

Л. В. ЛИТОВЧЕНКО, В. П. КОЛЕСНИК, О. М. ЧУГАЙ, А. О. БОЯРКІН,
Д. В. СЛЮСАР, М. П. СТЕПАНУШКІН, С. В. ОЛІЙНИК

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», Україна

ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ІНВЕРСНОЇ МАГНЕТРОННОЇ РОЗПОРОШУВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ ПОКРИТТІВ (ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ РОЗРОБКИ РЕЗИСТИВНИХ ЛАНЦЮЖКІВ У СКЛАДІ ГЕНЕРАТОРА ПЛАЗМИ)

Продовжено розгляд особливостей побудови системи електроживлення дослідно-промислової технологічної установки для нанесення багатокомпонентних покриттів іонно-плазмовим методом. Головну увагу приділено практичним аспектам розробки керованих резистивних ланцюжків, з'єднаних з різними елементами схеми електроживлення технологічного генератора плазми. Відзначено, що управління режимом роботи технологічної установки забезпечується зміною опору цих ланцюжків відповідною автоматизованою системою. Запропоновано математичний вираз у вигляді поліному для опору ланцюжків, який відповідає вимогам до дослідницької установки та умові мінімізації кількості резисторів в окремому ланцюжці. Розглянуто структуру ланцюжка як з'єднання необхідної кількості клітинок. Кожна з цих клітинок відрізняється від інших не лише схемою з'єднання резисторів, але й їхнім опором. Запропоновано алгоритм визначення номінального опору, потужності теплових втрат, кількості резисторів та схеми їх з'єднання в ланцюжок. Для прикладу наведено схему та основні технічні характеристики ланцюжка, з'єданого з групою катодів-мішеней з вольфраму. Такі катоди використовуються при формуванні на поверхні металевих деталей наноструктурованих та багатофункціональних покриттів з карбиду вольфраму. Особливу увагу приділено керуючим елементам у складі окремих клітинок технологічного генератора плазми. Здійснений аналіз вимог до керуючих елементів стосовно напівпровідникових ключів та електромагнітних реле. Відзначено, що у повній мірі цим вимогам задовольняють звичайні (не високовольтні) електромагнітні реле вітчизняного виробництва за умови послідовного з'єднання їх електричних контактів одне з одним. Звернено увагу на необхідність запобігання утворенню внаслідок явища електромагнітної індукції електричної дуги при розмиканні контактів реле, що може досягатись додатковим включенням до складу керуючого елемента послідовно включених резистора та конденсатора. Також важливо використовувати засоби примусового повітряного охолодження блока резистивних ланцюжків.

Ключові слова: системи електроживлення; резистивний ланцюжок; резистор; резистивна клітинка.

Вступ. Мета роботи

Багатокомпонентні, багат шарові та функціонально-градієнтні покриття знаходять все більш широке використання у різних галузях промисловості [1, 2]. Тому розробка нових технологій формування таких покриттів безумовно є актуальною. Значимо, що існуючі технології потребують попереднього виготовлення сплавів, з яких формуються покриття [3...8]. Це суттєво обмежує управління складом покриттів. У Національному аерокосмічному університеті ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» розроблено нові іонно-плазмові технології формування покриттів, в яких

зроблено спробу усунути зазначений недолік існуючих технологій. У відповідному технологічному обладнанні використовуються розпорошувальні системи [9, 10], які є різновидом інверсних магнетронних систем [11]. Однією з проблем, яку необхідно було вирішити при розробці розпорошувальної системи, є створення системи електроживлення, яка б забезпечувала керовану подачу напруги на кожен елемент генератора потоку матеріалу покриття з використанням ланцюжка резисторів. В нашій попередній статті [12] обґрунтовано схему електроживлення (СЕЖ) інверсної магнетронної розпорошувальної системи у складі дослідно-промислової технологічної установки (ДПТУ) для формування багато-

компонентних покриттів. У даній схемі важливе значення мають ланцюжки резисторів, через які напруга подається до кожного елемента технологічного генератора плазми, що створює газовий розряд у просторі між електродами. Такі ланцюжки обмежують струм в розрядному колі і виконують функції регулятора режиму розряду, тобто регулюють фізико-технічні параметри зони генерації іонів газів, що має безпосередній вплив на характеристики створюваних покриттів. Метою цієї статті є розкриття практичних аспектів визначення структури окремого резистивного ланцюжка, типу й параметрів резисторів, а також типу елементів їх комутації.

Основні результати та рекомендації

Регулювання режиму роботи зазначеного у попередній роботі [12] технологічного генератора плазми, здійснюється зміною потенціалів на елементах цього генератора. Оскільки цей генератор живиться від єдиного джерела, то в мережі живлення кожного елемента чи їх з'єднань використовується той або інший резистивний ланцюжок, який утворено потрібною кількістю резистивних клітинок (рис. 1). Резистивна клітинка – це елемент резистивного ланцюжка, що складається з резисторів (одного чи декількох), які з'єднані паралельно (іноді може бути послідовне чи змішане з'єднання) між собою. Резистори клітинки можуть бути виключені з електричної схеми шляхом закорочення (див. рис. 1). Така структура резистивного ланцюжка дає можливість гнучко змінювати опір у розрядному колі для регулювання параметрів процесу створення багатокомпонентних покриттів. Виходячи зі структури і функцій резистивної клітинки, її опір визначається її положенням в структурі ланцюжка і має відповідати тому чи іншому елементу поліному

$$R_{\Sigma} = a_0 2^0 (1\Omega) + a_1 2^1 (1\Omega) + a_2 2^2 (1\Omega) + \dots \\ \dots + a_k 2^k (1\Omega) = (a_0 + 2a_1 + \dots + a_k 2^k) \Omega, \quad (1)$$

де $a_i = [0; 1]$, тобто a_i приймає значення 0 (клітинка закорочена) або 1 (клітинка має опір більше нуля).

Але окрім загального опору кожна клітинка повинна бути розрахована на відповідне падіння напруги, а також на розсіювання в ній теплових втрат, які вивільняються при проходженні струму. Беручи до уваги параметри СЕЖ (максимальна напруга 2500 В, потужність 20 кВт), в клітинках її баластних ланцюжків використовують резистори типу С5-35В (табл. 1).

Зазначимо, що вибір саме цього типу резисторів визначається кількома чинниками. Перший – значна потужність теплових втрат, які можуть вивільнятися на одному резисторі (до 160 Вт). Другий –

достатньо широкий діапазон зміни номіналів резисторів, які виготовляються вітчизняною промисловістю, а відтак наявність резисторів цього типу на ринку України. І, нарешті, третій – порівняно невисока ціна резисторів, що забезпечує задовільне співвідношення ціна/якість.

