УДК 519.6/621.373.423
DOI https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.5/08

Ольшевський С.В.
Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Танасійчук Я.В.
Київський національний університет імені Тараса Шевченка

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДЕФЕКТУ В РЕЗОНАТОРНІЙ СИСТЕМІ МАГНЕТРОНА НА ПАРАМЕТРИ ЙОГО НВЧ-ПОЛЯ

У статті розкрита проблема відсутності стандартних, неруйнівних методів діагностики потужних електровакуумних приладів (ЕВП) НВЧ, направлених на регенерацію. Ця проблема є маловивченою і потребує подальшого дослідження.

У статті розглядаються характерні ознаки дефектів конструкції потужних магнетронів, що відмовили у процесі експлуатації та направлені на регенерацію, у вигляді напилень і проплавлень у резонаторній системі. Проведено детальний аналіз фізико-хімічних процесів, які протікають в об'єкті діагностування, результатом чого є перелічені дефекти.

На основі проведеного аналізу було прийнято рішення про пошук методів і засобів дослідження НВЧ-поля в області взаємодії резонаторної системи магнетрона. Наведено типову методику для проведення таких досліджень та опис установки з рухомим зондом для дослідження як засобу проведення елементарних перевірок об'єкта діагностування.

Висунуто гіпотезу про вплив дефекту у вигляді напилення на ламелях резонаторної системи магнетрону на фазу сигналу, прийнятого зондом, що розміщений в області взаємодії.

Із метою перевірки висунутої гіпотези авторами було здійснено дослідження впливу дефектів конструкції на параметри електромагнітного НВЧ-поля в області взаємодії магнетрону з використанням імітаційного моделювання.

Як середовище моделювання і дослідження НВЧ-структур авторами обрано програмне забезпечення Ansoft HFSS. В основі роботи цього програмного продукту лежить використання методу кінцевих елементів, короткий розгляд якого наведено у статті.

Об'єктом дослідження виступає імітаційна модель восьмирезонаторного блока магнетрона із зондом, що обертається в середовищі взаємодії. Результати моделювання підтверджують висунуту авторами гіпотезу.

Робота має міждисциплінарний характер і написана на перетині технічної діагностики та НВЧ-техніки.

Ключові слова: *регенерація НВЧ-приладів, магнетрон, прихований дефект, дефект конструкції, неруйнівні методи діагностики, метод кінцевих елементів, імітаційне моделювання.*

Постановка проблеми. Аналіз робіт [1, с. 1; 3, с. 1] показує великий інтерес до розробок, пов'язаних зі створенням технологій регенерації потужних електровакуумних НВЧ-приладів. Обґрунтування актуальності та можливості регенерації потужних НВЧ приладів зроблено в [5, с. 48–90]. Згідно з наведеною в [1, с. 2] методикою регенерації потужних магнетронів одним із етапів регенерації є виділення вузлів приладів, орієнтованих на відбір екземплярів приладів, стан яких може бути доведено до рівня вимог, відповідних технічним умовам.

Для прийняття рішення про придатність до регенерації решти елементів конструкції необхідно провести дефектацію ЕВП на відповідність ТУ. Діагностика ЕВП з метою виявлення вказаних дефектів вимагає їхньої доставки від замовника та розкриття на підприємстві, що є джерелом логістичних і непродуктивних технологічних витрат. Таким чином, актуальними є задачі оптимізації процесу дефектації, створення і використання максимально дешевих, простих, швидких, неруйнівних методів діагностики, котрі не вимагали б ручного розкриття об'єкта діагностування. Нині такі методи діагностики на профільних підприємствах України не застосовуються.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботах [1, с. 2; 5, с. 92–117; 6, с. 37–67] пропонуються підходи до регенерації таких приладів, котрі передбачають розбирання приладу на окремі вузли (деталі), відбраковування і повторне використання придатних вузлів. Автором [9, с. 135; 10, с. 17] передбачено необхідність методів

аналізу на предмет визначення їхньої придатності до повторного використання. Для цього пропонується використовувати «холодні вимірювання» електродинамічних параметрів резонаторних блоків [9, с. 136] або метод скануючої зондової мікроскопії для контролю поверхонь [10, с. 18]. Водночас автори [5, с. 48–92; 6, с. 67–94] мало зупиняються на методах аналізу приладів, що відмовили та були отримані на регенерацію.

