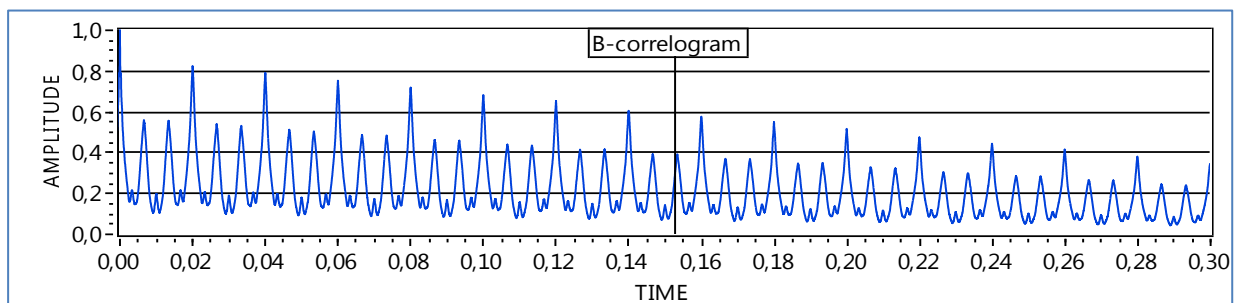
Проверката за ергодичност на случайните величини може да се осъществи като се изследва АКФ на сигнала. Изпълнението на условие (2.35) означава, че сигналът е ергодичен. След направените изчисления за U_{AK} и I_T , и построяване на АКФ на тези сигнали се оказва, че тя клони към нула при всички режими, което означава, че те са ергодични.

Характерът на АКФ при почти всички изследвани сигнали проявява по-силна или по-слаба периодичност, която може да бъде разкрита чрез прилагането на теоремата на Винер-Хинчин т.е. уравнение (2.32), даващо връзката на АКФ с честотния спектър на сигнала. АКФ е показателна за характера на изследваните случайни сигнали, защото е пряко свързана с честотния им спектър. Имайки предвид преобразуването на Фурие, периодичност в АКФ говори за наличие на съставки в случайните сигнали с точно определени честоти, които дават информация за процесите, протичащи в камерата на плазмотрона.

Така например режими, при които липсват нискочестотни пулсации на мощността в камерата на плазмотрона, се характеризират с по-плавни и слабо изразени пикове в АКФ. При тях също така се наблюдава слабо изразена периодичност, но с висока честота (фиг.3.10 – нормирана АКФ). При режими с големи пулсации на изходните величини, в АКФ се наблюдават стръмни пикове с голяма амплитуда и силно изразена нискочестотна периодичности (фиг.3.11 – нормирана АКФ).



Фигура 3.10. Режим с малки пулсации на изходните величини



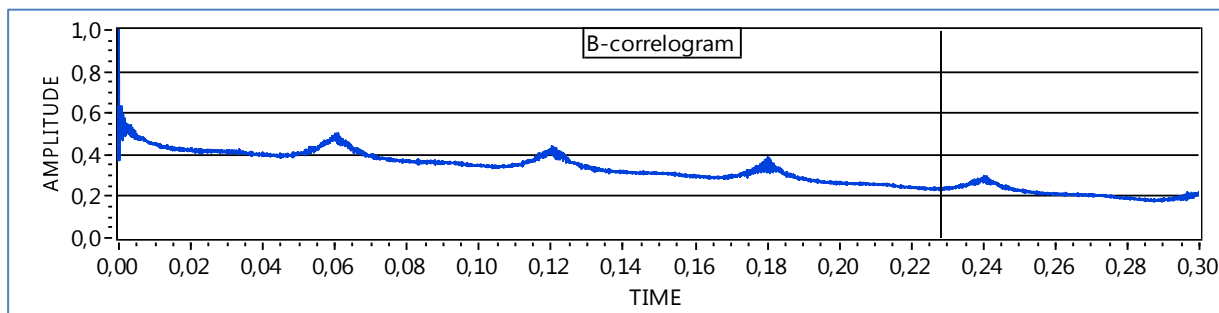
Фигура 3.11. Режим с големи пулсации на изходните величини

3.6.3. Интервал на автокорелация

Важен параметър при изследването на случайни сигнали представлява интервалът на корелация – τ_x . Известно е, че с нарастване на отместването τ , стойността на АКФ клони към нула. Параметърът τ_x определя скоростта на спадане на корелограмата и дефинира интервал, в който може да се твърди, че има статистическа връзка и съответно предсказуемост между отделните отчети на една реализация. Изчисляването на τ_x става чрез израза:

$$\tau_x = \int_0^{\infty} |\rho_x| d\tau, \quad \rho_x = \frac{R_x(\tau)}{R_x(0)}. \quad (3.26)$$

В израз (3.26), ρ_x е нормираната автокорелационна характеристика. На фигура 3.13 е представена графиката на нормираната АКФ при режими на работа на АПН-50 с основни нива на значимите фактори: x_2 , x_4 . Курсорът маркира интервала на автокорелация τ_x на случайния сигнал. За АКФ на фигурата $\tau_x=0,228$.



Фигура 3.13 Нормирана АКФ на U_{AK} при $I_T=400A$, $Q_N=2l/min$, $Q_{Ni}=400gr/h$.

Наличието на нискочестотна периодичност в един случаен сигнал, при определени случаи би го характеризирало като сигнал с по-малка стойност на интервала на автокорелация - τ_x . Когато се наблюдава високочестотна периодичност в АКФ или такава в широка честотна лента, тогава интервалът на автокорелация е с по-висока стойност т.е. случайният сигнал е по-предсказуем.

3.6.4. Влияние на несиметрията и филтрация на постоянната съставка

При измерването на трифазната мощност се използват измервателните преобразуватели описани в глава II. Въпреки подбора на елементи с еднакви параметри и възможността за регулиране на коефициентите им на преобразуване, абсолютното симетриране на диференциалните входове е невъзможно, поради случайния характер на производствените толеранси за всеки отделен елемент. Това се извява като генериране на постоянна съставка в изходния сигнал, при снемането на осцилограмите на тока и напрежението. Ясно е, че в реалните измервани величини тази съставка липсва и че тя се появява в измервателния тракт поради наличието на несиметрия в диференциалните входове спрямо общата точка с нулев потенциал на измервателната схема. При пресмятането параметрите на измерения сигнал, постоянната съставка добавена към сигнала, би повишила нейната ефективна стойност. Измерения сигнал например за напрежението на изхода на AC/AC преобразувателя, може да се изрази чрез формулата:

$$u(t) = U_0 + U_m \cos(\omega t + \varphi_u), \quad (3.29)$$

където U_0 е допълнително появилата се постоянна съставка поради несиметрия, а втория член на израза представлява реалния променлив сигнал, който трябва да бъде измерен. Подобен израз се получава и при измерването на тока I_T с използването на диференциалния вход на DAQ системата.

Тъй като ефективната стойност на една променлива величина се изразява чрез:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T |u(t)|^2 dt}, \quad (3.30)$$

то абсолютната грешка (ΔU) от несиметрия на входовете би била равна на разликата:

$$\Delta U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T |U_m \sin(\omega t)|^2 dt} - \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T |U_0 + U_m \sin(\omega t)|^2 dt}. \quad (3.31)$$

След решението на израза, за абсолютната грешка се получава:

$$\Delta U = \frac{U_m - \sqrt{U_m^2 + 2U_0^2}}{\sqrt{2}} \quad (3.32)$$

За отстраняване на тази грешка при измерването, освен прецизното регулиране чрез гравивните елементи на делителите е възможно софтуерно да се обработи получения сигнал така, че да се филтрира появилата се постоянна съставка при измерването и по този начин да се премахне влиянието на входната несиметрия. В предложената програма за изчисление ефективната стойност на входните ток и

напрежение на база записаните времедиаграми, преди определяне на ефективната стойност на величините, постоянните им съставки се филтрират.

3.7. Изводи

Въз основа на направения анализ на получените резултати и построените диаграми можем да направим следните изводи:

1. Оценени са основните фактори, влияещи на процеса плазмено напластяване. Разработени са математически модели за определяне тежестта на влияние на всеки от значимите фактори. С най-висока степен на влияние от всички фактори се оказват: x_1 – работен ток и x_3 – дебит на азот. В по-слаба степен е влиянието на фактори x_2 – дебит на аргон и x_4 – дебит на прах.
2. Проверени и доказани са адекватността на моделите чрез критерия на Фишер. При таблична стойност на критерия $F_T=3,4$, за модела на КПД е получена стойност $F=1,7$, а за модела на коефициента стабилност $F=2,27$.
3. Снета е ВАХ на системата захранващ източник плазмотрон и влиянието на режимните параметри x_2 – дебит на аргон и x_3 – дебит на азот.
4. Изчислени са топлинната мощност на струята за основните режими. При отделните режими тя варира от 2188W до 7418W.
5. Изчислена е и кинетичната мощност на струята. Делът ѝ от общата мощност варира от 0,55% до 3,33%.
6. Изчислен е топлинният КПД на плазмотрона и е направена декомпозиция на енергията вложена при процеса.
7. Изчислено е динамичното съпротивление на захранващия източник. Тъй като стойностите му клонят към нула оказва се, че то слабо влияе върху коефициента на стабилност на системата.
8. Извършена бе проверка за стационарност и ергодичност на получените случайни сигнали от измерваните величини. Проверката показва, че сигналите, чрез които се изследват режимите са стационарни и ергодични. Това дава възможност за точна обработка и интерпретация на измерените величини.
9. За основните режими е изчислен и интервалът на корелация, чиято стойност показва достоверност на измерените реализации.
10. С цел прецизност на измерването, е отчетена постоянната съставна на измерения диференциален сигнал, породена от входната несиметрия на измервателните преобразуватели и е направена софтуерна филтрация.

ГЛАВА 4. ВЛИЯНИЕ НА ТЕХНОЛОГИЧНИТЕ ПАРАМЕТРИ ВЪРХУ ИЗХОДНИТЕ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ВЕЛИЧИНИ

4.1. Установяване влиянието на технологичните параметри върху изходната мощност

За оптимизация на режимите при плазмено праховото напластяване, ключов параметър се явяват нивата на изменение на технологичните параметри, както и измерването на изходните и входните електрически величини. В таблица 4.1 са представени параметрите на основните режими (P1) – (P27), при които са заснети изходните електрически величини на АПН-50, като са показани нивата на изменение на факторите x_1 , x_2 , и x_3 .

При оценка влиянието на фактор x_4 (дебит на прах за напластяване), групата експерименти от таблица 4.1 се повтаря за трите избрани нива на дебита на прах Q_{Ni} : 0, 400, 800 gr/h. За нива Q_{Ni} : 400 и 800gr/h, фактор x_5 (дебит на транспортен газ – аргон) има

константно ниво $Q_{Ar}=1,5l/min$. Представените данни за ефективната стойност на напрежението U_{AK} и изходната мощност $P_{изх}$ са изчислени след усредняването им от записаните реализации ($n=9$) на случайните сигнали, отговарящи на тези величини.

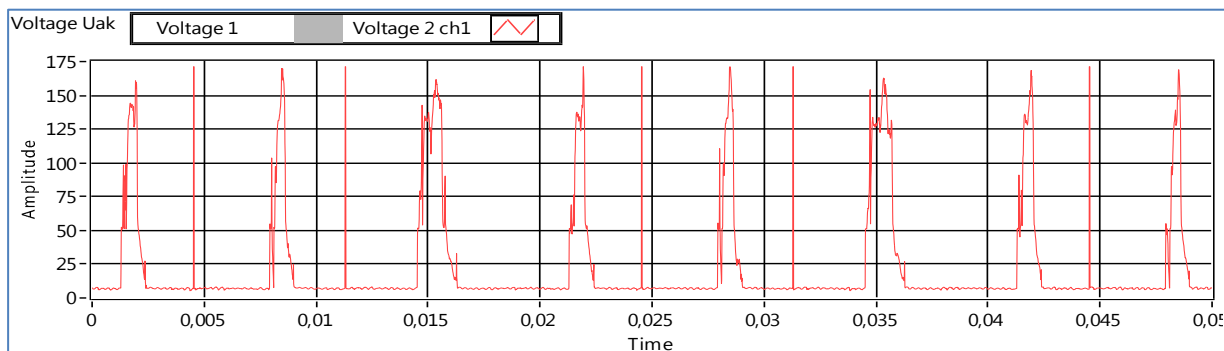
Таблица 4.1. Режими на АПН-50 при изменение на фактори: x_1, x_2 и x_3			
	$Q_{Ar}=20l/min$	$Q_{Ar}=30l/min$	$Q_{Ar}=40l/min$
I, A	$Q_N, l/min$	$Q_N, l/min$	$Q_N, l/min$
300	0 (P1)	0 (P10)	0 (P19)
	2 (P2)	2 (P11)	2 (P20)
	4 (P3)	4 (P12)	4 (P21)
400	0 (P4)	0 (P13)	0 (P22)
	2 (P5)	2 (P14)	2 (P23)
	4 (P6)	4 (P15)	4 (P24)
500	0 (P7)	0 (P16)	0 (P25)
	2 (P8)	2 (P17)	2 (P26)
	4 (P9)	4 (P18)	4 (P27)

4.1.1. Влияние на работния ток върху характера на изменение на напрежението и мощността на дъгата