Таблиця 1
Деякі характеристики резисторів С5-35В

Номінальна потужність, Вт	Діапазон номінальних опорів*, Ом
3	1...5600
8	1...12·10 ³
10	1...16·10 ³
16	1...24·10 ³
25	1...39·10 ³
50	1...110·10 ³
80	1...200·10 ³
100	1...240·10 ³
160	1...240·10 ³

*Проміжні значення номінальних опорів відповідають рядам Е12 та Е24 з допусками $\pm 10\%$ і $\pm 5\%$ відповідно [13].

Зупиняючись на виборі структури та складу кожної клітинки резисторів необхідно враховувати, що:

1. Не існує обмежень на структуру клітинки й відповідно на кількість резисторів у ній.

2. При виборі опору кожного резистора зі складу клітинки слід виходити з відповідного ряду номіналів. Зокрема у випадку резисторів С5-35В бажано користуватися рядами Е12 або Е24 (з допусками $\pm 10\%$, $\pm 5\%$; відповідно). Причому перевагою ряду Е24 над рядом Е12 є не тільки вдвічі більша кількість номіналів опору у ряді, а й більш висока ($\pm 5\%$) точність виготовлення резисторів.

3. Зміна структури клітинки, вочевидь, зумовить перерозподіл напруги на резисторах з її складу, а отже і потужності теплових втрат, які будуть вивільнятися на кожному з них.

4. Оскільки технологічну установку призначено для досліджень, необхідно забезпечити керованість режимом її роботи навіть у випадку непередбачених ситуацій. Останні можуть бути пов'язані з фізичними, технічними та іншими чинниками. Тому важливо мати запас як потужності, так і максимального опору ланцюжка. З цього приводу зазначимо, що в техніці зазвичай використовують коефіцієнт запасу, значення якого знаходяться в інтервалі 1,4...2,0. Вибір параметрів резисторів доцільно виконувати з урахуванням реальних струмів у ланцюжках резисторів і падіння напруги на кожному з них. У наших

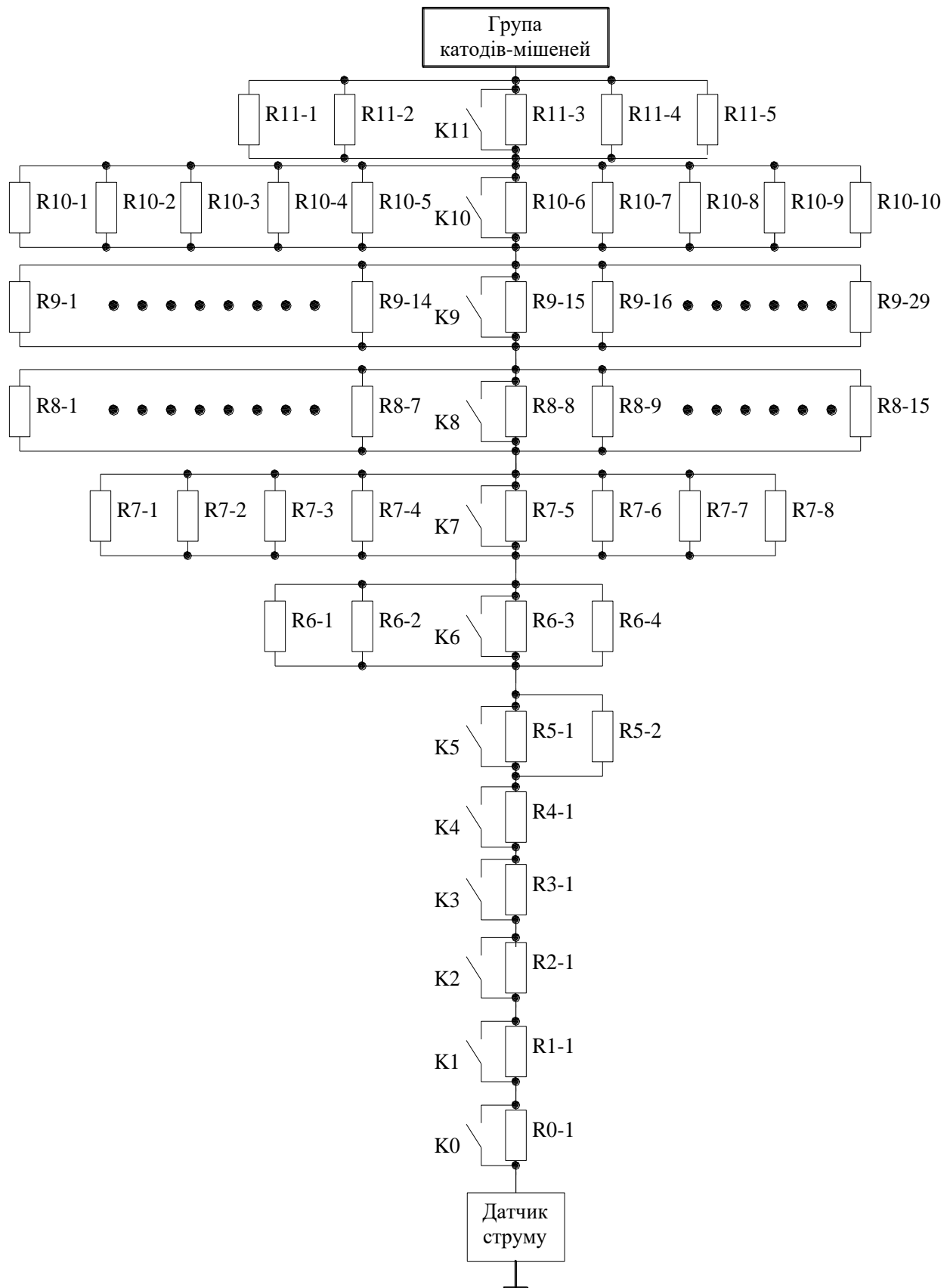


Рис. 1. Принципова схема резистивного ланцюжка в мережі живлення груп катодів – мішеней з вольфраму

дослідах ці дані було отримано з протоколів експериментів, під час яких формувалось покриття WC. Для кожного з його компонентів вимірювались вольт-амперні характеристики розряду на групах катодів-мішеней. У роботі [12] такі характеристики показано на рис. 1.