Огляд літератури показав практичну відсутність робіт, направлених на розробку методів діагностики таких приладів на предмет їхньої подальшої регенерації та повну залежність рішення про придатність приладу до регенерації від досвіду особи або колективу, котрі виконують регенерацію [5, с. 11–46; 6, с. 37–67].

Зовнішні ознаки відмови кожного виду є різними, а можливі дефекти в конструкції приладу є прихованими [4, с. 56–62]. Попри те, що можливі причини відмови відомі, вони є спільними з іншими видами відмов, такими як:

- обрив ланцюга підігрівача.
- отруєння або виснаження катоду;
- зміна параметрів модулюючого імпульсу;
- зростання струмів витоку.

Такий стан справ частково можна пояснити відсутністю переліку експлуатаційних дефектів конструкції ЕВП НВЧ і їхньої класифікації по критичності до регенерації.

Постановка завдання. Як показують статистичні дані, отримані на профільному українському підприємстві, поширеними дефектами конструкції є: напилення на поверхнях внутрішньовакуумної порожнини; окалина на внутрішніх поверхнях резонаторної системи та ін. Попередній аналіз відомостей дефектації НВЧ-приладів показав, що одним із поширених дефектів конструкції (близько 30%) у внутрішньовакуумній порожнині є напилення на поверхні анодного блоку приладу у просторі взаємодії. Великий відсоток приладів із таким дефектом конструкції робить доцільною розробку методики його виявлення неруйнівними методами для спрощення процесу дефектації. Для дослідження дії описаних дефектів на параметри резонаторної системи магнетрона пропонується побудувати імітаційну модель системи тестового діагностування, котра дозволить отримати множину реакцій на тестові впливи (збудження електромагнітних коливань у резонаторній системі) від об'єкта діагностування (тривимірної моделі резонаторної системи магнетрона) внаслідок виконання елементарних перевірок [8, с. 27–30].

Оцінка причинно-наслідкового зв'язку між запиленням сегментів резонаторної системи та структурою високочастотного електромагнітного поля всередині резонаторної системи магнетрона.

Виклад основного матеріалу дослідження. Як відомо з теорії технічної діагностики [8, с. 30–36], для побудови математичних моделей об'єктів діагностування та створення систем діагностування важливим є розуміння фізичних процесів, що протікають в об'єкті діагностування, та вивчення можливих фізичних несправностей. Тому розглянемо детальніше причини виникнення напилень і проплавлень на ламелях резонаторного блока магнетрона.

Виникнення напилення та проплавлення ламелей пов'язане з явищами десорбції частинок електричним полем, перебудови поверхні твердих тіл за впливу температури та сильних електричних полів.

Як показали дослідження [11, с. 245–252], атоми та молекули, які знаходяться на поверхні твердих тіл, можуть десорбуватися під впливом сильних електричних полів. Якщо адсорбовані частинки на поверхні електрода іонізовані позитивно або негативно, то під дією сильного електричного поля, вектор якого має напрямок, протилежний до вектора поля поверхневого диполя, сорбційні сили зв'язку таких частинок можуть послаблюватися настільки, що частинки починають мігрувати по поверхні та навіть випаровуватися. Теорія десорбції під дією електричного поля, заснована на уявленнях квантової механіки, подана у [12, с. 21–92].

Суть розглянутих процесів полягає в тому, що під впливом температури та сильних електричних полів відбувається перебудова поверхневих атомних шарів на електродах, внаслідок чого на них з'являються нерівності та навіть окремі вістря (відомі в літературі як «вискери»).