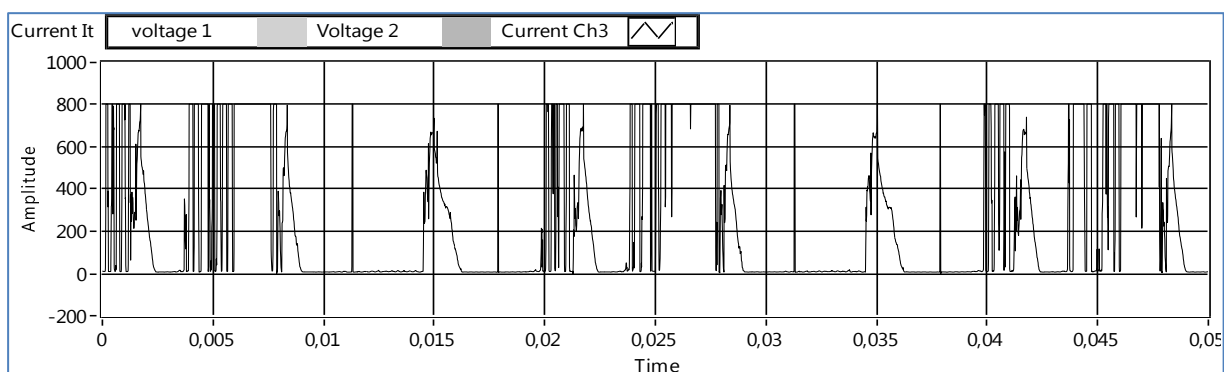
Целта на експеримента е да се определи как влияе работният ток върху изменението на мощността на електрическата дъга. За тази цел чрез измервателните уреди на изправителя се настройва тока по неговата ефективна стойност, а чрез DAQ модула се снима формата на изходните величини (I_T, U_{AK}). Направен е сравнителен анализ на получените резултати за оценка влиянието на тока I_T (x_1) върху формата на времедиаграмите на напрежението U_{AK} и съответно върху изходната електрическа мощност, консумирана от плазмотрона – $P_{изх}$. Изходната мощност е право пропорционална на измерените моментни стойности на величините I_T и U_{AK} ($p(t)=u(t).i(t)$). От друга страна моментната стойност на изходното напрежение U_{AK} , определя дължината на електрическата дъга в камерата на плазмотрона - L_D . L_D пряко определя изходната топлинна мощност на плазмената струя, топлинния КПД на плазмотрона, както и стабилността на процеса. Разтягането на дъгата също води до изтъняването на проводящия плазмен канал и до по-голяма нестабилност на процеса. За хода на този процес може да се съди по измерената моментна стойност на напрежението U_{AK} .

За установяване влиянието на работния ток са изследвани режими: P1, P4, P7. На фигури 4.1 и 4.2 са представени графиките на изходното напрежение и ток при режим на работа P4 и дебит на прах - $Q_{Ni}=0gr/h$.

Характерът на изменение на изходните електрически величини определя отклонението от основното ниво на технологичните параметри при напластяването, като: електрическа и топлинна мощност и съответно топлинен КПД, скорост на плазмената струя, стабилност на дъгата, амплитуда на флукуациите по мощност и т.н. Затова, анализ на времедиаграмите на тока и напрежението би дал достоверна информация за начина на изменение на енергията на плазмената струя и съответно за качествата на формираното покритие – хомогенност респ. порестост, твърдост, сцепление.



Фигура 4.1. Осцилограма на напрежението U_{AK}, V при $I_T=400A$



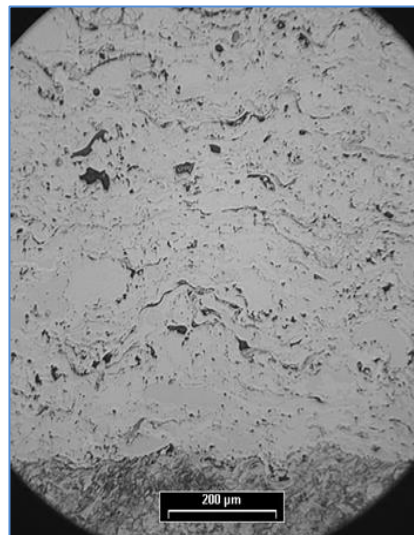
Фигура 4.2. Осцилограма на тока I_T, A при: $I_T=400A$

Таблица 4.2. Относително увеличение на U_{AK} (δU_{AK}) и $P_{изх}$ ($\delta P_{изх}$) при изменение на I_T

I_T, A	$\delta I_T, \%$	U_{AK}, V	$\delta U_{AK},$	$P_{изх}, W$	$\delta P_{изх}, \%$
300	-	39,40	-	11,88	-
400	33,33	45,09	14,44	18,03	51,77
500	66,67	47,07	19,47	22,13	86,28



Фигура 4.3. Структура на покритието при режим P2 ($I_T=300A$)



Фигура 4.4. Структура на покритието при режим P8 ($I_T=500A$)

Изменението на електрическата мощност $P_{изх}$ и напрежение U_{AK} при регулирането на работния ток е представено в таблица 4.2. Вижда се, че увеличаването на работния ток оказва известно влияние върху изходната мощност. Ефекта се увеличава и от на-

растването на ефективната стойност на напрежението – U_{AK} , поради особеностите на ВАХ на източника - плавно нарастващата зависимост $U_{AK}=f(I_T)$ в участъка след $I_T=400A$.

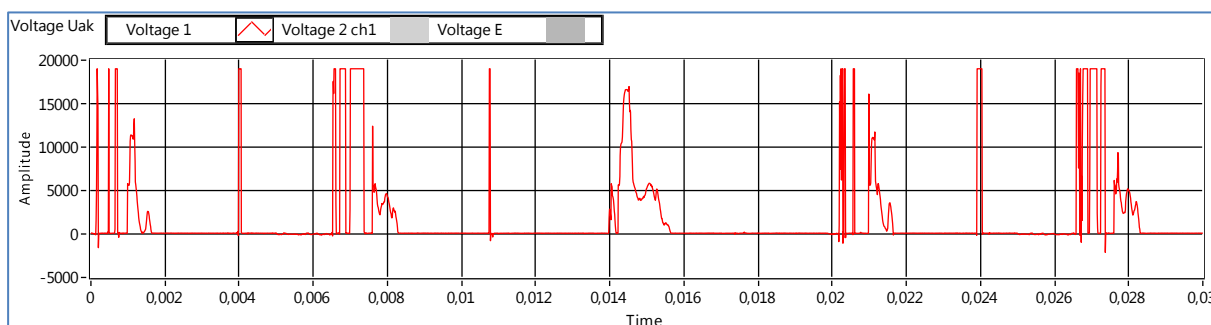
Структурата на полученото покритие при два от режимите (P2, P8) е представена на фигури 4.3 и 4.4. С увеличаване на работния ток нараства мощността на плазмената струя, което води до по равномерно разтопяване на праха и намаляване порестостта на покритието. Това довежда до увеличаване на неговата твърдост. От фигури 4.3 и 4.4 се вижда, че покритието е с по-голяма плътност при P8, когато плазмената струя е с увеличена мощност, отколкото при P2.

4.1.2. Влияние на дебита на основния плазмообразуващ газ - аргон върху характера на изменение на напрежението и мощността на дъгата

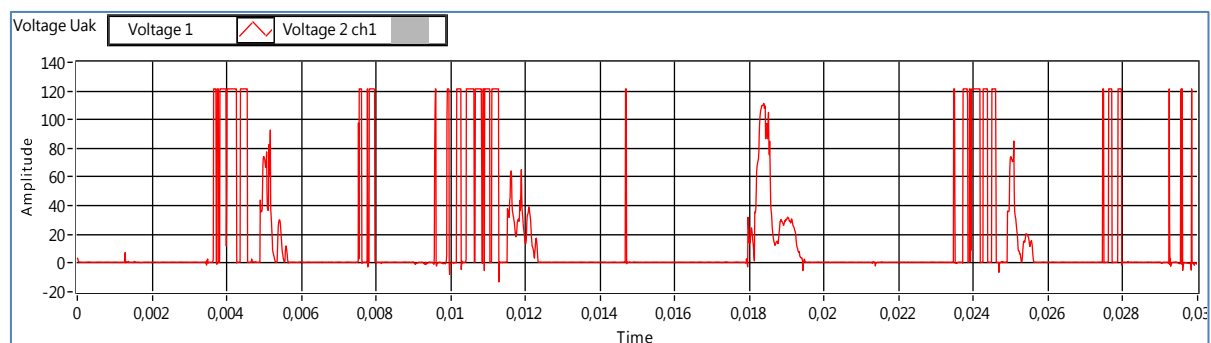
Важен фактор за енергийните характеристики на електрическата дъга е дебита и вида на плазмообразуващия газ. Изолирано са направени опити за установяване влиянието на дебита на аргон върху характеристиките на тока и напрежението и респективно на мощността на дъгата. Поради ниската специфична енталпия на аргона, се очаква дебитът му слабо да повлияе изходната мощност на плазмената струя.

При константна стойност на работния ток, фиксирана на основно ниво $I_T=400A$, се изменя стойността на дебита на аргон (Q_{Ar}) в граници от 20 до 40l/min. На фигури 4.5 и 4.6 са представени получените резултати за изходните параметри при следните режими: P4, P13, P22.

Наблюдава се малка промяна във формата на напрежението. Увеличава се фрагментацията на изходните импулси и тяхната обща продължителност. Структурата и периодичността на формираните пакети остава непроменена. Таблица 4.3 показва относителното увеличение на U_{AK} - δU_{AK} (%) и на $P_{изх}$ - $\delta P_{изх}$ (%) в зависимост от дебита на аргон – Q_{Ar} и неговата относителна промяна – δQ_{Ar} (%).



Фигура 4.5. Осцилограма на напрежението U_{AK}, V при $Q_{Ar}=20l/min$.



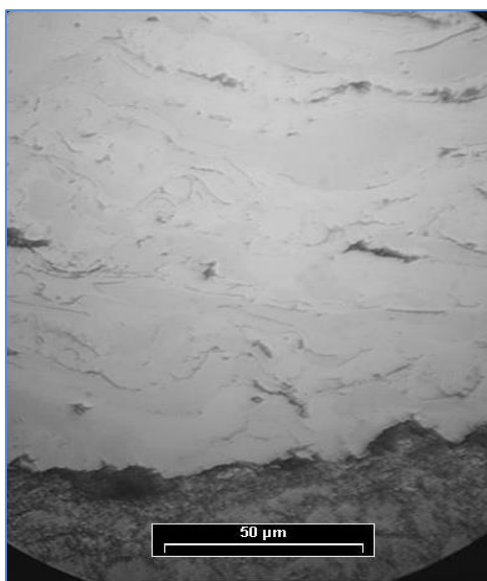
Фигура 4.6. Осцилограма на напрежението U_{AK}, V при $Q_{Ar}=40l/min$.

Изследванията показват слабо влияние на дебита на аргон върху изходното напрежение при фиксирана стойност на тока. От графиките на фигури 4.5 и 4.6 се вижда

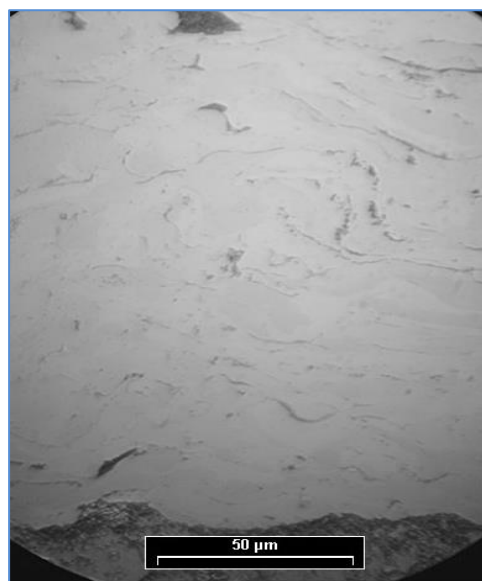
еднотипната структура на напрежението, състоящо се от пакети краткотрайни импулси, които увеличавайки своята продължителност увеличават и ефективната стойност на напрежението както и електрическата мощност.

Таблица 4.3. Относително увеличение на U_{AK} (δU_{AK}) и $P_{изх}$ ($\delta P_{изх}$) при изменение на Q_{Ar}					
Q_{Ar} , l/min	δQ_{Ar} , %	U_{AK} , V	δU_{AK} , %	$P_{изх}$, W	$\delta P_{изх}$, %
20	-	45,28	-	18,29	-
30	50	48,38	6,85	19,49	6,56
40	100	50,82	12,23	20,39	11,48

С промяната на дебита на аргон от 20 до 40 l/min., ефективната стойност на напрежението се увеличава от 45,28V до 50,82V, а мощността от 18,29W до 20,39W. Това представлява увеличение от 12,23% за напрежението и едва 11,48% за мощността. Този експеримент показва слабо влияние на фактор $\times 2$ върху електрическата мощност на плазмотрона. Експериментът доказва, че добавката на аргон слабо ще повлияе качествата на покритието, като износоустойчивост, якост на сцепление, твърдост и т.н. На фигури 4.7 и 4.8 са показани структурите на покрития при режими P4 и P22, които илюстрират, че при двойно увеличение на дебита на аргон структурата се променя слабо, поради малката разлика в изходната мощност на плазмената струя. При режим P22 се забелязва слабо уплътнение на покритието и по-малък размер на шуплите в него в сравнение с това при режим P4.