Далі наведемо значення напруги, сили струму, опору, кількості та структури клітинок резистивного ланцюжка СЕЖ, що використовується в згаданій вище магнетронній розпорощувальній системі для формування багатокомпонентних покриттів. Зазначимо, що у випадку зміни параметрів СЕЖ, кількості та типу компонентів або шарів покриття алгоритм вибору резисторів для формування клітинок кожного резистивного ланцюжка залишається незмінними.

СЕЖ зазначеної установки дозволяє задавати режими, які характеризуються повним струмом джерела живлення, тобто сумою струмів через усі елементи зі складу установки. Цей параметр може становити: 1, 2, 3, 4, 5 та 6 А. Як приклад, в табл. 2 наведено одержані шляхом розрахунків електричні параметри, що характеризують функціонування усієї СЕЖ та групи катодів-мішеней з вольфраму при силі повного струму 6А. Якщо ж для живлення генератору знадобиться більш потужне джерело, то це лише призведе до збільшення кількості клітинок в ланцюжку та потужності теплових втрат на них.

В таблиці 3 наведені додаткові дані щодо складу та функціонування ланцюжка, який включено до мережі живлення групи катодів-мішеней з вольфраму. Схему цього ланцюжка показано на рис. 1. Вказані дані також одержано на основі вольт-амперних залежностей струму через групу катодів-мішеней

від напруги на ній при різних повних струмах технологічного генератора.

В першому ряді цієї таблиці наведено номер клітинки резистивного ланцюжка. Їх кількість визначається необхідним максимальним опором ланцюжка з урахуванням прийнятого запасу цього параметра. Другий ряд таблиці – сукупність значень повного опору відповідної резистивної клітинки (визначається згідно поліному (1)). В третьому ряді наведено дані щодо режиму роботи СЕЖ у цілому, який визначається інтервалом зміни її повного струму. В четвертому ряді наведено силу повного струму через клітинку (з «запасом», про який зазначалось вище). В п'ятому ряді вказано максимально можливі падіння напруги на кожній клітинці ($U_{i,max} = R_i \times I_{max}$). І нарешті, в шостому ряді вказано максимальні значення потужності теплової енергії, що може вивільнятися на резистивній клітинці згідно зі співвідношенням $P_i = U_{i,max} \times I_{max}$. Як бачимо з таблиці, зі збільшенням номеру клітинки та її опору зростає напруга на ній та потужність теплових втрат. Але ця закономірність порушується, починаючи з десятої клітинки оскільки ця і наступна клітинки можуть бути використаними тільки в режимі відносно малих струмів. Тому і значення $U_{i,max}$ і P_i для цих клітинок дещо менші.

Наведені дані свідчать про те, що напруга на ланцюжку резисторів та сила струму через його клітинки змінюється в досить широких межах. Зважаючи на це, а також на дослідницький характер створеної установки можна стверджувати, що крок зміни опору в ланцюжках в мережах живлення кожного з електродів технологічного генератора доцільно

Таблиця 2

Параметри СЕЖ та резисторів в ланцюжку, з'єднаному з групою катодів-мішеней з вольфраму

Напруга на виході джерела живлення, В	Струм через ланцюжок, А	Напруга на проміжку анод – група катодів-мішеней, В	Напруга на ланцюжку, В	Повний опір ланцюжка, Ом	Потужність теплових втрат на ланцюжку, Вт
1740,0	1,23	1360,0	380,00	309,45	466,64
1617,0	1,47	1226,0	391,00	266,35	573,99
1525,8	1,71	955,7	570,16	333,82	973,84
1483,1	1,74	869,2	613,88	352,80	1068,2
1483,1	1,77	779,1	703,96	397,27	1247,4
1473,9	1,79	675,8	798,09	446,36	1427,0
1473,9	1,84	554,5	919,40	500,76	1688,0
1486,1	1,84	412,8	1073,3	584,61	1970,7
1486,1	1,85	309,5	1176,6	635,33	2179,1
1501,4	1,85	225,4	1276,0	688,98	2363,1
1513,6	1,88	179,8	1333,8	707,98	2513,0
1535,0	1,85	66,86	1468,1	792,72	2719,0
1562,5	1,85	35,63	1526,8	824,43	2827,7

Таблиця 3

Електричні параметри, що характеризують функціонування резистивних клітинок ланцюжка у складі мережі живлення групи катодів-мішеней з вольфраму

№ клітинки, i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Опір R_i , Ом	1	2	4	8	16	32	64	128	256	512	1024	2048
Значення повного струму джерела, А	1-6	1-6	1-6	1-6	1-6	1-6	1-6	1-6	1-6	1-6	2	1
Максимальний струм, А	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1,2	0,6
Максимальна напруга $U_{i,max}$, В	3	6	12	24	48	96	192	384	768	1536	1228,8	1228,8
Потужність теплових втрат P_i , Вт	9	18	36	72	144	288	576	1152	2304	4608	1474,56	737,28

прийняти рівним 1 Ом. Згідно з даними таблиці 3, найбільший опір ланцюжка становить близько 4 кОм, що, на нашу думку, достатньо для практичних потреб. Оскільки при визначенні напруги на клітинці (див. табл. 3) було використано завищене в 1,58 рази значення струму (3 А замість 1,9 А), то в дійсності напруга на ланцюжку не буде перевищувати 1500 В. Причому будь-який момент часу під напругою знаходяться лише кілька клітинок. Отже, напруга на кожній з них менша за зазначену.

Вочевидь, структура кожної клітинки визначається номінальними значеннями опорів резисторів у її складі та допустимою потужністю теплових втрат на кожному з них. При цьому загальний опір клітинки має дорівнювати необхідному.

Враховуючи все сказане вище, можна запропонувати такий алгоритм вибору резисторів в складі кожної клітинки:

1. З другого рядку таблиці 3 визначається повний опір відповідної клітинки.

2. Використовуючи останній рядок табл. 3, визначається потужність теплових втрат на цій клітинці.

3. Виходячи з одержаних в п. п. 1 і 2 результатів і даних таблиці 1, з'ясовується, чи можна реалізувати відповідну клітинку за допомогою одного резистора, тобто чи виробляються резистори з потрібним опором та потужністю теплових втрат.

4. Якщо це так, то з ряду E24 [13] вибирається значення опору резистора, найближче за номіналом до потрібного. Застосовність резистора для створення клітинки, перевіряється порівнянням відхилення номіналу вибраного резистора до визначеного в табл. 3. Це відхилення не повинно перевищувати 5%. Якщо ж відхилення більше, ніж припустиме

згідно ряду номіналів, то слід продовжити пошук, переходячи до наступного або попереднього ряду номіналу і повторюючи всю описану процедуру.