Відповідні умови для росту вискерів виникають під час відпалу деталей, пайки й, особливо, відкачування, тренування й експлуатації ЕВП, оскільки між їхніми електродами наявні електричні поля, що прискорюють процес росту. Як показано у [13, с. 21–92], найбільш потужним джерелом летких речовин є катод ЕВП. Відрив вискерів із поверхні катоду полегшується при імпульсній роботі приладу.

У момент відриву від електрода частинка прискорюється полем на електрод протилежної полярності. Оскільки такі частинки мають заряд електрода, від якого вони відірвалися, то в електричних полях вони можуть прискорюватися до великих швидкостей і бомбардувати протилежний електрод.

Існування цих явищ запускає процеси перенесення матеріалу з одного електроду на інший. Найбільш сприятливі умови для утворення віскерів створюються за тривалого відкачування приладів і їхньої експлуатації, оскільки майже всі типи термоелектронних катодів володіють високою летючістю активних речовин. Наприклад [11, с. 276–277], швидкість випаровування лужноземельних металів з оксидного й імпрегнованого катодів за температури 750 і 1 150°С (відповідно) складає приблизно 10^{-10} г/см^2*с. Це означає, що оксидні та імпреговані катоди за одну годину роботи вивільняють близько 1 015 молекул (тобто більше одного моношару речовини у розрахунку на ідеально гладеньку поверхню катода). Вже при відкачуванні та тренуванні приладів із такими катодами на електродах утворюється наліт у вигляді «лусочок» висотою 1–10 мкм.

Оскільки матеріал напилення відрізняється від матеріалу анода, має місце локальна зміна провідності в області дефекту. Розглядаючи [4, с. 271–274] резонаторну систему магнетрона як еквівалентну схему із зосередженими параметрами, внесення напилення на сегмент анода означатиме зміну зосередженої ємності між цим сегментом і катодом, що впливатиме на фазу сигналу, який проходить в області взаємодії.

Дизайн дослідження і методи. Вивчення розподілу високочастотного поля необхідне для визначення видів коливань і для дослідження впливу асиметрії в магнетроні на розподіл поля у просторі взаємодії. Для визначення розподілу поля в резонаторній системі магнетрона найзручніше використовувати зонд, що обертається [2, с. 312]. Останній є ємнісним зондом невеликих розмірів, закріпленим на циліндрі, котрий розміщений у просторі взаємодії магнетрона. Зонд розташовується перпендикулярно до силових ліній електричного поля біля катоду. При обертанні циліндра струм у зонді змінюється таким чином, що дає можливість отримувати картину інтенсивності електричного поля в різних точках простору взаємодії залежно від кута повороту зонду. Картина поля спостерігається на екрані осцилографа, у якого напруга горизонтальної розгортки синхронізована зі швидкістю обертання зонда, а на вертикальні пластини прикладено напругу, пропорційну детектованому струму зонда. Зонд описаного типу схематично зображений на рис. 1.

Для перевірки висунутої гіпотези пропонується побудувати імітаційну модель системи тестового діагностування.

Опис МКЕ та середовища моделювання. Точний аналітичний опис залежності між параметрами

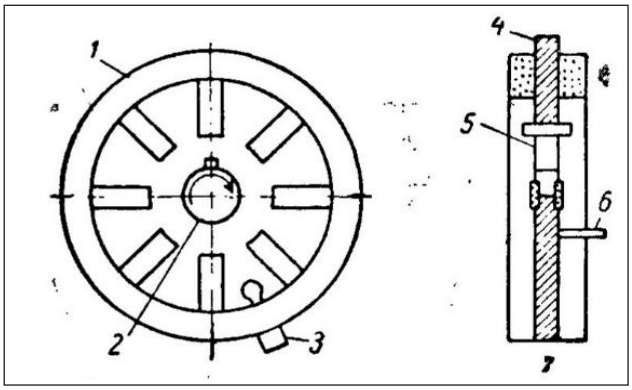


Рис. 1. Схематичний вид зонду, що обертається, в області взаємодії магнетрону:
1 – магнетрон, 2 – зонд, 3 – вхідний сигнал, 4 – ковзний сигнал, 5 – детектор, 6 – зонд, 7 – деталі зонду в зібраному стані