Фигура 4.7. Структура на покритието при режим P4 ($I_T=400A$, $Q_{Ar}=20l/min$)

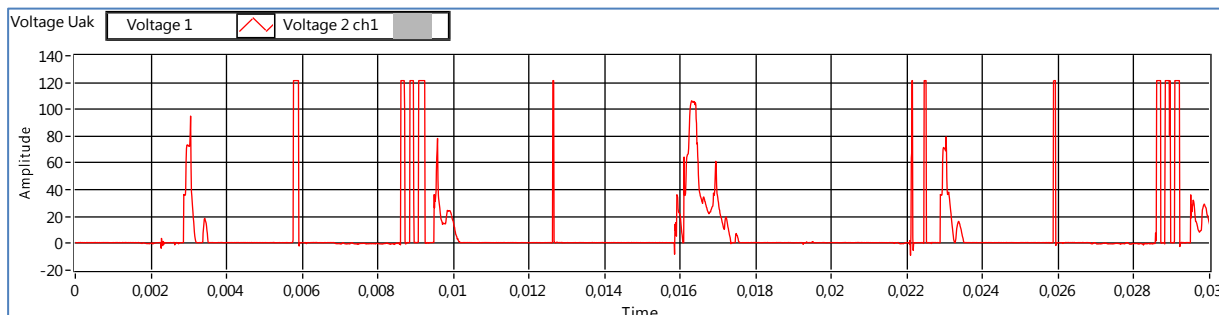


Фигура 4.8. Структура на покритието при режим P22 ($I_T=400A$, $Q_{Ar}=40l/min$)

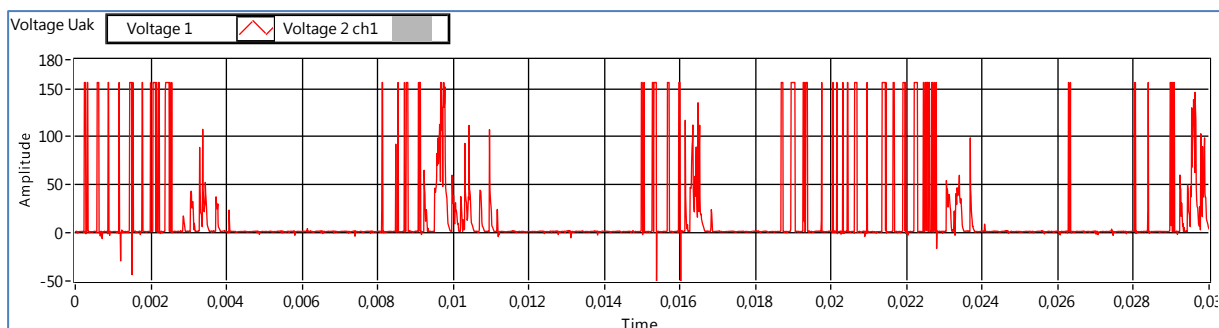
4.1.3. Влияние на дебита на допълнителния плазмообразуващ газ върху характера на изменение на напрежението и мощността на дъгата

За увеличаване влиянието на изходната мощност на дъгата се добавя и втори (допълнителен) плазмообразуващ газ, чиято по-висока специфична енталпия от тази на аргона, би увеличила количеството енергия на единица обем в общата плазмообразуваща смес. При добавянето на азот и промяната на неговия дебит, ясно се вижда разликата в трите диаграми. Добавка на азот с дебит 2l/min към аргона, което представлява едва 10% от общото количество газ, чувствително повишава ефективната стойност на U_{AK} , както и нивото на изходната мощност.

Фигури 4.9 и 4.10 показват влиянието на азота в плазмообразуващата смес върху изходното напрежение - U_{AK} . Експериментът е извършен при фиксирано средно ниво на тока ($I_T=400A$) и дебит на аргона - $Q_{Ar}=30l/min$. Като резултат са изпълнени следните режими: P13, P14, P15.



Фигура 4.9. Осцилограма на напрежението U_{AK}, V при $Q_N=0l/min$.



Фигура 4.10. Осцилограма на напрежението U_{AK}, V при $Q_N=4l/min$.

Осцилограмите показват подобна структура по отношение на формата и периодичността на формираните импулси. Разликата при добавяне и увеличаване на дебита на азот е тази, че върху силно изразените импулси на напрежението се откроява високочестотна съставка с по-голяма амплитуда от тази при липса на азот в сместа. Като резултат се получава по-голяма дълбочина на модулацията на тези импулси, което означава по-високо ниво на кратковременните флукуации, генерирани в плазменния канал на дъгата. Пакетите импулси в осцилограмата на тока са с по-ниска и почти константна продължителност от порядъка на $0,1 - 0,2ms.$, което е показател за по-високата честота на флукуациите и за бързото преместване на дъгата по площта на катода.

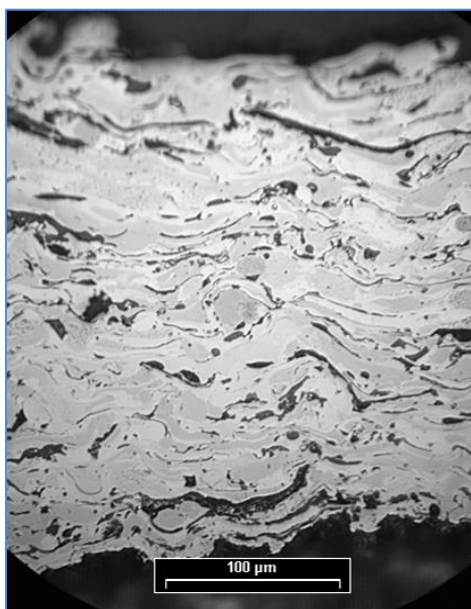
Установяват се две тенденции във времетраенето на импулсите:

- като цяло пакетите от изходни импулси увеличават своята продължителност, което повишава ефективната стойност на напрежението,
- същевременно съставните импулси на пакетите значително намаляват периода си.

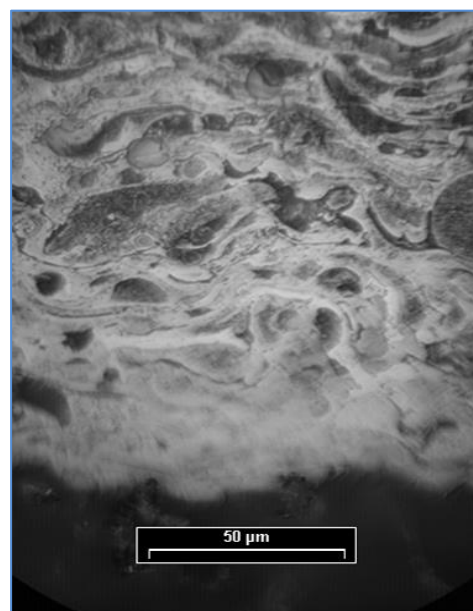
Първата свидетелства за увеличена изходна мощност и по-голяма хомогенност на разтопените прахови частици (независимо от тяхната големина в интервала $25-45\mu m$) и съответно получаване на по-добра равномерност на характеристиките на покритието. Втората показва ефект на увеличаване на честотата на пулсациите. Теоретично този ефект би трябвало да действа в посока обратна на първия, като нарушава хомогенността на разтопения материал (тук също е необходимо да се вземе под внимание скоростта на потока, времето на пребиваване на праха в плазмената струя, както и топлинния капацитет и температурата на топене на праха). Това обаче поради инертността на топлопренасянето като процес, оказва значително по-слабо влияние и не би трябвало да наруши равномерността на покритието.

Увеличаването на дебита на плазмобразуващия газ с добавка на азот от 10%, дава увеличаване на електрическата мощност с 16,42%, а 20% увеличение добавя към нивото на електрическата мощност почти около 1/3 от стойността ѝ в сравнение с това при липса на азот. Относителната промяна на напрежението е от същия порядък както и за мощността. В таблица 4.4 са представени процентните увеличения на U_{AK} - δU_{AK} (%) и на $P_{изх}$ - $\delta P_{изх}$ (%) в зависимост от нивата на дебита на азот – Q_N и относителната промяна в дебита на плазмобразуващия газ – δQ_N (%).

Таблица 4.4. Относително увеличение на U_{AK} (δU_{AK}) и $P_{изх}$ ($\delta P_{изх}$) при изменение на Q_N					
Q_N , l/min	δQ_N , %	U_{AK} , V	δU_{AK} , %	$P_{изх}$, W	$\delta P_{изх}$, %
0	-	45,64	-	18,33	-
2	-	52,77	15,62	21,34	16,42
4	100	60,39	32,32	24,30	32,57



Фигура 4.11. Структура на покритието при режим P14 ($I_T=400A$, $Q_N=2l/min$)



Фигура 4.12. Структура на покритието при режим P15 ($I_T=400A$, $Q_N=4l/min$)

От направените експерименти се установява, че с добавянето на малки количества азот в плазмобразуващата смес, се увеличава значително нивото на електрическата мощност на плазмотрона, което променя характера на изменение на напрежението U_{AK} (фиг.4.9 - 4.10). Технологично това довежда до по-добро разтопяване на праховите частици и повишаване качествата на формираното покритие. Добавката на азот, освен че увеличава топлинната мощност на плазмата, но води и до повишение на кинетичната ѝ енергия, което се изразява в нарастване скоростта на плазмената струя. От друга страна това внася по-голяма турбулентност в зона близка до дюзата и по-висока стойност на дисперсия на праховите частици от основната посока на движение. Като резултат напластяването в тази близка зона би могло да даде по-добра равномерност на покритието на обработвания детайл.

На фигури 4.11 и 4.12 са представени структурите на покритията, получени при ниво на дебита на азот в плазмобразуващата смес 2l/min (P14 - фиг.4.11), и 4l/min (P15 - фиг.4.12). Може да се установи разликата в структурата на покритията. Покритието с по-висок дебит на азот видимо е по-еднородно. При увеличаване дебита на азот нараства топлинната мощност на плазмената струя, което физически се изразява в по-високата

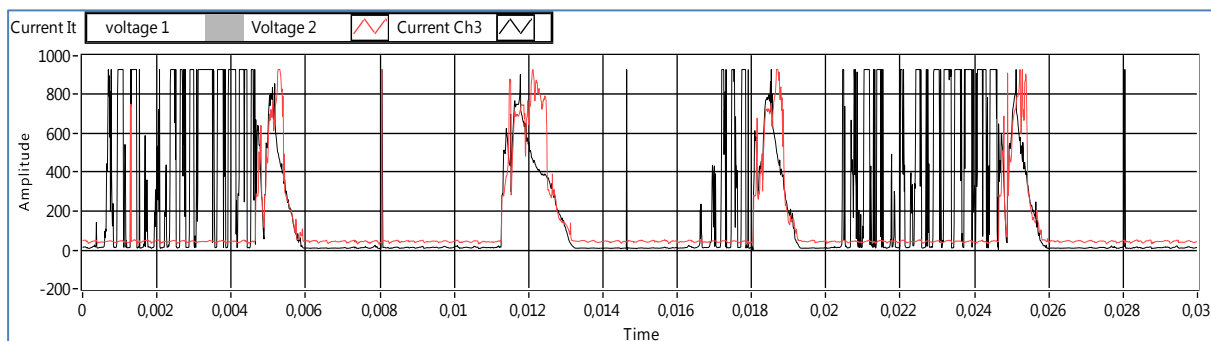
й скорост и температура. Това довежда до по-плътно покритие с по-висока степен на хомогенност, а също и до по-висока адхезионна якост, което повишава сцеплението на покритието с основата.

4.1.4. Влияние на праха за напластяване върху изходните величини

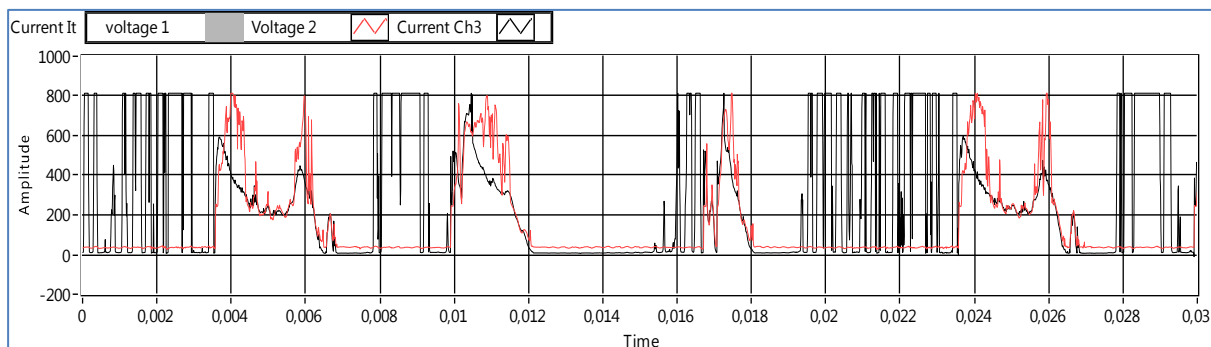
Важен фактор при оценката на работата на плазмено-праховата апаратура е дебитът на праха за напластяване (x_4). Той също влияе върху параметрите на плазмената струя и респективно върху качествата на покритието. Въвеждането на праха за напластяване в плазмената струя става чрез транспортен газ (аргон), чието влияние както беше разгледано по-горе е незначително, защото като фактор в ПФЕ (x_5), неговият дебит - Q_{ArT} представлява малък процент от общото количество на плазмообразуващия газ. Експериментът за установяване на влиянието на праха е проведен при режим P5 (таблица 4.1), като се променя дебитът му в граници $Q_{Ni}=0-800\text{gr/h}$, а дебитът на транспортния газ - Q_{ArT} е фиксиран на $1,5\text{l/min}$.

Графиките на получените напрежения и ток са представени на фигури 4.13 и 4.14. Стойностите за напрежението и мощността са представени в таблица 4.5. Като цяло влиянието на дебита на прах е слабо. Наблюдава се малък спад в нивото на електрическата мощност ($\delta P_{изх} = 1,88\% - 3,2\%$), както и на нивото на напрежението ($\delta U_{AK} = 1,85\% - 4,56\%$).