5. Якщо ж потрібний опір з визначеною потужністю теплових втрат неможливо реалізувати за допомогою одного резистора, то слід вибрати структуру клітинки з паралельним, послідовним або змішаним з'єднанням резисторів, опори яких відповідають даним таблиці 1, ряду номіналів E24 [2] і величині потужності теплових втрат клітинки згідно табл. 3.

6. Формування наступних клітинок резистивного ланцюжка відбувається згідно п. п. 1...5 поки не буде створено весь ланцюжок.

Зауважимо, що при конструюванні клітинок резистивного ланцюжка слід надавати перевагу паралельному з'єднанню резисторів, оскільки порушення їх послідовного з'єднання призводить до розриву мережі клітинки. У той же час, вихід з ладу одного з паралельно з'єднаних резисторів лише призводить до зміни повного опору клітинки, що може бути скомпенсоване системою управління при наявності датчиків струму в кожному ланцюжку, а також датчиків напруги на кожному елементі технологічного генератора. З іншого боку, кількість резисторів у клітинці слід мінімізувати з міркувань забезпечення більшої надійності схеми.

В табл. 4 наведено результати формування згідно з описаним алгоритмом (див. п. п. 1...6) резистивного ланцюжка (див. рис. 1), що забезпечує подачу напруги на групу катодів-мішеней з вольфраму.

За описаним алгоритмом вибираються резистори у складі ланцюжків, які з'єднано з іншими елементами технологічного генератора плазми.

Таблиця 4

Характеристики резисторів клітинок у складі ланцюжка, що забезпечує напругу на групі катодів-мішеней з вольфраму

№ клітинки, i	Тип резистора	Номинал опору клітинки, Ом	Номинал опору резистора, Ом	Потужність одного резистора, Вт	Кількість резисторів у клітинці	З'єднання резисторів
0	C5-35B	1	1	10	1	-
1		2	2	25		
2		4	3,9	50		
3		8	8	80		
4		16	16	160		
5		32	62	160	2	Паралельне
6		64	2x240+2x270	160	2+2	
7		128	1050	160	8	
8		256	3900	160	15	
9		512	12000	160	29	
10		1024	10500	160	10	
11	2048	10500	160	5		

Таблиця 5

Характеристики резисторів зі складу клітинок, що забезпечує напругу для групи підкладок

№ клітинки, i	Тип резистора	Номинал опору клітинки, Ом	Номинал опору резистора, Ом	Потужність одного резистора, Вт	Кількість резисторів у клітинці	З'єднання резисторів
i=0	C5-35B	1	1	3 (7,5)	1	-
i=1		10 ⁶	2x10 ⁵	80-160	5	Послідовне

Виключення становить лише ланцюжок в мережі живлення групи підкладок. Особливість використання цього ланцюжка полягає у тому, що при формуванні покриттів реалізуються два режими роботи з участю підкладки: чистка та осадження покриття. При першому режимі здійснюється підготовка поверхні підкладки до осадження покриття і підкладка відіграє роль катоду – мішені. В цьому випадку опір резистивного ланцюжка має становити близько 1 Ом.

У той же час в режимі осадження покриття опір ланцюжка має бути достатньо великим, наприклад 1 МОм, оскільки призначення резистивного ланцюжка в цьому режимі полягає лише в забезпеченні стікання з поверхні підкладки заряду іонів, що утворилися як з газу так і з компонентів покриття. Отже задача формування означеного покриття спрощується тим, що необхідно забезпечити лише два його стани: низькоомний та високоомний. Тому ланцюжок буде мати в своєму складі тільки дві клітинки. Відповідну схему та номінальні значення опору резисторів цього ланцюжка наведено на рис. 2 і в табл. 5.

Спільною рисою схем резистивних ланцюжків, зображених на рис. 1 та рис. 2, є наявність комутуючих елементів, які можна також назвати ключами. Призначення цих як і будь-яких управляючих еле-

ментів полягає в зміні свого стану при надходженні відповідного керуючого сигналу. Ключ має два стани: включено та виключено. У першому стані ключ з'єднує відповідні виводи резистивної клітинки, виводячи тим самим резистори зі складу електричної мережі живлення того чи іншого елемента плазмового технологічного джерела. Перебуваючи у другому стані, ключ ніяк не впливає на роботу цього джерела.

Звертаючись до інших практичних аспектів створення СЕЖ в складі ДПТУ, зазначимо, що резистори C5-35B розраховано на їх повітряне охолодження. Тому при конструюванні ланцюжків з цих резисторів необхідно використовувати вентилятори. З огляду на це, під кожною платою з блоками резистивних ланцюжків було встановлено окремий вентилятор охолодження.

Добре відомо, що при замиканні або розмиканні електричної мережі на комутуючому елементі вивільняється енергія електричного розряду, величина якої залежить від властивостей ключа, стану та параметрів мережі. При цьому особливо небезпечним є випадок виникнення в комутуючому елементі електричного пробоя, що зазвичай призводить до пошкодження цього елемента.

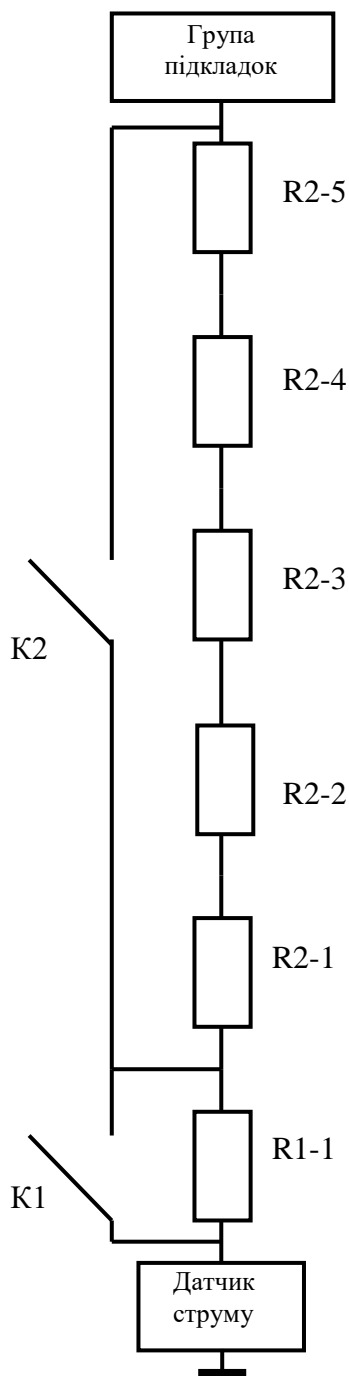


Рис. 2. Принципова схема резистивного ланцюжка в мережі живлення підкладок

Існують чисельні елементи, які можуть виконувати функції електричного ключа. Але важливо, щоб ключ мав електричне управління. З огляду на це зазначимо, що існують лише два класи пристроїв, які відповідають цій вимозі – напівпровідникові та електромагнітні ключі. До напівпровідникових ключів відносяться різноманітні транзистори та тиристори [14, 15], до електромагнітних ключів - електромагнітні реле.