внесеного дефекту і параметрами резонаторної системи магнетрона як із використанням еквівалентних схем, так і методами теорії поля [14, с. 75–86] викликає суттєві труднощі. Тому для виявлення й оцінки вказаних залежностей пропонується використати один із числових методів, а саме метод кінцевих елементів [7] (FEM (Finite Element Method)) – чисельний метод розв'язку диференційних рівнянь у частинних похідних і інтегральних рівняннях.

Етапи методу кінцевих елементів:

Формулюється основне рівняння, котре буде розв'язуватися МКЕ. Для розв'язку крайових задач електродинаміки використовуються рівняння другого порядку відносно вектора напруженості електричного або магнітного поля. У частотній області таке рівняння для комплексної амплітуди вектора напруженості електричного поля має вигляд:

$$\nabla \times \left(\mu_r^{-1} \nabla \times \dot{\mathbf{E}}\right) + i\sigma\eta_0 k\dot{\mathbf{E}} - \varepsilon_r k^2 \mathbf{E} = -ik\eta_0 \boldsymbol{J}^{imp}$$

$\boldsymbol{J}^{imp}$ – густина стороннього електричного струму.

Розрахункова область задачі ділиться на підобласті (кінцеві елементи, КЕ), котрі її покривають без перетинів і розривів.

Невідома функція (або функції) апроксимуються набором функцій спеціального виду (базисних функцій) у кожному КЕ. Параметри цих апроксимацій утворюють набір невідомих задачі. Далі за допомогою системи пробних функцій проводиться дискретизація задачі методом Рітца або методом Бубнова – Гальоркіна. Відбувається перехід від функціональних рівнянь із нескінченно великим числом ступенів свободи до системи лінійних алгебраїчних рівнянь із кінцевим числом невідомих (ступенів свободи).

Як векторні базисні функції використовуються повні векторні поліноми порядку k:

$$\mathrm{w(r)}= P_x^k e_x + P_y^k e_y + P_z^k e_z \ .$$

Повний поліном, наприклад, першого степеня (k=1) містить чотири члени, відповідно, на їхній основі можна сконструювати систему з чотирьох лінійно незалежних базисних функцій. Наприклад, для полінома P_x^1 маємо:

$$P_{x1}^1 = a_{x0} + a_{x1}x + a_{x2}y + a_{x3}z$$

$$P_{x2}^1 = b_{x0} + b_{x1}x + b_{x2}y + b_{x3}z$$

$$P_{x3}^1 = c_{x0} + c_{x1}x + c_{x2}y + c_{x3}z$$

$$P_{x4}^1 = d_{x0} + d_{x1}x + d_{x2}y + d_{x3}z$$

Для лінійної незалежності цих функцій необхідно, щоб визначник

$$\mathrm{Det}\begin{vmatrix} a_{x0} & a_{x1} & a_{x2} & a_{x3} \\ b_{x0} & b_{x1} & b_{x2} & b_{x3} \\ c_{x0} & c_{x1} & c_{x2} & c_{x3} \\ d_{x0} & d_{x1} & d_{x2} & d_{x3} \end{vmatrix} \neq 0$$

Отримана СЛАР розв'язується одним із чисельних методів. Шляхом розв'язку отримується сукупність невідомих параметрів апроксимації, тобто наближений розв'язок задачі. Використовуючи це рішення, можна отримати параметри системи, що нас цікавлять, такі як параметри розсіяння, питома потужність поглинання, поле в дальній зоні і т. п.