Q_{Ni} , l/min	U_{AK} , V	δU_{AK} , %	$P_{изх}$, W	$\delta P_{изх}$, %
0	53,03	-	21,28	-
400	52,05	-1,85%	20,88	-1,88%
800	50,61	-4,56%	20,60	-3,20%



Фигура 4.13. Осцилограми на U_{AK} , V и I_T , A при $Q_{Ni}=0\text{gr/h}$.

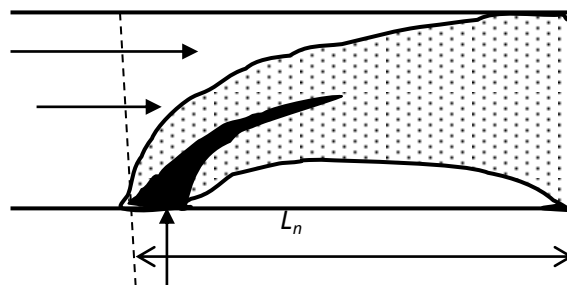


Фигура 4.14. Осцилограми на U_{AK} , V и I_T , A при $Q_{Ni}=800\text{gr/h}$.

По-чувствителна промяна се наблюдава във формата на времедиаграмите на тока и напрежението. Там има значително разширение на импулсите като тяхната продължителност достига до 4ms.– повече от два пъти по-голяма в сравнение с продължителността им при липсата на прах за напластяване (1 - 2ms).

Този ефект намира своето обяснение, като се има предвид установеното векторно поле на скоростите в дюзата. Перпендикулярното въвеждане на транспортния газ в дюзата деформира изходната струя (фиг.4.15). Това довежда до изменение на пътя и дължината на дъгата, която е пряко свързана с изследваното напрежение. Вероятно по-голямата продължителност във времедиаграмата на импулсите на напрежението се дължи на описания ефект.

Също така при увеличено прахоподаване се наблюдава задълбочаване на кратковременните флукутации в изходното напрежение. Този ефект вероятно се проявява поради увеличението на количеството на праха в дюзата, което въздейства на плазмената струя и отнема от нейната енергия като я охлажда. Това от своя страна преразпределя температурното поле в дюзата и също въздейства на формата и дължината на електрическата дъга. Тя се изменя според променения температурен градиент и това намира отражение в изменението на времедиаграмата на изследваното напрежение - появяват се кратковременни флукутации поради възникването на локални охладени области в дюзата. Тяхната амплитуда зависи от гранулометричния състав на праха - едрите частици отнемат повече от енергията на плазмената струя и генерират големи спадове във формата на напрежението U_{AK} .



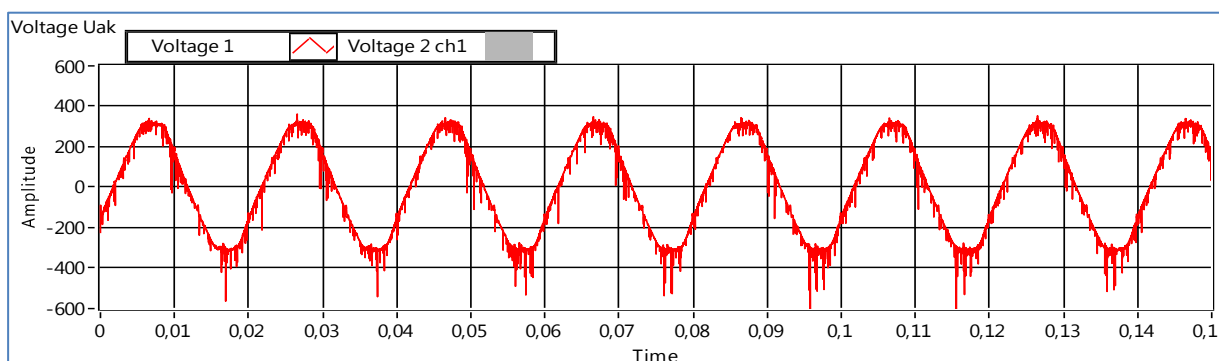
Фигура 4.15. Перпендикулярно въвеждане на праха за напластяване в камерата на плазмотрона

4.2. Измерване на входните величини

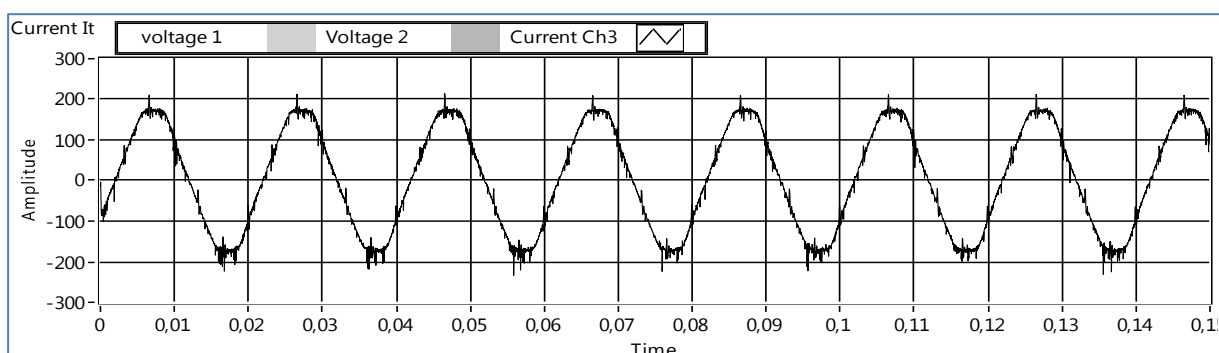
За изчислението на ефективността на плазмотрона, от особена важност е измерването на параметрите на входните величини. Отношението на изходната мощност към електрическата мощност на входа на изправителя би определило КПД на електрическия тракт на апаратурата за плазмено напластяване. Изчислението на входната мощност е коренно различно от това на изходната поради факта, че тя представлява мощността на трифазната захранваща мрежа. Необходимо е изчислението на консумираната от АПН-50 трифазна мощност.

След предварителни измервания е установено, че захранващата трифазна верига е симетрична по ток и по напрежение. Това опростява задачата и тогава е достатъчно измерването на напрежението и тока в една от фазите. Приложените по-долу резултати от експеримента дават ясна представа за нивата на входната мощност. За измерването на входната трифазна мощност по предложената схема от фигура 2.5 в глава II и с помощта на конструирания АС/АС адаптер, са измерени токовете и напреженията на симетричното трифазно захранващо напрежение.

Експериментите са извършени при условия идентични с тези при измерването на изходните величини на АПН-50. По този начин се гарантира достоверност на получените резултати при изчислението на основните параметри, които настоящото изследване цели да установи, а именно - ефективност на плазмотрона и стабилност на дъгата му.



Фигура 4.17. Форма на входното напрежение ($U_{вх}$, V) при основните режими на работа на АПН-50



Фигура 4.18. Форма на входния ток ($I_{вх}$, A) при основните режими на работа на АПН-50

В предишния раздел беше установено, че най-силно влияние върху изходната мощност оказват дебитът на азот ($x3$) и работния ток ($x1$). Затова за установяване на входната мощност са направени експерименти, при които се изменят основно тези два параметъра. Разликата при различните режими е само в нивото на входния ток, който слабо се увеличава с нарастване на изходния ток I_T на изправителя. Наблюдава се и слаба промяна при изменение на дебита на азот. Първият от експериментите бе извършен при фиксирани $x1$ ($I_T=300A$), $x2$ ($Q_{Ar}=20l/min$) и $x4$ ($Q_{Ni}=0gr/h$). Нивото на фактор $x3$ варира в интервала $Q_N=0-4l/min$. По този начин се реализират режими: P1, P2 и P3.

Таблица 4.6. Влияние на I_T и Q_N върху входния ток - $I_{вх}$						
		Q_N , l/min				
		0		2		4
I_T , A	$I_{вх}$, A	$\delta I_{вх}$, %	$I_{вх}$, A	$\delta I_{вх}$, %	$I_{вх}$, A	$\delta I_{вх}$, %
300	138,86	-	145,88	5,06	151,86	9,36
400	138,96	-	146,01	5,07	152,25	9,56
500	139,08	-	148,50	6,77	152,97	9,99

Останалите две серии експерименти се извършиха при същите условия за параметри $x2$ и $x4$, чрез установяване на параметър $x1$ – работния ток (I_T) на нива 400A и 500A.

Таблицы 4.6 и 4.7 представят получените резултати при тези три серии измервания, като се оценяват процентните промени на входния ток и мощност при изменение на вариращите параметри. От получените данни е видно, че работния ток на УСИ, слабо влияе върху входния ток и входната мощност. Те се променят макар и в малки граници при изменението на дебита на азот. Входният ток се изменя в граници от 5,06% до 9,99%, докато при мощността тези изменения ($\delta P_{вх}$) са от 4,87% до 11,86%.

Таблица 4.7. Влияние на I_T и Q_N върху входната мощност - P_{BX}						
	$Q_N, \text{l/min}$					
	0		2		4	
I_T, A	P_{BX}, A	$\delta P_{BX}, \%$	P_{BX}, A	$\delta P_{BX}, \%$	P_{BX}, A	$\delta P_{BX}, \%$
300	54,66	-	57,32	4,87	59,49	8,84
400	54,64	-	57,37	5,00	60,05	9,90
500	54,73	-	58,33	6,58	61,22	11,86

Забелязва се, че азотът увеличава въздействието си при по-високи нива на работния ток на УСИ – от 8,84% до 11,86% за входната мощност (δP_{BX}) и от 9,36% до 9,99% за входния ток (δI_{BX}). Чрез получените данни за входните и изходните величини, могат да бъдат изчислени КПД и стабилността на електрическата дъга в плазмотрона. Установяването на влиянието на технологичните параметри върху КПД и стабилността на дъгата способства за избиране на такъв режим, че да се получи оптимален разход на прах при минимална консумация на енергия. Чрез тези изследвания също може да се избере и оптималната дистанция за напластяване като при това, нивото на флукуациите в плазмената струя остава ниско и съответно се получава покритие с висока степен на хомогенност, износостойчивост и твърдост.

4.3. Честотни характеристики на измерените сигнали

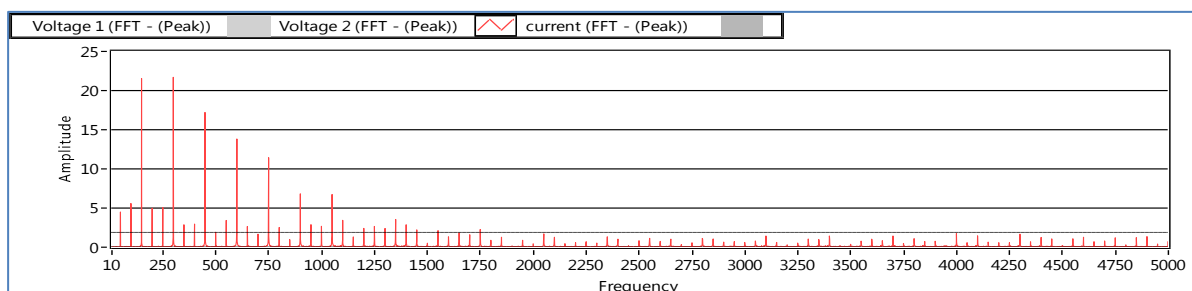
4.3.1. Спектри на изходните измерени величини

Една от най-важните характеристики на всеки периодичен или случаен сигнал, това е честотния му спектър. Той в голяма степен характеризира, както самата величина, така и процесът, който тя изразява. Така например изходното напрежение, изразено в честотната област би дало информация за динамиката на процеса в газоразрядната камера на плазмотрона. Тъй като плазмотронът е със самоустановяваща се дъга, а стабилизацията на дъгата е вихрова, то процесът на самоустановяване и стабилизация чрез газовия поток (описан в глава I) е съпътстван с динамичното ѝ разтегляне и усукване около оста на симетрия на камерата и цилиндричния катод. Тази промяна на геометричните ѝ размери, е пряко свързана с промяната в пада на напрежение върху плазменния канал, което погледнато в честотната област на сигнала за изходното напрежение, се изразява в генерирането на точно определени хармоници или кратни честоти в тясна честотна лента. Анализът на спектъра на получените сигнали, дава възможност да се оптимизират технологичните и конструктивните параметри на системата за подобряване качествата на покритията.

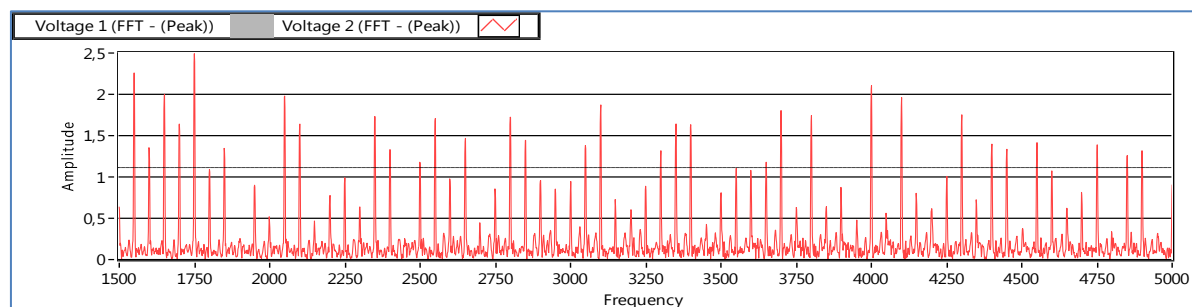
Чрез измерването на сигналите в реално време за интервал, в който се гарантира тяхната стационарност, предвид случайният им характер на изменение, става възможно намирането на честотния спектър чрез прилагане на бързо преобразуване на Фурие (FFT). Намирането на скритите периодичности в случайните по вид сигнали на изходното напрежение и ток, може да разкрие наличието на връзка между пулсациите в размера на дъгата и ефекта от вихровата ѝ стабилизация. Наличието на корелация между ротацията на дъгата в камерата на плазмотрона и някой от висшите хармоници или група хармоници в спектъра на сигнала, освен че би потвърдило описания механизъм на процеса, но също така дава начин за въздействие върху него и стабилизирането му. Технологично това се отразява и на качеството на покритията като се осигурява повторемост при всички напластени образци. Освен това снемането на честотния спектър на изходното напрежение и ток дава информация за ресурсния потенциал на плазмотрона и по-точно на катода. С нарастване на отработените часове на плазмотрона, намаляване дължината на катода, което увеличава дължината на дъгата и разтяга допълнително.