Щоб обґрунтувати свій вибір на користь одного з цих типів ключів зупинимось на особливостях їх функціонування в складі резистивних ланцюжків.

1. Вхідний (від системи управління) сигнал на ключ має бути електрично ізольованим від керованої ним мережі, оскільки в останній можуть формуватися достатньо високі перепади напруги. Цій вимозі задовольняють обидва класи зазначених комутуючих елементів.

2. Ключ має стабільно функціонувати за високої напруги на клітинці та при загальній силі струму в ній до 10 А. Цим вимогам також задовольняють обидва класи комутуючих пристроїв.

3. При перемиканні електричної мережі між елементами ключа не повинен виникати дуговий розряд, що зазвичай призводить до руйнації ключа. Цю задачу може бути вирішено за допомогою обох класів комутуючих пристроїв, але за умови використанні додаткових елементів.

4. При виконанні команди від системи управління ключ має формувати відповідний сигнал, який надходить до системи управління. Цю функцію також можуть виконувати комутуючі пристрої обох класів.

5. Вхідний електроопір ключа має бути достатньо малим, або великим, коли він перебуває в стані «включено» та «виключено» відповідно. На жаль у включеному стані опір напівпровідникових ключів становить десятки, а, іноді, і сотні Ом. Тому ці ключі можуть використовуватись в складі тільки тих клітинок, опір яких набагато перевищує вказані значення. На противагу таким ключам електромагнітні реле мають перехідний опір на рівні сотих або тисячних часток Ому і тому можуть застосовуватись в будь-якій клітинці.

6. Бажано, щоб швидкодія комутуючого пристрою перевищувала характерний час зміни процесів у тліючому розряді. На жаль, цій вимозі не задовольняють ключі обох класів.

Отже в ланцюжках зі складу технологічного джерела плазми в якості комутуючих елементів доцільно використовувати саме електромагнітні реле [16, 17].

Загальновідомо, що електромагнітне реле складається з керованої та керуючої частин, які електрично не пов'язані між собою. Причому завжди сила струму у керованій частині набагато більше, ніж в керуючій. Важливо пам'ятати, що коли керована частина знаходиться під високою напругою по відношенню до частини керованої, то електрична ізоляція має необхідну міцність. Ця обставина повинна враховуватись при виборі типу реле [18]. Зупиняючись на виборі режиму роботи контактів реле, зазначимо необхідність врахувати силу і характер ко-

мутованого струму, тип електричного навантаження мережі, загальну кількість і частоту комутацій.

Наступним кроком в виборі реле є встановлення його типу з огляду на високу напругу (до 2...3 кВ) між складовими цього елемента та середнього значення сили комтуваного струму (до 6...10 А). Крім того необхідно врахувати й інші вимоги, викладені в п.п. 1...6.

Слід зазначити, що високовольтні реле, які використовуються на промислових підприємствах, зокрема, на електротранспорті, не можна використовувати з причини їх великих розмірів та маси. Відомі реле й перемикачі, що одержали назву «вакуумні». Але промисловість України не виготовляє такі елементи, а використання імпортованих аналогів, зокрема реле фірми GIGAVAC [19, 20] унеможливується їх високою ціною.

Тому вихід з описаної ситуації може полягати в використанні для комутації електричної мережі не одного, а кількох контактів реле, з'єднаних один з одним послідовно. Але досвід використання реле свідчить про те, що контакти цього пристрою спрацьовують неодноразово. Причому, оскільки реле перемикає електричне коло, опір якого має індуктивний характер, то найбільш важким для контактів є саме процес розмикання кола, коли внаслідок явища самоіндукції може утворитися дугувий розряд між контактами, що визначає знос контактів. Для боротьби з цим явищем застосовуються елементи гасіння дуги, які у той чи інший спосіб підключаються до контактів реле. Найчастіше, як свідчить досвід, дуга виникає лише на одному з кількох включених послідовно контактів. Щоб запобігти виникненню дуги паралельно кожній групі контактів (а краще кожному з них) приєднують RC-ланцюжок з постійною часу, що суттєво перевищує характерний час розривання контактів реле.

Таким чином, існує можливість комутації клітинок в ланцюжках за допомогою звичайних (не високовольтних) реле за умови використання зазначених засобів захисту контактів.

У створеній в Національному аерокосмічному університеті ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» СЕЖ в складі ДПТУ використано електромагнітні реле типу РПЛ-140 з приставками ПКЛ-40. На рис. 3 показано принципову електричну схему з'єднання, у складі однієї клітинки, групи контактів означених реле та приставки. Особливістю цієї схеми є те, що для під'єднання до клітинки використовується чотири з'єднаних послідовно контакти приставки ПКЛ-40. Це підвищує надійність електричного від'єднання силової мережі від мережі управління СЕЖ. Крім того, для підвищення надійності та ресурсу роботи зазначеної схеми необхідно використовувати оптронну розв'язку каналу

керування електромагнітними реле та каналу контролю спрацьовування реле. Додаткова доцільність використання таких розв'язок полягає в підсиленні сигналів.

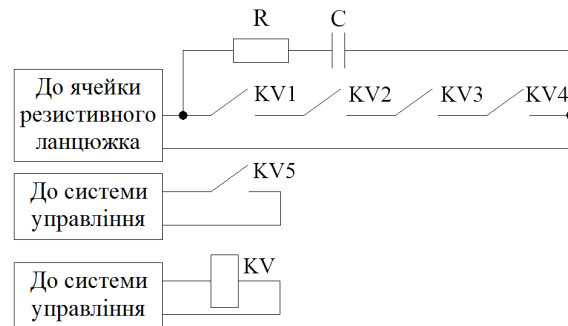


Рис. 3. Принципова схема підключення реле до клітинки резистивного ланцюжка та системи управління

Висновки

Підсумовуючи, можна стверджувати, що особливості функціонування інверсної магнетронної розпорошувальної системи для формування багатоконпонентних покриттів визначають цілу низку вимог до резистивних ланцюжків та елементів їх комутації. Зокрема структура й параметри ланцюжка достатньо жорстко визначаються його місцем в системі електроживлення, тобто тим, в мережі живлення якого електрода технологічного джерела плазми використовується конкретний ланцюжок. Особливу увагу необхідно приділяти підбору елементів комутації ланцюжків. Наведено один з можливих методів вирішення цих проблем. В якості прикладу розглянуто ланцюжки в мережах живлення груп катодівмішеней з вольфраму для використання в лабораторній дослідницько-промисловій установці, яку створено у Національному аерокосмічному університеті ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут».