Припускаємо, що КЕ має форму тетраедра. Енергія електромагнітного поля, запасена в КЕ, дорівнює сумі енергії електричного поля W_t^e та енергії магнітного поля W_t^m.

$$W_t^e = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r^{'}}{4} \sum_{m=1}^{N_q}\sum_{n=1}^{N_q} x_m x_n^* \int_V w_m w_n dV$$

$$W_t^m = \frac{\varepsilon_0 \mu_r^{'}}{4k_0^2 \left|\mu_r\right|} \sum_{m=1}^{N_q}\sum_{n=1}^{N_q} x_m x_n^* \int_V (\times w_m)(\times w_n)\, dV$$

N_q – кількість базисних функцій КЕ.

w_m – m-та базисна функція тетраедра

w_n – n-та базисна функція тетраедра

Енергію і потужність, котрі запасені та розсіюються в деякому об'єкті V, розраховують підсумовуванням по всіх тетраедрах, які належать цьому об'єкту.

Опис імітаційної моделі. Для реалізації описаної вище системи тестового діагностування і з метою дослідження впливу описаних вище дефектів на параметри резонаторної системи магнетрона в середовищі Ansoft HFSS було побудовано тривимірну модель реального резонаторного блоку магнетрона із введеним зондом, що дозволяє імітувати роботу зі стендом для дослідження простору взаємодії магнетрона.

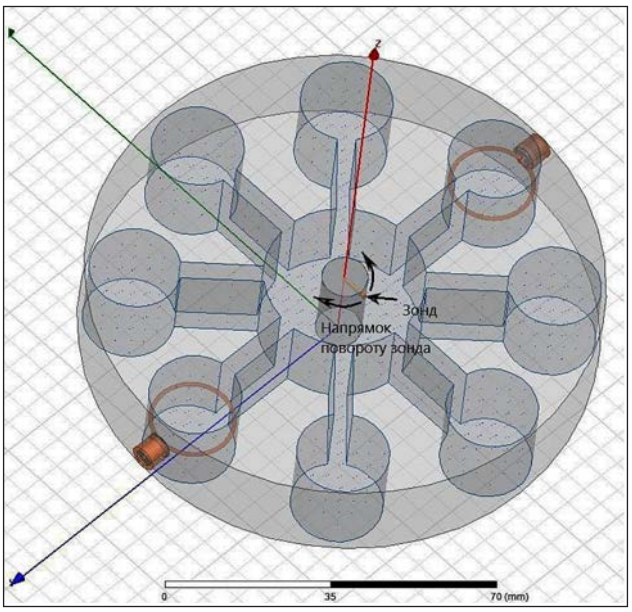
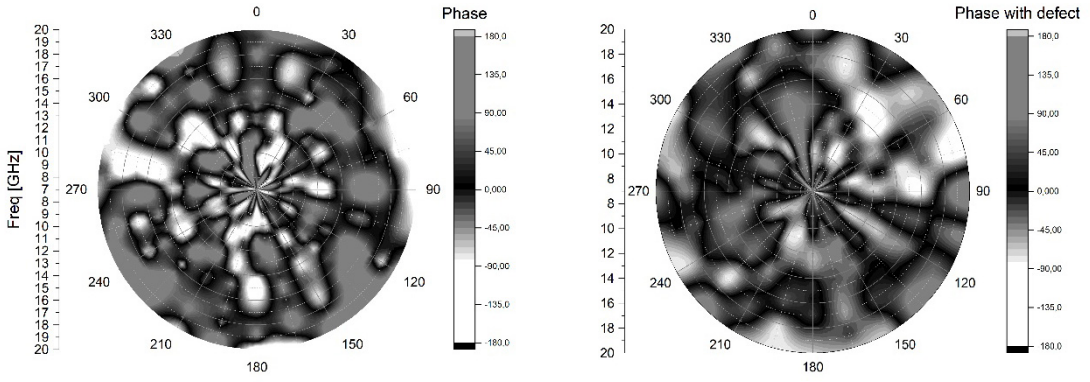


Рис. 2. Імітаційна модель системи тестового діагностування резонаторного блоку магнетрона

Інтроскопія різниці фаз вхідного сигналу і сигналу, знятого із зонду, за допомогою моделі описаної вище установки наведена на рис. 3 і 4. Вона включає три діаграми, опубліковані у [3, с. 1–2].