Този ефект причинява по-дълбоки флукутации т.е. увеличава се тяхната амплитуда и съответно се намалява стабилността на процеса. Всичко това може да се види в спектъра на снетия изходен сигнал, като промяна в нивата на установените хармоници, както и в появата на нови.

На всеки от снетите в предните параграфи сигнали, може да се приложи FFT и да се определи спектъра им. От първите описани опити в т.І на настоящата глава, чрез измерените сигнали за напрежението и тока и прилагането на FFT преобразуване се намира техния спектър.



Фигура 4.19. а) Спектър на U_{AK}, V до 5kHz при режим P1



Фигура 4.19. в) Спектър на U_{AK}, V от 1,5kHz до 5kHz при режим P1

На фигура 4.19, са дадени спектрите на изходните величини за режим (P1). Честотата на дискретизация на DAQ системата е $f_s=100kHz$, което определя горната гранична честота в спектъра на измервания сигнал на $f_h=50kHz$. От графиките на спектрите за двете изходни величини се вижда, че след 40-ти хармоник (2kHz), нивата им спадат под 10% от стойността на най-големия хармоник. Ниво 10% на графиките е дадено с пунктир. Подобна картина се наблюдава и в спектъра на тока. Там висшите хармоници съставляват 5-6% от нивото на най-големия хармоник (I_{T1}). Висшите хармоници на тока най-силно са изразени в интервала от 2,4kHz до 4,6kHz, докато при напрежението, честотната лента е по широка и достига до 7,8kHz.

Прави впечатление, че в областта на повишени нива на висшите хармоници в спектъра на тока се забелязват съставки с ниски нива до 3% от I_{T1} , които не са кратни на честотата на основния хармоник – 50Hz. Това се обяснява с влиянието на запасената енергия в дросела, прескачането на приелектродните области на дъгата и разтягането ѝ, което беше описано в началото на тази глава. Наличието на пакети от импулси с различна продължителност поражда тези висши хармоници. Тяхното местоположение и амплитуда в спектъра зависят от различните режими на работа, както и от конструктивните особености на УСИ и плазмотрона.

Съществени промени има във високочестотната част на спектрите при различните режими. В тази област е обособена честотна лента с високи нива на хармонични съставки с ширина $\Delta f = 100Hz - 1000Hz$ в областта 3 - 4,5kHz, която с нарастване на тока се разширява и се измества в областта на по високите честоти. Това се обяснява с факта, че при увеличаване на работния ток, нараства фрагментацията в изходния сигнал на

тока като пакетите от импулси намаляват своето времетраене и съответно се появяват съставки с по-висока честота.

Таблица 4.8. Позиция и ширина на честотната лента в спектъра на тока I_T при режими P1– P9						
	$Q_N, \text{l/min}$					
	0		2		4	
I_T, A	$\Delta f_H, \text{Hz}$	f_H, Hz	$\Delta f_H, \text{Hz}$	f_H, Hz	$\Delta f_H, \text{Hz}$	f_H, Hz
300	100	3000	1650	3150	1750	3050
400	650	3650	2150	3300	2200	3100
500	1000	4150	2450	4050	2700	3900

Таблица 4.8 показва ширината на лентата при високи честоти (Δf_H) и централната ѝ честота (f_H) за режими от P1 до P9. От представените графични и таблични резултати се вижда, че с нарастването на работния ток ($x1$), се увеличават нивата на висшите хармоници в спектъра на тока. В графиките това се изразява като разширяване на честотната им лента, в комбинация с изместването на генерираните хармоници към по-високи честоти. Увеличаване на фактор ($x3$) – дебит на азот, измества лентата на висшите хармоници към по-ниски стойности и я разширява.

Наличието на съставки в спектъра с произволни честоти може да се обясни с различната големина на частиците на праха, чиито топлинен капацитет зависи от обема им и следователно те поглъщат различно количество енергия от плазмата при разтапянето си. Тъй като разпределението на тяхната големина е по случаен закон, който има нормално разпределение (със средна големина $33\mu\text{m}$ и стандартно отклонение $15\mu\text{m}$), това предизвиква флукуации в плазмения поток и съответно в динамиката на дъгата, което се отразява и на спектъра - явяват честоти със стойности различна от тази на основния хармоник (50 Hz).

Установените влияния на основните технологични параметри върху високочестотната част на спектъра на изходните електрически сигнали доказват описаната динамика на този процес: механизма, по който се извършва разтеглянето на дъгата, шунтирането и флукуациите в нея. Центърът на високочестотната лента (f_H) е следствие от бързината и дълбочината на тези флукуации и показва енергията, разпределена в тях. Тяхното ниво и разпределение са индикатори за известни охладени области в температурното поле на плазмата и съответно те са показател за коефициента на използване на праха (КИП) и хомогенността на покритието.

4.4. Изводи

Обобщавайки резултатите се вижда, че:

1. Измерени са напрежението и тока върху плазмотрона при всички изследвани режими. Установен е характерът на изменението им и влиянието им върху мощността на електрическата дъга. При увеличение на работния ток с до 66,67% мощността на дъгата се нараства с 86,28%.
2. Влиянието на дебита на аргон като плазмообразуващ газ върху мощността на дъгата е твърде слабо. Увеличаване на дебита на аргон със 100%, довежда до нарастване мощността на дъгата с 11,48%.
3. Добавяне на допълнителен плазмообразуващ газ оказва значителна промяна в изходната мощност на дъгата. При добавянето му и 100% увеличение на дебит на азот, мощността на дъгата се увеличава с 32,57%.

4. Прахът за напластяване променя мощността на дъгата и респективно енергията на плазмената струя. Увеличаване със 100% дебита на прах намалява мощността на дъгата с 3,20%.
5. За различните режими, при всички проведени експерименти са отчетени промяната в параметрите на флукуациите (амплитуда, период на повторение и продължителност) при измерваните напрежение и ток.
6. Установено е влиянието на основните значими фактори в експериментите – x_1 , x_3 върху входната консумирана мощност от АПН-50. При увеличаване на работния ток с 66,67% входната мощност се повишава слабо само с няколко процента, докато добавяне на азота като плазмообразуващ газ с дебит 4l/min., води до нарастване мощността на дъгата с до 11,86%.
7. Налице е корелация между спектъра на измерваните сигнали и периодичността на процесите в плазмотрона. Наблюдава се високочестотна лента на спектъра в областта 2-5kHz породена от флукуациите и завихрянето на дъгата. Тази част от честотния спектър зависи от избрания режим. При увеличаване на работния ток, лентата силно се измества към по-високи честоти. Увеличаване дебита на азот слабо измества лентата към по-ниски честоти.

ГЛАВА 5. КПД НА ПЛАЗМОТРОНА И СТАБИЛНОСТ НА ДЪГАТА

5.1. КПД на плазмотрона

Оценката на ефективността на апаратурата за плазменопрахово напластяване, може да се извърши чрез изчисление на КПД на целия тракт, през който се трансформира и предава енергията: от момента на консумирането ѝ от трифазната захранваща мрежа до момента, в който тази енергия се трансформира за генериране на плазма. В целия този процес на генериране на електрическата дъга в камерата на плазмотрона, загубите на енергия са от различно естество и като цяло са изключително разнородни (излъчване, конвекция, топлообмен). В настоящото изследване е възприет интегрален подход, чрез който всички тези загуби могат да се оценят сумарно като се измери входната електрическа мощност, постъпваща на входа на апаратурата и същевременно се следи изходната мощност отделена при генерирането на дъгата. Тъй като захранващата електрическа верига е симетрична, то консумираната мощност от АПН-50 може да се изрази чрез:

$$P_{\text{вх}} = \sqrt{3}U_L I_L, W, \quad (5.1)$$

където U_L , и I_L са стойностите на линейните токове и напрежения.

Изходната мощност може да бъде изчислена, като се има предвид, че напрежението върху електродите на плазмотрона е изправено и теоретично от УСИ постъпва постоянна във времето мощност. Тя може да се изрази чрез:

$$P_{\text{изх}} = U_{\text{АК}} I_T, W, \quad (5.2)$$

На практика обаче, никога няма равномерно и постоянно изменение във времето на тези величини, тъй като процесите в газоразрядната камера на плазмотрона са изключително динамични от физическа гледна точка и влияят на формата дължината и дебелината на формираната дъга, както и на йонизираната газова област около нея, което се отразява на времедиagramите на измерените напрежения и токове. Те са силно променливи, съставени от импулси с голяма амплитуда и стръмност. Отношението на гореописаните електрически мощности представлява електрическия КПД – η_E на захранващата система изразен в (3.13).

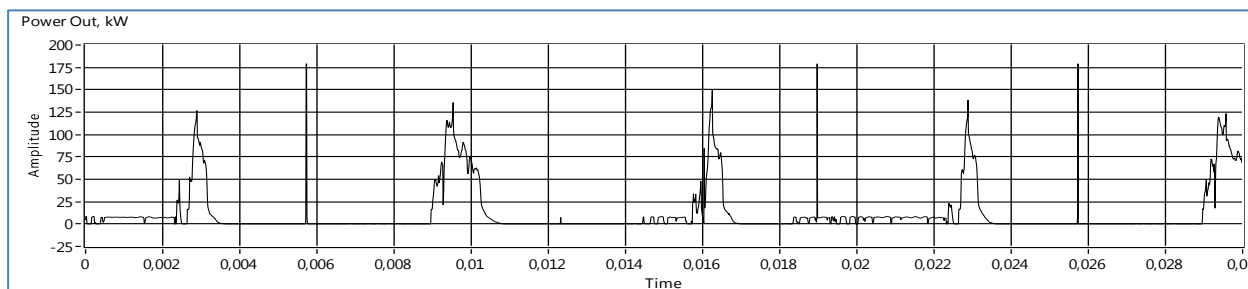
Общият КПД, се изменя за различните режими на работа, представени в глава IV. Той може да бъде декомпозиран по описания подход в глава III, като неговата стойност ще бъде пряк показател за ефективността на плазмотрона както и на процеса. От напра-

вените експерименти се установява, че от особено значение за общия КПД на процеса е натоварването на източника. Електрическият КПД - η_E се изменя в широки граници в зависимост от натоварването на изправителя. За изчислението му е необходимо да се знае характерът на изменение, както на изходната електрическа мощност, така и на входната трифазна мощност. От друга страна както беше показано в глава III, топлинният КПД – η_T зависи основно от измерената температура на изхода на дюзата и дебита на плазмообразуващите газове, които в условията на експеримента са известни.

5.1.1. Характер на изменение на изходната мощност

За оценката на КПД на преобразувателя, трябва да се получи осцилограмата на изходната мощност, зависеща изцяло от измерените напрежения и ток. След като е ясна динамиката на записваните сигнали, за изчислението на КПД е целесъобразно да се намери усреднената стойност на изходната мощност от всички измерени реализации. Това се налага поради факта, че измененията на мощността във времето са още по-силно изразени, отколкото при отделните величини, от които то зависи – ток и напрежение. Времедиаграмата на мощността в изходната верига при режим P7 (500A) на плазмотрона е представена на фигура 5.2.

Ясно различими са пиковете в изходната мощност, които както се очаква корелират с тези на тока и напрежението. Характерът на изменение на импулсите в изходната мощност като цяло е подобен на този на токовите импулси със стръмен възходящ и по-полегат низходящ фронт.



Фигура 5.2. Времедиаграма на изходната мощност ($P_{\text{изх}}, \text{kW}$) при режим P7

Пулсиращата изходна мощност означава, че енергията консумирана от дъгата се трансформира на порции и това би се отразило на качествата на покритията. Колкото по-равномерна във времето изглежда графиката на мощността, толкова по-висока степен на хомогенност биха имали плазмено-праховите покрития. Такава е структурата на графиката на мощността и при промяна на работния ток и отношението на плазмообразуващите газове. Характерът на изменение на мощността е подобен на този разгледан за напрежението в глава IV. Направените там изводи за влиянието на основните режимни параметри ($x_1 - x_4$) върху измереното напрежение – U_{AK} , се отнасят и за изходната електрическа мощност.

5.1.2. Характер на изменение на входната мощност

Изменението на моментната стойност на входната мощност съответства на характера на изменение на тока и напрежението и се развива по синусоидален закон. Мощността обаче е с удвоена честота.