Література

1. Tribology of multilayer coatings for wear reduction: A review [Text] / Mahdi Khadem, Oleksiy V. Penkov, Hee-Kyung Yang, Dae-Eun Kim // Friction. – 2017. – No. 5(3). – P. 248–262.
2. Gradient coating for NIF double shell targets [Text] / H. Xu, H. Huang, J. Walker, M. Schoff, F. Elsner, M. Farrell // Surface & Coatings Technology. – 2018. – No. 349. – P. 838–845.
3. Movchan, B. A. High-Temperature Protective Coatings Produced by EB-PVD [Text] / B. A. Movchan,

К. Yu. Yakovchuk // *Journal of Coating Science and Technology*. – 2014. – Vol. 1, No. 2. – P. 96 – 110.

4. Яковчук, К. Ю. Теплопроводность и термодолговечность конденсационных термобарьерных покрытий [Текст] / К. Ю. Яковчук // *Соврем. электрометаллургия*. – 2014. – № 4. – С. 25 – 31.

5. О воспроизводимости однофазного структурного состояния многоэлементной высокоэнтропийной системы Ti–V–Zr–Nb–Hf и высокотвердых нитридов на ее основе при их формировании вакуумно-дуговым методом [Текст] / О. В. Соболев, А. А. Андреев, В. Ф. Горбань, Н. А. Крапивка, В. А. Столбовой, И. В. Сердюк, В. Е. Фильчиков [Текст] // *Письма в ЖТФ*. – 2012. – Том 38, вып. 13. – С. 41 – 48.

6. Термостабильность свойств нитридных покрытий на основе многокомпонентного высокоэнтропийного сплава системы Ti–V–Zr–Nb–Hf [Текст] / С. А. Фирстов, В. Ф. Горбань, Н. И. Даниленко, М. В. Карпец, А. А. Андреев, Е. С. Макаренко // *Порошковая металлургия*. – 2013. – № 9/10. – С. 93 – 102.

7. Growth (AlCrNbSiTiV)N thin films on the interrupted turning and properties using DCMS and HIP-IMS system [Text] / K. S. Chang, K. T. Chen, C. Y. Hsu, P. D. Hong // *Applied Surface Science*. – 2018. – Vol. 440. – P. 1 – 7.

8. Каблов, Е. Н. Жаростойкие и теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД [Текст] / Е. Н. Каблов, С. А. Мубояджян // *Авиационные материалы и технологии*. – 2012. – № 5. – С. 60 – 70.

9. Физико-технические основы создания плазменно-ионных источников и ускорителей для космических и технологических целей [Текст] : отчет о НИР (заключительный): Д402-28/2006-Ф / Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т»; рук. Колесник В. П.; исполн. Оранский А. И. [и др.]. – X., 2008. – 300 с. – ДР 0106U001056.

10. Numerical simulation of abnormal glow discharge processes in crossed electric and magnetic fields [Text] / A. V. Isakov, V. P. Kolesnik, A. M. Okhrimovskyy, N. P. Stepanushkin, A. A. Taran // *Problems of atomic science and technology*. – 2014. – № 6(94)(20). – Series : Plasma Physics (20). – P. 171 – 174.

11. Thornton, J. A. Cylindrical Magnetron Sputtering [Text] / J. A. Thornton, A. S. Penfold // *Thin film processes*; edited by J. L. Vossen, W. Kern. – Academic Press, 1978. – P. 76-110.

12. Литовченко, Л. В. Особливості побудови системи електроживлення інверсної магнетронної розпорошувальної системи для формування багатоконпонентних покриттів (спосіб управління процесом розпорошення та його практична реалізація)

[Текст] / Л. В. Литовченко, В. П. Колесник, О. М. Чугай, А. О. Бояркін, Д. В. Слюсар, М. П. Степанушкін, С. В. Олійник // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2019. – № 2. – С. 99 – 107.

13. ДСТУ ІЕС 60063:2015 Резистори та конденсатори. Ряди переважних чисел [Текст]. – На заміну ГОСТ 28884-90 (МЭК 63-63); чинний з 2016-01-01. – К. : Держспоживстандарт України, 2015. – 13 с.

14. Воронин, П. А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение [Текст] / П. А. Воронин. – Москва : Изд. дом «Додека-XXI», 2005. – 384 с.;

15. Новый тип комбинированных полупроводниковых ключей – высоковольтный интегральный тиристор с внешним полевым управлением [Текст] / И. Грехов, А. Рожков, Л. Костина, Н. Зитта, В. Матвеев // *Электронные компоненты*. – 2008. – № 9. – С. 58-62.

16. Волошин, С. Твердотельные реле для коммутации цепей постоянного тока [Текст] / С. Волошин // *Компоненты и технологии*. – 2005. – № 7. – С. 138 – 140.

17. Гуревич, В. Решение проблемы выходных реле микропроцессорных устройств релейной защиты [Текст] / В. Гуревич // *Компоненты и технологии*. – 2009. – № 4. – С. 89 – 92.

18. Малащенко, А. Реле – определение и классификация [Текст] / А. Малащенко // *Электронные компоненты*. – 2004. – № 9. – С. 1 – 7.

19. Ключникова, О. Высоковольтные реле фирмы Gigavac [Текст] / О. Ключникова, Ю. Гренков // *Современная электроника* – 2007. – № 1. – С. 18 – 20;

20. Лахно, А. Высоковольтные реле и контакторы фирмы Gigavac [Текст] / А. Лахно // *Компоненты и технологии*. – 2010. – № 10. – С. 94 – 95.

References

1. Khadem, Mahdi., Penkov, Oleksiy V., Yang, Hee-Kyung., Kim, Dae-Eun. Tribology of multilayer coatings for wear reduction: A review. *Friction*, 2017, no. 5(3), pp. 248–262.