а) б)

Рис. 3. Результати першого (а) і другого (б) етапів експерименту

Першим етапом експерименту було отримання значення набігу фаз між входом і деякою точкою у просторі взаємодії. Результати моделювання представлені на рис. 1а, на круговій діаграмі куту по азимуту відповідає кут повороту зонда, градаціям радіусу відповідає зміна частоти зондуючого сигналу в межах 7…20 ГГц, градаціям кольору – набіг фази сигналу між входом і зондом.

Другим етапом було внесення дефекту у вигляді напилення товщиною 0,01 мм на поверхню сегменту (ламелі) зі сторони простору взаємодії та повторення вимірювань першого етапу із внесеним дефектом.

На третьому етапі експерименту було розраховано різницю між набігом фаз для нормальної та дефектної систем. Результати розрахунків наведено на рис. 4. Максимальному набігу фази сигналу (близько 180°) відповідають сірі плями, мінімальному значенню відставання сигналу за фазою – білі плями (близько -180°).

Висновки. Авторами сформульовано проблему відсутності неруйнівних методів діагностики ЕВП НВЧ, направлених на регенерацію. Виділено критичні дефекти конструкції – проплавлення і напилення. Детально розглянуто фізичні процеси, що протікають в об'єкті діагностування, результатом яких є виділені дефекти. Аналіз фізичних процесів, які протікають в області взаємодії магнетрона, дозволяє розглядати його як неперервний об'єкт діагностування при діагностуванні його на предмет наявності чи відсутності дефектів конструкції у вигляді напилень.

Шляхом якісного аналізу фізико-хімічних процесів, що протікають у просторі взаємодії магнетрона, було висунуто гіпотезу про зміну просторового розподілу електромагнітного поля в резонаторній системі магнетрону після внесення в конструкцію приладу дефекту у вигляді напилення продуктів деградаційних процесів на поверхні катода на сегмент резонаторної системи.

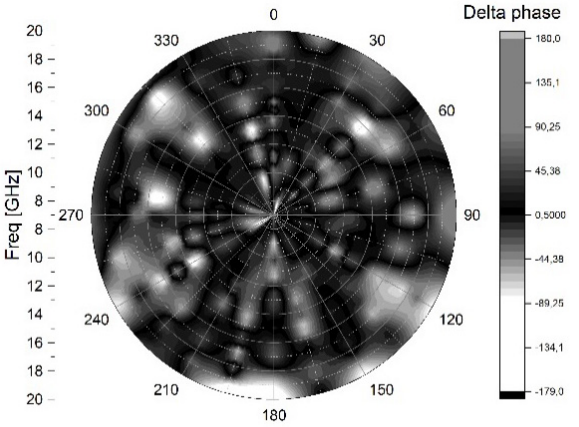


Рис. 4. Різниці набігу фаз між нормальною і дефектною резонаторними системами

Для перевірки гіпотези побудовано імітаційну модель системи тестового діагностування резонаторної системи магнетрону.

Внаслідок експерименту виділено смуги частот із найбільш вираженим ефектом отримана кількісна оцінка у вигляді різниці набігу фази сигналу. Для дефекту у вигляді напилення емісійної речовини катоду на сегмент поверхні розміром 20 мм*8мм і товщиною 0,01 мм найбільша різниця у набігу фаз (близька до ±180°) зареєстрована в діапазонах частот 11…12, 13…14, 15…17, 18…19 ГГц, що підтверджує висунуту гіпотезу.