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) = U_m \cdot I_m \cdot \sin(\omega t) \cdot \sin(\omega t + \varphi). \quad (5.3)$$

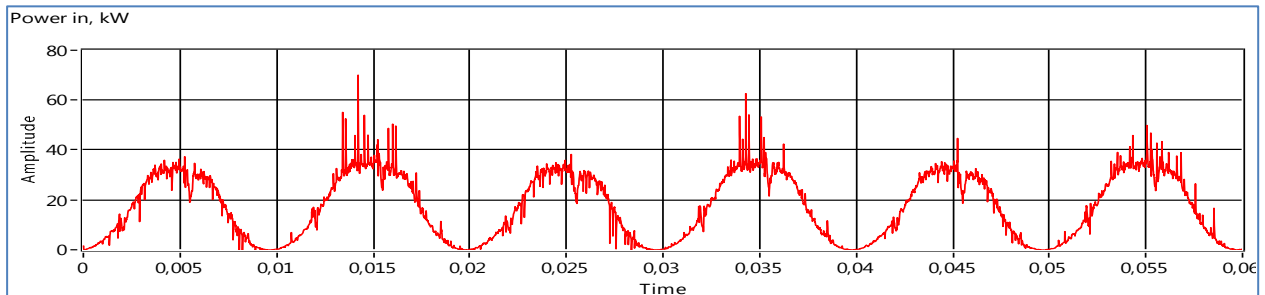
След преобразуване на израза за мощността, се достига до израза:

$$p(t) = \frac{U_m \cdot I_m}{2} \cdot \cos(\varphi) - \frac{U_m \cdot I_m}{2} \cdot \cos(2\omega t + \varphi), \quad (5.4)$$

което показва сигнал с две съставки: променлива, с честота два пъти по-голяма от тази на тока и напрежението и наличие на постоянна съставка. След намиране на средната стойност на израз (5.4), чрез интегриране в границите на един период, се получава познатият израз за активната мощност:

$$p(t) = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{U_m \cdot I_m}{2} \cdot \cos(\varphi) = U \cdot I \cdot \cos\varphi, \quad (5.5)$$

където U и I са ефективните стойности на напрежението и тока, а φ е ъгълът на дефазирание между тях.



Фигура 5.4. Времедиаграма на входната мощност ($P_{вх}, kW$) при режим P5

Тъй като се явяват множество хармоници в изразите за напрежението и тока, то изходната мощност също е представена от тези хармоници и техните суми. На фигура 5.4 е дадена графиката на входната мощност за една от фазите на захранващото напрежение при режим P5. Ясно се забелязват три основни особености, които са в съответствие с гореизложените изрази:

- удвоената честота на променливата съставка (100Hz),
- наличието на постоянна съставка,
- увеличена амплитуда на висшите хармоници.

5.1.3. Изчисление на електрическия КПД

При разглежданите режими, с които се експериментира, двата основни компонента на КПД (топлинен и електрически) се изменят в определени граници и съответно се променя глобалният КПД. Таблица 5.2 представя стойностите на измерените входна и изходна мощност, както и изчисления въз основа на тяхното отношение електрически КПД от изрази (5.1) – (5.5). От таблиците е видно, че с нарастването на натоварването на токоизточника, се увеличава и електрическият КПД. Натоварването на изправителя се увеличава или с увеличаване на работния ток или когато се повиши дебитата на плазмообразуващите газове и по-точно на азота. Като цяло входната мощност при различните режими на работа остава почти непроменена.

Таблица 5.2. Електрически КПД при $Q_{Ar}=20l/min$ и $Q_{Ni}=400gr/h$.									
	$I_T=300A$			$I_T=400A$			$I_T=500A$		
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
$P_{вх}, kW$	33,51	33,51	33,49	33,31	33,28	33,22	33,12	33,07	33,01
$P_{изх}, kW$	12,71	15,06	17,71	18,00	21,08	24,06	24,02	25,38	30,73
КПД, %	37,93	44,94	52,88	54,04	63,34	72,43	72,52	76,75	93,09

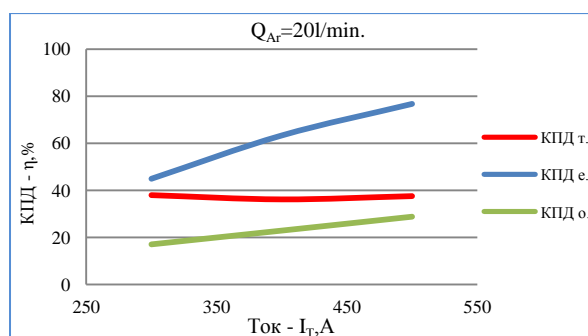
При ниски нива на натоварване, голяма част от нея се разсейва в изходната филтروва група (R7-L1-C7) и по специално в изглаждащия дросел (L1) и захранващия трансформатор, което е причина за малкия КПД. При липса на прах за напластяване, КПД варира от 34,32% до 92,55% . Добавянето на прах в генерираната плазма, слабо увеличава КПД поради нарастването на консумираната изходна мощност. Ефектът се поражда поради енергията необходима за преразпределение на температурното поле в дюзата, при въвеждането на металния прах чрез транспортния газ.

5.1.4. Изчисление на общия КПД

Общия КПД на апаратурата за плазмено напластяване е произведение от топлинния и електрическият КПД (3.12). В таблица 5.5 са представени данните за топлинния КПД (η_T). Изчисленията са направени при изходни данни за плазмотрона, константи на плазмообразуващите газове и топлинната мощност, посочени в таблици 3.5 - 3.8. Графически влиянието на работния ток върху КПД - електрически, топлинен и общ е показано на фигура 5.5.

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
$P_{изх}, kW$	12,71	15,06	17,91	18	21,08	24,06	24,02	25,38	30,73
$q_{п}, kW$	5,06	5,72	7,18	6,75	7,63	9,52	8,44	9,53	11,96
е.КПД, %	37,93	44,94	53,48	54,04	63,34	72,43	72,52	76,75	93,09
т.КПД, %	38,02	37,98	40,08	35,80	36,18	39,78	33,53	37,56	38,93
о.КПД, %	14,42	17,07	21,44	19,34	22,91	28,81	24,32	28,83	36,24

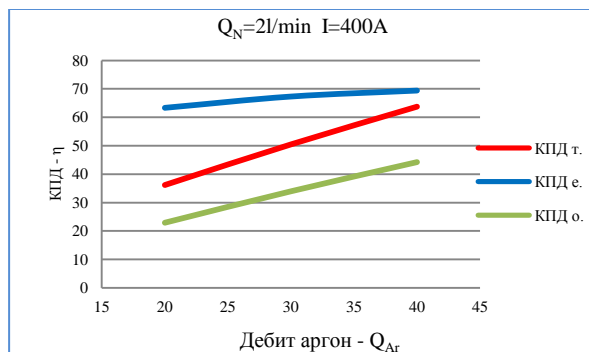
С нарастването на работния ток и двете съставки на КПД нарастват, като топлинния КПД се увеличава от порядъка на 2-5%, докато електрическата компонента до 27-30% в зависимост от дебита на аргон и азот. Стръмността при изменение на дебита на аргон се запазва еднаква, като по-бързо е изменението на топлинната компонента, отколкото на електрическата. Това се вижда на фигура 5.8, където е представена зависимостта на компонентите на КПД като функция на дебита на аргон. При изменение на дебита на аргон от 20l/min до 40l/min, т.е. със 100%, електрическият КПД нараства от 63 до 69%, докато топлинния от 36 до 64%. При промяна на дебита на азот, КПД се изменя значително повече съпоставимо с общото количество плазмообразуващ газ.



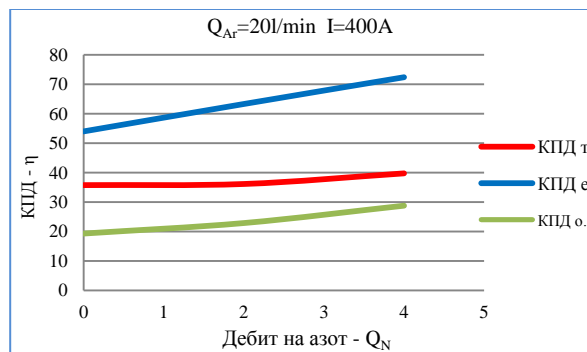
Фигура 5.5. Изменение на КПД в зависимост от работния ток при $Q_{Ar}=20l/min$.

С добавката и нарастването на азота в малки количества от 0 до 4l/min, т.е. с до 16,7% от общия дебит на газ, електрическият КПД се увеличава от 54 до 72%, докато топлинната му съставка се променя в границите на 36-40%. Графиките на тази зависимост са показани на фигура 5.9. От направените измервания се установява, че добавката на азот повлиява повече електрическият КПД докато аргонът влияе повече на топлинния

КПД. Това се обяснява със значително по-големия коефициент на топлоотдаване на азота от този на аргона към стените на камерата.



Фигура 5.8. Изменение на КПД в зависимост от дебита на аргон при $I=400A$ и $Q_N=2l/min$.



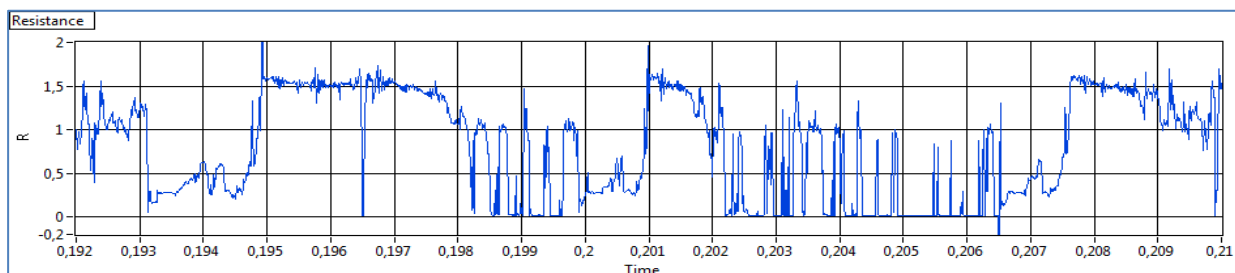
Фигура 5.9. Изменение на КПД в зависимост от дебита на азот при $I=400A$ и $Q_{Ar}=20l/min$.

Разликата в техните стойности е повече от три пъти. Това довежда до по-големи топлинни загуби в камерата на плазмотрона и съответно по-нисък топлинен КПД при азота отколкото при аргона. Увеличаването на работния ток въздейства по-силно на електрическата компонента на КПД. Добавянето на прах за напластяване слабо увеличава КПД.

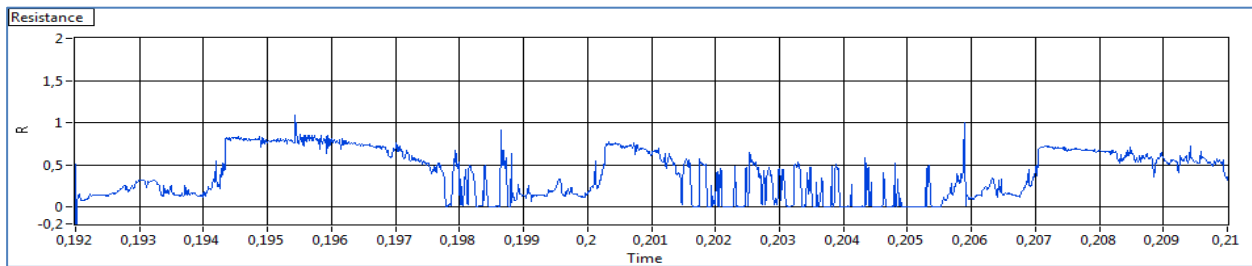
5.2. Оценка на стабилността на дъгата

Стабилността на процеса на плазмообразуване в плазмотроните за напластяване е свързан с електрическата дъга и силно зависи от някои основни параметри на режима: състав и дебит на плазмообразуващите газове, напрежение, ток на електрическата дъга и други. Промяната на един от горните параметри в някои случаи води до резки промени на енергийните характеристики на плазмотрона, а от там и до промяна на качеството на обработваната повърхност.

Особено важно е да се установи оптималната работна точка на апаратурата за напластяване, за всеки един от режимите на работа, при който се получават покрития с необходимите якостни параметри. Качествена химикотермична обработка би се получила, ако скоростта на генериране на плазмената струя е стабилна, което става при нисък коефициент на пулсации на изходното напрежение на плазмотрона. Следователно, мярката за устойчива работа и повтораемост на процеса на напластяване е стабилността на напрежението на електрическата дъга. Наличието на стабилна във времето дъга с малки флуктуации в камерата на плазмотрона, ще доведе до равномерен по дебелина слой с константни якостни характеристики по цялата площ на обработване. Същевременно ниското ниво на флуктуации намалява смущенията, генерирани от електрическата дъга в захранващата мрежа и така се подобрява електромагнитната съвместимост на процеса.

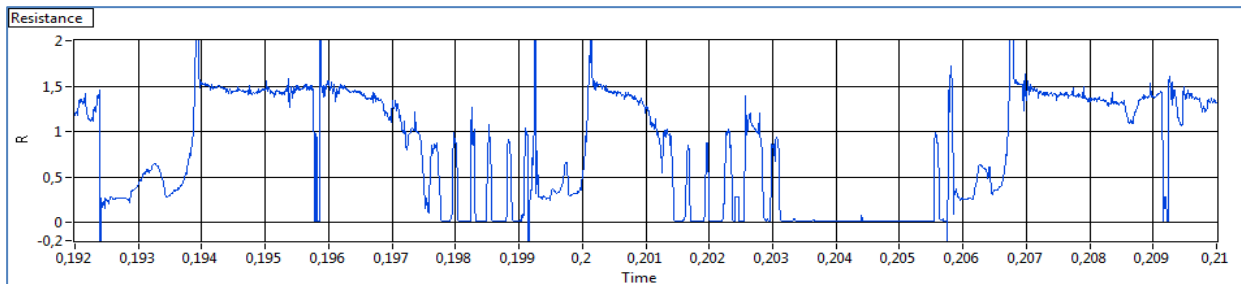


а) $I_T=300A$ (P2)

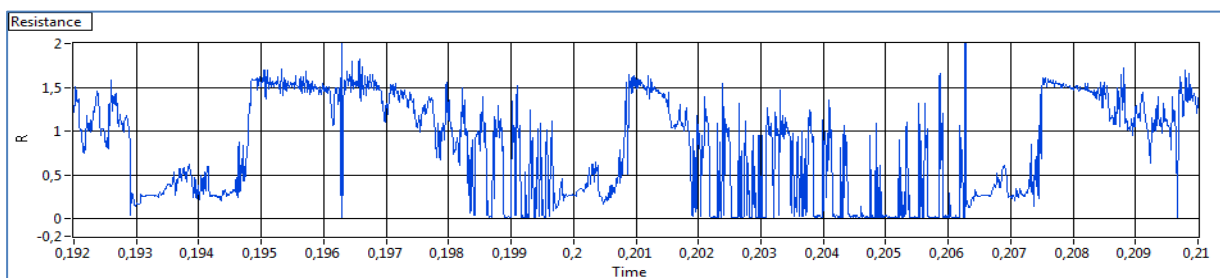


в) $I_T=500A$ (P8)

Фигура 5.10. Осцилограма на R, Ω при $I_T=300A-500A$, $Q_N=2l/min$, $Q_{Ni}=400gr/h$.