2. Xu, H., Huang, H., Walker, J., Schoff, M., Elsner, F., Farrell, M. Gradient coating for NIF double shell targets. *Surface & Coatings Technology*, 2018, no. 349, pp. 838–845.

3. Movchan, B. A., Yakovchuk, K. Yu. High-Temperature Protective Coatings Produced by EB-PVD. *Journal of Coating Science and Technology*, 2014, no. 1, pp. 96 – 110.

4. Jakovchuk, K. Ju. Teploprovodnost' i termociklicheskaja dolgovechnost' kondensacionnyh termobar'ernyh pokrytij [Thermal conductivity and thermal

cyclic durability of condensation thermal barrier coatings]. *Sovrem. Jelektrometallurgija*, 2014, no. 4, pp. 25-31.

5. Sobol', O. V., Andreev, A. A., Gorban', V. F., Krapivka, N. A., Stolbovoj, V. A., Serdjuk, I. V., Fil'chikov, V. E. O vosproizvodimosti odnofaznogo strukturnogo sostojanija mnogojelementnoj vysokojentropijnoj sistemy Ti-V-Zr-Nb-Hf i vysokotverdyh nitridov na ee osnove pri ih formirovanii vakuumnodugovym metodom [On the reproducibility of the single-phase structural state of the multi-element high-entropy system Ti - V - Zr - Nb - Hf and highly solid nitrides based on it during their formation by the vacuum-arc method]. *Zhurnal tehnicheckoj fiziki*, 2012, vol. 38, no. 13, pp. 41 - 48.

6. Firstov, S. A., Gorban', V. F., Danilenko, N. I., Karpec, M. V., Andreev, A. A., Makarenko, E. S. Termostabil'nost' svojstv nitridnyh pokrytij na osnove mnogokomponentnogo splava Ti-V-Zr-Nb-Hf [Thermal stability of the properties of nitride coatings based on the multicomponent alloy Ti-V-Zr-Nb-Hf]. *Poroshkovaja metallurgija*, 2013, no. 9/10, pp. 93 - 102.

7. Chang, K. S., Chen, K. T., Hsu, C. Y., Hong, P. D. Growth (AlCrNbSiTiV)N thin films on the interrupted turning and properties using DCMS and HIPIMS system. *Applied Surface Science*, 2018, vol. 440, pp. 1-7.

8. Kablov, E. N., Mubojadzhan, S. A. Zharostojkie i teplozashhitnye pokrytija dlja lopatok turbin visokogo davlenija perspektivnyh GTD [Heat-resistant and heat-shielding coatings for low-viscose high-pressure turbines of promising GTE]. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. 5, pp. 60 - 70.

9. Fiziko-tehnicheckie osnovy sozdanija plazmenno-ionnyh istochnikov i uskoritelej dlja kosmicheskikh i tehnologicheskikh celej [Physical and technical basis for creating plasma-ion sources and accelerators for space and technological purposes]. Otchet o NIR (zakljuchitel'nyj): Д402-28/2006-Ф / Nac. ajerokosm. un-t «Har'k. aviac. in-t» ; ruk. Kolesnik V. P.; ispoln. Oranskij A. I. [i dr.]. Kharkiv, 2008. 300 p. ДР 0106U001056.

10. Isakov, A. V., Kolesnik, V. P., Okhrimovskyy, A. M., Stepanushkin, N. P., Taran, A. A. Numerical simulation of abnormal glow discharge processes in crossed electric and magnetic fields. *Problems of atomic science and technology*, 12/2014, no. 6 (94)(20), pp. 171 - 174.

11. Thornton, J. A. Penfold, A. S. Cylindrical Magnetron Sputtering. *Thin film processes*. Academic Press, 1978, pp. 76-110.

12. Lytovchenko, L. V., Kolesnyk, V. P., Chuhai, O. M., Boiarkin, A. O., Sliusar, D. V., Stepanushkin, M. P., Oliinyk, S. V. Osoblyvosti pobudovy systemy elektrozhylvennia inversnoi mahnetronnoi rozporoshualnoi systemy dlja formuvannia bahatokomponentnykh pokryttiv (sposib upravlinnia protsesom rozporoshennia ta yoho praktychna realizatsiia)[Features of construction of power supply system of inverse magnetron sputtering system for formation of multicomponent coatings (method of sputtering process control and its practical implementation)]. *Radioelektronni i komp'uterni sistemi - Radioelectronic and computer systems*, 2019, no. 2, pp. 99 - 107.

13. DSTU IEC 60063:2015 *Rezistori ta kondensatori. Rjadi preferencijnih chisel* [State Standard 60063:2015. Resistors and capacitors. Rows of preferential numbers]. Kyiv, Derzhspozhivstandart Ukraïni Publ., 2016. 13 p.

14. Voronyn, P. A. *Sylovie poluprovodnykovie kliuchy: semeistva, kharakterystyky, prymenenye* [Power semiconductor switches: families, specifications, applications]. Moscow, Yzd. dom «Dodeka-XXI», 2005. 384 p.

15. Hrehov, Y., Rozhkov, A., Kostyna, L., Zytta, N., Matveev, V. Novii typ kombynyrovannikh poluprovodnykovikh kliuchei - visokovoltanii yntehrlnii tyrstor s vneshnym polevim upravlenyem [A new type of combination semiconductor switch is an external field-controlled high-voltage integrated thyristor]. *Elektronnie komponenti*, 2008, no. 9, pp. 58 - 62.

16. Voloshin, S. Tverdotelnyie rele dlya kommutatsii tsepey postoyannogo toka [Solid-state relays for switching DC circuits]. *Komponentyi i tehnologii*, 2005, no. 7, pp. 138 - 140.

17. Gurevich, V. Reshenie problemy vyihodnyih rele mikroprotsessornyih ustroystv releynoy zaschityi [Solving the problem of output relays of microprocessor relay protection devices]. *Komponentyi i tehnologii*, 2009, no. 4, pp. 89 - 92.

18. Malaschenko, A. Rele - opredelenie i klassifikatsiya [Relay - Definition and Classification]. *Elektronnyie komponentyi*, 2004, no. 9, pp. 1 - 7.

19. Klyuchnikova, O. Vysokovoltnyie rele firmy Gigavac [Gigavac High Voltage Relays]. *Sovremennaya elektronika*, 2007, no. 1, pp. 18 - 20.

20. Lahno, A. Vysokovoltnyie rele i kontaktoryi firmy Gigavac [Gigavac High Voltage Relays and Contactors]. *Komponentyi i tehnologii*, 2010, no. 10, pp. 94 - 95.