а) $Q_N=0l/min$ (P1)



в) $Q_N=4l/min$ (P3)

Фигура 5.11. Осцилограма на R, Ω при $Q_N=0-4l/min$, $I_T=300A$, $Q_{Ni}=400gr/h$.

От гледна точка на критериите за стабилност, важен фактор представлява изменението на проводимостта, респективно съпротивлението в изходната верига. На фигури 5.10 и 5.11 са показани измененията на R във времето при изменение на работния ток (300A-500A) и на дебита на плазмообразуващия газ (0-4l/min).

В глава I беше разгледана системата газова процес – хранващ блок, от гледна точка на електрическата стабилност. Този случай има пряко отношение към изследвания плазмотрон, състоящ се от газоразрядна камера и хранван от УСИ. Според израз (1.16) коефициентът на стабилност на системата за конкретния случай може да придобие вида:

$$K_{CT} = \left(\frac{\partial U_{\Pi}}{\partial I_{\Pi}} - \frac{\partial U_{УСИ}}{\partial I_{УСИ}} \right) > 0, \quad (5.6)$$

където K_{CT} - коефициентът на стабилност на свързаната система плазмотрон - хранващ източник се изразява чрез $R_D = \frac{\partial U_{\Pi}}{\partial I_{\Pi}}$ - динамичното съпротивление на дъговия разряд в плазмотрона и $R_{ДУСИ} = \frac{\partial U_{УСИ}}{\partial I_{УСИ}}$ - динамичното съпротивление на управляемия симетричен изправител (УСИ).

Различните режими на работа определят стойността на K_{CT} , който може да бъде изчислен. В режимите характеризирани с увеличена електрическа мощност респективно по-голям дебит на азот или работен ток, се наблюдава висока амплитуда на флукуациите на изходните електрически параметри – напрежение, ток, мощност. В

глава III на база получената ВАХ е изчислено, че динамичното съпротивление на УСИ е отрицателно и клони към нула ($R_{УСИ} \approx 0$), което означава, че изправителя като източник на напрежение слабо или почти никак не влияе върху стабилността на дъгата. Изправителят би оказал влияние при характеристика, където динамичното съпротивление би било отрицателно и с висока абсолютна стойност.

Таблица 5.8. Данни за R, R_{др}, K_{СТ} и толерансите им без прах за напластяване Q_{Ni}=0gr/h.

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
R _{УСИ} , mΩ	-20	-20	-20	10	0	-20	20	10	20
R, mΩ	700	840	840	560	560	540	430	420	430
R _{min} , mΩ	200	300	300	200	200	170	160	140	140
R _{max} , mΩ	1350	1550	1600	1050	1080	1000	800	760	760
ΔR, mΩ	1150	1250	1300	850	880	830	640	620	620
R _д , mΩ	305	330	262	253	246	150	224	201	114
R _{дMIN} , mΩ	285	276	215	228	218	97	187	176	79
R _{дMAX} , mΩ	360	405	312	278	300	200	244	235	127
ΔR _д , mΩ	75	129	97	50	82	103	57	59	58
K _{СТ} , mΩ	325	350	282	243	246	170	204	190	94
ΔK _{СТ} , mΩ	75	129	97	50	82	103	57	59	58
δK _{СТ} , %	23,08	36,86	34,40	20,58	33,33	60,59	27,94	31,05	61,70

Таблица 5.10. Данни за R, R_{др}, K_{СТ} и толерансите им при Q_{Ni}=800gr/h.

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
R _{УСИ} , mΩ	-20	-20	-20	10	0	-20	20	10	20
R, mΩ	820	840	860	560	420	430	330	400	410
R _{min} , mΩ	270	300	300	200	190	170	150	120	100
R _{max} , mΩ	1500	1600	1600	1050	920	970	720	680	740
ΔR, mΩ	1230	1300	1300	850	730	800	570	560	640
R _д , mΩ	341	320	245	276	214	145	209	186	120
R _{дMIN} , mΩ	300	261	193	226	191	111	179	170	82
R _{дMAX} , mΩ	373	360	327	331	256	196	240	202	158
ΔR _д , mΩ	75	99	134	105	65	85	61	32	76
K _{СТ} , mΩ	361	340	265	266	214	165	189	176	100
ΔK _{СТ} , mΩ	75	99	134	105	65	85	61	32	76
δK _{СТ} , %	20,78	29,12	50,57	39,47	30,37	51,52	32,28	18,18	76,00

В таблици 5.8 и 5.10 са представени резултатите за активното и динамичното съпротивление на дъгата при някои режими на работа на системата газов процес – хранващ блок. Представени са толерансите, максимални и минимални стойности на тези параметри като по този начин има възможност да се оцени относителното изменение на динамичното съпротивление на системата, респективно и нейната стабилност по време на работа.

Представените данни са получени на база многократни измервания като за R и R_д. В таблиците по-горе са дадени техните средни стойности, докато ΔR и ΔR_д, са получени чрез разликите:

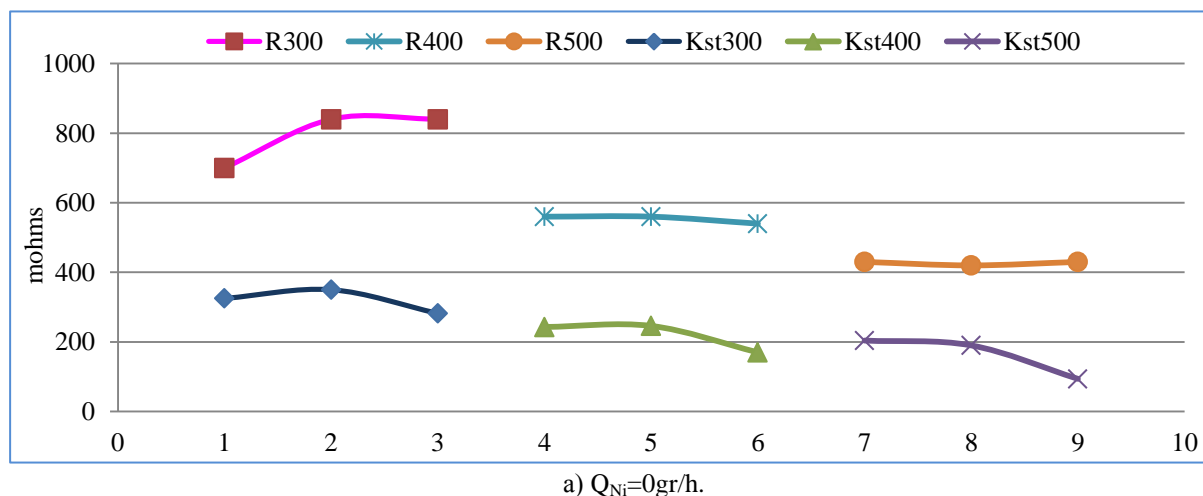
$$\Delta R_{д} = \Delta R_{дMAX} - \Delta R_{дMIN}, \quad (5.7)$$

$$\Delta R = \Delta R_{MAX} - \Delta R_{MIN}, \quad (5.8)$$

където ΔR_{MIN}, ΔR_{MAX}, ΔR_{дMIN} и ΔR_{дMAX} са минималните и максимални стойности на тези параметри при отделните реализации на различните режими. Данните показват

отклонение на съпротивлението (R) в изходната верига в интервала 70-90% от средната стойност за всяка реализация. Динамичното съпротивление (R_d) е с 2-2,5 пъти по-малка стойност от R и освен това по-време на работа се променя в по-малки относителни граници – 20-40%.

При сравнение на диференциалните съпротивления от израз (5.6) (R_d , $R_{дуси}$) се вижда, че по-силно влияние върху стабилността на системата оказва параметърът R_d , защото е до 15 пъти по-голям от $R_{дуси}$. Режимите, при които има най-малка разлика между R_d и $R_{дуси}$ са състояния на системата, при които тя е най-нестабилна и евентуални флуктуации биха я извадили от равновесие. Дъгата е най-стабилна при високи стойности на динамичното съпротивление (R_d) и големи отрицателни стойности на динамичното съпротивление на УСИ ($R_{дуси}$). Най-нестабилна е при високи положителни стойности на $R_{дуси}$ и при минимални стойности за R_d .

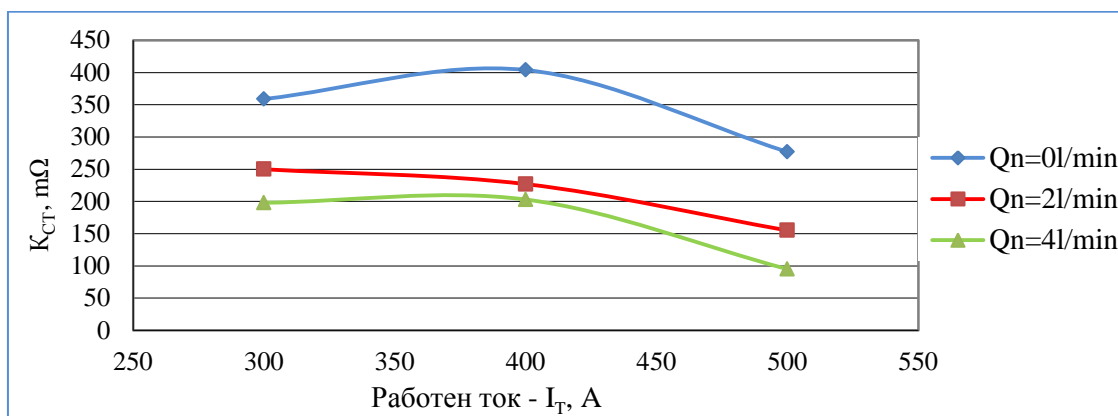


Фигура 5.12. Активно съпротивление и коефициент на стабилност $K_{ст}$, mΩ при режими на работа P1 - P9 и $Q_{Ni}=0-800$ gr/h.

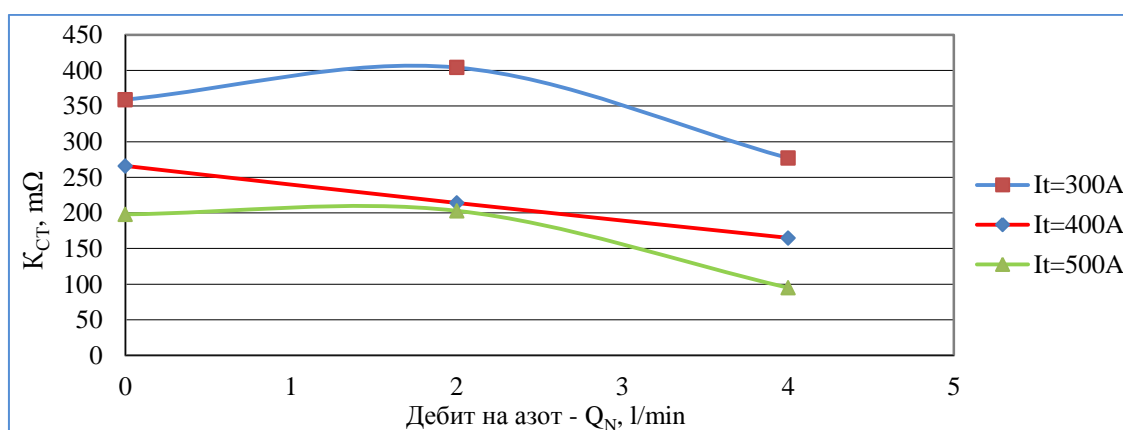
От данните за представените режими (P1 - P9), се установява висок коефициент на стабилност $K_{ст}$ при режими P1 - P3 и по-ниска с увеличаването на работния ток. Най-нисък $K_{ст}$ се наблюдава при P9 ($I_T=500A$, $Q_N=4l/min$), а най-висока стойност $K_{ст}$ има при P1 и P2 ($I_T=300A$, $Q_N=0-2l/min$). Това се дължи на намаляването на стойността на съпротивлението в изходната верига с увеличаването на работния ток. В известна степен това съпротивление е в пряка зависимост от динамичното съпротивление на дъгата - R_d , защото се наблюдава зависимост на абсолютната стойност на R от големината на пиковите във времедиagramата.

Комплексното влияние на режимните параметри върху съпротивлението на изходната верига R и върху коефициента на стабилност $K_{ст}$ на системата газов процес – хранващ блок, е представено графично на фигура 5.12 а) без прах за напластяване. Коефициентът на стабилност и съпротивлението на изходната верига имат еднакъв характер на изменение – намаляват с нарастването на работния ток. Подобен характер на изменение се наблюдава и при различни нива на дебита на праха за напластяване.