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ИНВЕРСНОЙ МАГНЕТРОННОЙ РАСПЫЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ПОКРЫТИЙ (ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗРАБОТКИ РЕЗИСТИВНОЙ ЦЕПОЧКИ В СОСТАВЕ ГЕНЕРАТОРА ПЛАЗМЫ)

*Л. В. Литовченко, В. П. Колесник, О. Н. Чугай, А. А. Бояркин,
Д. В. Слюсар, Н. П. Степанушкин, С. В. Олейник*

Продолжено рассмотрение особенностей построения системы электропитания опытно-промышленной технологической установки для нанесения многокомпонентных покрытий ионно-плазменным методом. Главное внимание уделено практическим аспектам разработки управляемых резистивных цепочек, соединенных с различными элементами схемы электропитания технологического генератора плазмы. Отмечено, что управление режимом работы технологической установки обеспечивается изменением сопротивления этих цепочек соответствующей автоматизированной системой. Предложено математическое выражение в виде полинома для сопротивления цепочек, который соответствует требованиям к исследовательской установке и условию минимизации количества резисторов в отдельной цепочке. Рассмотрена структура цепочки как соединение необходимого количества ячеек. Каждая из этих ячеек отличается от других не только схемой соединения резисторов, но и их сопротивлением. Предложен алгоритм определения номинального сопротивления, мощности тепловых потерь, количества резисторов и схемы их соединения в цепочку. Например, приведена схема и основные технические характеристики цепочки, соединенной с группой катодов-мишеней из вольфрама. Такие катоды используются при формировании на поверхности металлических деталей наноструктурных и многофункциональных покрытий из карбида вольфрама. Особое внимание уделено управляющим элементам в составе отдельных ячеек технологического генератора плазмы. Проведен анализ требований к управляющим элементам типа полупроводниковых ключей и электромагнитных реле. Отмечено, что в полной мере этим требованиям удовлетворяют обычные (не высоковольтные) электромагнитные реле отечественного производства при условии последовательного соединения их электрических контактов друг с другом. Обращено внимание на необходимость предотвращения образования вследствие явления электромагнитной индукции электрической дуги при размыкании контактов реле, что может достигаться дополнительным включением в состав управляющего элемента последовательно соединенных резистора и конденсатора. Также важно использовать средства принудительного воздушного охлаждения блока резистивных цепочек.

Ключевые слова: системы электропитания; резистивная цепочка; резистор; резистивная ячейка.

FEATURES OF CONSTRUCTION OF POWER SUPPLY SYSTEMS OF INVERSE MAGNETRON SPRAYING SYSTEMS FOR FORMING MULTICOMPONENT COATINGS (PRACTICAL ASPECTS OF DEVELOPING A RESISTANT CHAIN AS A PART OF GENERATOR)

*L. V. Litovchenko, V. P. Kolesnik, O. M. Chugai, A. O. Boyarkin,
D. V. Slusar, M. P. Stepanushkin, S. V. Oliynik*

The consideration of the features of constructing the power supply system of a pilot industrial-technological installation for applying multicomponent coatings by the ion-plasma method is continued. The main attention is paid to the practical aspects of developing controlled resistive circuits connected to various elements of the power supply circuit of a technological plasma generator. It is noted that the control of the operation mode of the technological installation is provided by changing the resistance of these chains by the corresponding automated system. A mathematical expression is proposed in the form of a polynomial for the resistance of chains, which meets the requirements for a research installation and the condition for minimizing the number of resistors in a separate chain. The structure of the chain is considered as a combination of the required number of cells. Each of them differs from the others not only in the connection scheme of the resistors but also in their resistance. An algorithm is proposed for determining the nominal resistance, heat loss power, the number of resistors and the circuitry for their connection. For example, a diagram and the main technical characteristics of a chain connected to a group of target cathodes from tungsten are given. Such cathodes are used in the formation of nanostructured and multifunctional coatings of tungsten carbide on the surface of metal parts. Particular attention is paid to the control elements in the individual cells of the technological plasma generator. The analysis of requirements for control elements such as semiconductor switches and electromagnetic relays is carried out. It is noted that these requirements are met by conventional (not high-voltage) electromagnetic relays of domestic production, provided that their contacts are connected in se-

ries with each other. Attention is drawn to the need to prevent the formation of an electric arc when the relay contacts open, can be achieved by including a resistor and a capacitor in series with the control element. It is also important to use means of forced air cooling of the resistive chain block.

Keywords: power supply systems; resistive circuit; resistor; resistive cell.

Литовченко Леонід Васильович – канд. техн. наук, доцент, ст. наук. співр. каф. 402, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Колесник Володимир Петрович – канд. техн. наук, доцент, начальник НДЧ, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Чугай Олег Миколайович – д-р техн. наук, проф., проф. каф. 505, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Бояркін Андрій Олександрович – ст. викл. каф. 305, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Слюсар Денис Віталійович – канд. техн. наук, ст. наук. співр. каф. 402, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Степанушкін Микола Петрович – ст. наук. співр. каф. 402, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Олійник Сергій Володимирович – канд. техн. наук, доц. каф. 505, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Litovchenko Leonid Vasilevich – PhD, Associate Professor, Senior Research Officer at the Department of 402, National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: papalv@i.ua, ORCID Author ID: 0000-0001-7358-1465.

Kolesnik Volodimir Petrovich – PhD, Associate Professor, Head of the Scientific and Research Department, National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: v.kolesnik@khai.edu, ORCID Author ID: 0000-0002-3602-1562.

Chugai Oleg Mikolaevich – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Professor at the Department of 505, National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: chugai@xai.edu.ua, ORCID Author ID: 0000-0002-2857-6592, Scopus Author ID: 6602397105.

Boyarkin Andriy Oleksandrovich – Senior Lecturer at the Department of 305, National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: k305@khai.edu, ORCID Author ID: 0000-0003-3210-1482.

Slusar Denis Vitalyevich – PhD, Senior Research Officer at the Department of 402, National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: dv_slusar@yahoo.co.uk, ORCID Author ID: 0000-0002-8314-6587.

Stepanushkin Mikola Petrovich – Senior Research Officer at the Department of 402, National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: k402@khai.edu, ORCID Author ID: 0000-0002-7016-8445.

Oliynik Sergiy Volodimirovich – PhD, Associate Professor of Department of 505, National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: oleynick1981@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0001-6073-8531, Scopus Author ID: 8404643500.