На фигури 5.14 и 5.15 са представени поотделно влиянието на режимните параметри (x_1 и x_3). Зависимостите на $K_{ст}$ от работния ток I_T (фиг.5.14) и дебита на азот Q_N (фиг.5.15), са представени като семейства характеристики с цел да се проследи влиянието на дадения параметър при различни нива на останалите и да се установи тенденцията в промяната на $K_{ст}$. Двата режимни параметъра (x_1 , x_3) имат сходно влияние върху $K_{ст}$. Характеристиките му имат спадащ характер със слабо изразени екстремуми, в средата на вариационния интервал.



Фигура 5.14. Коефициент на стабилност K_{ST} , mΩ при изменение на работния ток. Семейство характеристики при $Q_N=0-4$ l/min.



Фигура 5.15. Коефициент на стабилност K_{ST} , mΩ при изменение на дебита на азот. Семейство характеристики при $I_T=300-500$ A.

От направените изследвания може да се установят най-подходящите режими на работа на изследвания плазмотрон. От една страна с нарастването на работния ток почти линейно нараства КПД на плазмотрона, докато от друга намалява K_{ST} . Зависимостите за K_{ST} обаче, не са линейни и притежават екстремуми в средата на изследваните интервали (фиг.5.14, фиг.5.15). Най-оптимални от гледна точка на изследваните критерии за ефективност и стабилност се оказват режими P8, при които работният ток е достатъчно висок за поддържане на висок КПД на плазмотрона, като същевременно K_{ST} се поддържа на високо ниво и режим P26, при който още се повишава КПД но се работи при по-нисък K_{ST} и запасът на системата при евентуални флукуации е занижен. Стабилността на системата се увеличава и с нарастване на дебита на праха за напластяване. От тези изследвания може да се заключи, че при добавянето на допълнителен плазмообразуващ газ за повишаване енталпията на процеса плазмено напластяване, съществува оптимум на дебита му, чрез който може да се установи максимално ниво на стабилност в системата т.е. има оптимум в отношението на двата плазмообразуващи газа.

5.3. Изводи

1. Установен е характерът на изменение на изходната и входната мощност.
2. Изчислен е електрическият КПД на системата. Той варира от 37,93% до 93,09% и нараства с увеличение на работния ток.
3. При същите условия на режима общия КПД се променя от 14,42% до 36,24%. С нарастване на дебита на плазмообразуващ газ, общия КПД нараства до 68,5%.

4. Стабилността на системата е в пряка зависимост от изходното динамично съпротивление. Неговата относителна промяна при различните реализации е в границите на 20-40%, докато статичното съпротивление се изменя от 70% до 90%. Изменението на K_{CT} е в границите от 95 до 360mΩ.
5. Коефициентът на стабилност намалява с нарастване на работния ток поради силното намаляване на стойността на статичното съпротивление. Наблюдава се максимум на K_{CT} при стойност на тока 400А.
6. Същото влияние се установява и при нарастване дебита на азот. Увеличаването на флукуациите при повече азот в плазмообразуващата смес, намаляват стабилността на системата. В границите на изследвания токов диапазон (300А и 500А) съществува максимум на K_{CT} при дебит на азот 2l/min.
7. Фактор χ_4 – дебит на праха за напластяване не оказва съществено влияние върху стабилността на процеса.
8. Най-ефективни се оказват режимите – P8, P26 със следните технологични параметри: $I_T=500A$, $Q_N=2l/min$, $Q_{Ni}=400-800gr/h$. и $Q_{Ar}=20l/min$. (при P8), $Q_{Ar}=40l/min$. (при P26).

ОСНОВНИ ИЗВОДИ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ ЗА ПРАКТИКАТА

1. **Основни изводи от извършената работа при разработване на дисертационния труд „Изследване ефективността на плазмотрон с вихрова стабилизация на дъгата в процеса плазмено-прахово напластяване”**
 - 1.1. Предложена е методика за получаване на данни в реално време и тяхната статистическа обработка при работата на плазмотрон ПН-50 в процеса плазмено-прахово напластяване.
 - 1.2. Установена е степента на влияние на четирите главни фактора, определящи технологичния режим: работен ток, дебит на основен и до-пълнителен плазмообразуващ газ и дебит на прах. Доказана е адекватността на получените математични модели чрез критерий на Фишер (таблична стойност на коефициента $F_T=3,4$, получени стойности за коефициента на Фишер за оптимизационните параметри – $F_{K_{CT}}=1,7$; $F_{КПД}=2,24$ при условие за адекватност $F_T>F$).
 - 1.3. Доказано е преобладаващото влияние на два от четирите фактора върху оптимизационните параметри - работен ток и допълнителен плазмообразуващ газ.
 - 1.4. Дефиниран и оценен е общият КПД на изследвания плазмотрон при планираните режими на работа. Неговото изменение е в интервала 14,42% - 68,5%.
 - 1.5. Дефинирана и оценена е стабилността на системата захранващ източник – електрическа дъга от изследвания плазмотрон при планираните режими на работа. K_{CT} се изменя в интервала 95-360mΩ.
 - 1.6. Разработени са оптимални режими на работа, при които са получени покрития с отлични параметри при повишена стабилност на процеса и ефективна работна на плазмотрона. Технологичните параметри на режимите са:
 - режим P8 с повишена степен на K_{CT} : $I_T=500A$, $Q_{Ar}=20l/min.$, $Q_N=2l/min.$, $Q_{Ni}=400 - 800gr/h$.
 - режим P26 при повишено ниво на КПД: $I_T=500A$, $Q_{Ar}=40l/min.$, $Q_N=2l/min.$, $Q_{Ni}=400 - 800gr/h$.

2. Предложения за практиката

Дисертационният труд е насочен към изследване и развиване на технологичните параметри на индиректен плазмотрон ПН-50 в процеса плазмено-прахово напластяване. Направените изследвания по отношение на оптимизиране на технологичните параметри

при различни режими на работа и на качеството на нанесените покрития след плазмено-прахово напластяване на реални детайли с прах на никелова основа, дават основание да смятаме, че:

- 2.1. проведените изследвания чрез използваната методика за мониторинг, могат да дадат пряк и косвен икономически ефект чрез по-пълноценно използване на праха за напластяване и на консумираната енергия в процеса плазмено-прахово напластяване;
- 2.2. оценката на индивидуалното влияние на технологичните параметри в процеса и осъществената оптимизация на работния режим дават възможност за повишаване на ресурсните параметри на плазмотрона (повишаване работните часове на катода);
- 2.3. използваната методика и софтуер за мониторинг и съвместна оценка на процеса и плазмотрона може да послужи при решаването на други конструкторски и технологични задачи, свързани с модифициране на конструкцията на индиректни плазмотрони за плазмено-прахово напластяване.
- 2.4. получените данни от изследването могат да послужат като база в един следващ етап за моделиране динамиката на процеса в камерата на плазмотроните от този вид.

ПРИНОСИ НА ДИСЕРТАЦИОННАТА РАБОТА

Настоящият дисертационен труд представлява завършен етап от теоретично-експериментално изследване и оптимизация на технологичните режими на плазмотрон ПН-50 в процеса плазмено-прахово напластяване с прахове на никелова основа. Приносите от разработената дисертационна работа могат да бъдат формулирани както следва:

1. Научно-приложни приноси

- 1.1. Доказано е степента на влияние на главните четири технологични параметъра (дебит на основен и допълнителен плазмообразуващ газ, дебит на прах за напластяване, работен ток) върху режимите на работа. Установено е преобладаващото влияние на два от технологичните параметри - работен ток и дебит на допълнителен плазмообразуващ газ (азот) върху КПД и $K_{ст}$.
- 1.2. Предложена е методика за измерване и мониторинг на процеса и за обработка на получените сигнали и данни.
- 1.3. Дефиниран е и експериментално е установен общия КПД на изследвания плазмотрон ПН-50.
- 1.4. Дефинирана е и е изчислена на база получени експериментални данни стабилността на изследвания плазмотрон ПН-50.
- 1.5. Изследвано е и е установено разпределението на енергията на дъгата в честотен спектър. Потвърдена е връзката на спектъра с динамиката на процеса в плазмотрона.
- 1.6. Установени са електрическите и енергийни характеристики на изследвания индиректен плазмотрон за напластяване. Доказан е случайният характер на изменение на основните електрически величини. Потвърден е характерът на изменение на волт-амперната характеристика на плазмотрона.

2. Приложни приноси

- 2.1. Предложената методика за практическо определяне общия КПД и стабилността на индиректен плазмотрон позволява намаляването на енергийните разходи при процеса плазмено-прахово напластяване, което е косвен икономически ефект.

- 2.2. Получен е пряк икономически ефект, чрез намаляване разхода на прах за напластяване, посредством направения мониторинг на процеса и разработения оптимален технологичен режим.
- 2.3. Разработен е пакет програми (събиране на данни в реално време, възпроизвеждане и статистическа обработка на получените сигнали, изчисление на КПД, определяне на K_{CT} , спектрален анализ) на базата на софтуерния продукт LabVIEW, чрез който е осъществено планираното изследване.
- 2.4. Разработени са оптимални режими на работа на изследвания плазмотрон от гледна точка на ефективността на процеса при установяване на висок коефициент на стабилност на дъгата, чрез които са постигнати най-добри качества на покритието. Параметрите на режимите са:
 $I_T=500A$, $Q_{Ar}=20l/min.$, $Q_N=2l/min$, $Q_{Ni}=400-800gr/h.$ - P8 - повишена стабилност и запас на системата при флуктуации;
 $I_T=500A$, $Q_{Ar}=40l/min.$, $Q_N=2l/min$, $Q_{Ni}=400-800gr/h.$ - P26 - повишен КПД..

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дисертационният труд е насочен към изследване и развиване на технологичните параметри на индиректен плазмотрон в процеса плазмено-прахово напластяване. Направените изследвания по отношение на оптимизиране на технологичните параметри и изследване на качеството на нанесените покрития след плазмено-прахово напластяване, дават възможност да се установят експлоатационните свойства на получените покрития, както и граничните стойности на параметрите на основните режими на процеса и могат да станат основа за подобрене на конструкциите на индиректните плазмотрони, за създаването на модели и решаването на други конкретни задачи в тази област.

Настоящата работа се явява един основен етап от изследването в тази специфична област на плазмено-праховото напластяване с индиректен плазмотрон.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ТЕМАТА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Nedelchev I., "Stability of the indirect plasmatron in the plasma spray coating process" – под печат.
2. Неделчев И., Скулев Хр., Василев Р., „Влияние на технологичните параметри на режима върху стабилността на работа на плазмотрон с индиректна дъга“, Известия на съюза на учените във Варна - 1, стр.122-126, ISSN: 1310-5833, 2012г.
3. Nedelchev I., Zhivomirov Hr., Vasilev R., „Processing of random signals, obtained by investigation of the plasma coating systems with LabView software“, International Scientific Symposium „Electrical Power Engineering 2014“, Varna, Proceedings of International Scientific Symposium Electrical Power Engineering 2014, pp. 143 - 147, ISBN: 978-954-20-0497-4, September 11 – September 13 2014.
4. Неделчев И., Цаневски А., Василев Р., Едно приложение на платформата NI ELVIS II за визуализация на електрически сигнали, сп. „Машиностроителна техника и технологии“, стр. 76 – 81, 2014г.
5. Василев Р., Неделчев И., Василева В., Донева М., „Приложение на NI ELVIS II при определяне показателите на качеството на електрическата енергия“, XIX научен симпозиум с международно участие “Метрология и метрологично осигуряване 2009” - гр. Созопол, стр. 277 - 281, 10 -14 септември 2009г.
6. Василев Р., Неделчев И., Маринов Ил., Димитров Д., „Методика за оценяване на неопределеността при измерване на входяща мощност“, Трети международен научен конгрес, ТУ-Варна, България, том III, стр. 191 - 196, 4 - 6 Октомври 2012г.

DISERTATION TITLE:

“ Examination of the indirect electroarc plasmatron with steam-vortex arc stabilization in process of plasma spray coating”

AUTOR: Ivaylo Yordanov Nedelchev

ANNOTATION

The dissertation work is oriented towards the study of the process plasma spray coating and improving its stability and efficiency as well as quality of the final product. Measurements were performed on indirect plasmatron with steam-vortex arc stabilization. Using a multi-channel data acquisition monitoring system (NI-ELVIS II) were tested main nodes of the the system. The obtained electrical signals are processed via LabVIEW software programs, created for each matematical operations and interpreted in accordance with the physical characteristics of the process.

It is made a preliminary assessment studies for: volt-ampere characteristic of the APN-50 and the temperature of the plasma jet; it is planned experiment to determine the significant factors affecting over the efficiency of the process of plasma spray coating, it is assessed the influence of technological process parameters on the electrical quantities of the system.

Using obtained data, the real assessment of the electric, thermal and general efficiency of the equipment for plasma spray coating with APN-50 is calculated. It is found its levels during the main modes of the process.

It is defined the stability coefficient of the equipment for plasma spray coating and using received data from DAQ system this coefficient of stability is estimated.

From all received and processed data in this research is developed a technological regime for plasma spray coating with nickel-based powder materials.

The determination of the efficiency and stability in the process of plasma spray coating provides a better quality of the obtained coatings in terms of their hardness, endurance and adhesion strength and creates a high level of repeatability of the parameters of the resulting products. By examining the energy parameters of the process is evaluated its effectiveness and thus to reduce the cost of the resulting coatings to reduce the energy input and the amount of powders coating material. This is made possible through correct and adequate monitoring of the whole process.