Розрахунок теоретичних залежностей зміни вказаних характеристичних параметрів резонаторної системи від характеристичних параметрів дефекту зумовлює можливість виявлення та встановлення характеру і локалізації напилення в анодному блоці магнетрону на основі експериментальних вимірювань його поточних характеристик і порівняння їх із характеристиками дефектних і справних приладів. Для цього можуть бути використані вже існуючі, відпрацьовані підходи, наприклад, Байєсівські мережі [15, с. 222–233].

Список літератури:

1. Екезлі А.І., Чурюмов Г.І., Дзюба В.П., Іванченко В.О. Відновлення і регенерація потужних НВЧ вакуумних приладів та їх застосування в сучасних системах озброєння. Ч. 1. *Загальні питання регенерації потужних магнетронів МІ-29 та МІ-285. Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки. VI Міжнародна науково-практична конференція.* Тези доповідей.

2. Зусмановский С.А. Магнетроны сантиметрового диапазона. Москва : Советское радио, 1951. 472 с.

3. Ольшевський С.В., Танасійчук Я.В. Дослідження впливу напилення на поверхні резонаторної системи потужного магнетрона на розподіл електромагнітного поля резонаторної системи.

4. Панин И.С., Панченко Л.В. Импульсные магнетроны. Элементы радиоэлектронной аппаратуры. Москва : Советское радио, 1966.

5. Семенов А.В. Регенерация мощных электровакуумных приборов : дисс. … канд. техн. наук. Саратов, 2000.

6. Бакуменко А.В. Научно-технические и производственно-экономические основы реставрации мощных СВЧ приборов : дисс. … докт. техн. наук. Москва, 2006.

7. Стренг Г., Фикс Дж. Теория метода конечных элементов. Издательство «Мир», 1997. 351 с.

8. Карибский В.В., Пархоменко И.П., Согомонян Е.С., Халчев В.Ф. Основы технической диагностики. Кн. 1. Модели объектов, методы и алгоритмы диагноза.

9. Семенов А.С. Технология регенерации анодных блоков ЭВП. *Сборник научных трудов 4 научного семинара IEEE Saratov-Penza Chapter «Машинное проектирование в прикладной электродинамике и электронике».* Саратов : Изд. СГТУ, 2000. С. 134–136.

10. Байбурин В.Б., Семенов А.С. Проблемы и опыт регенерации мощных электронных приборов. *Сборник научных трудов 4 научного семинара IEEE Saratov-Penza Chapter «Машинное проектирование в прикладной электродинамике и электронике».* Саратов : Изд. СГТУ, 2000. С. 15–19.

11. Черепнин Н.В. Сорбционные явления в вакуумной технике. Москва : Издательство «Советское радио», 1973.

12. Gomer R., Swanson I.W. Theory of field desorption. *J. Chem. Phys.* 1963. V. 38. № 7. P. 1613.

13. Пошехонов П.В. и др. Нитевидные монокристаллы в высоковольтных лампах с оксидным катодом. *Радиотехника и электроника.* 1967. Т. 12. № 12. С. 21–92.

14. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ : учебник. Т. II / под ред. Н.Д. Девяткова. Москва : Высш. школа, 1970. 376 с.

15. Using a Bayesian Network to Assess the Atmospheric Pollution Influence on Immunological Parameters / V. Lytvynenko, M. Voronenko, S. Sitalo, O. Boskin, I. Lurie, N. Savina, Y. Tanasiichuk, N. Krugla. *IDDM*. 2019. P. 222–233.

Olshevskyi S.V., Tanasiichuk Ya.V. INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE DEFECT IN THE MAGNETRON RESONATORY SYSTEM ON THE PARAMETERS OF IT'S MICROWAVE FIELD

This article reveals the problem of the lack of standard, non-destructive methods for diagnosing powerful microwave electrovacuum devices (EWDs) aimed at regeneration. This problem is poorly understood and needs further study.

The article investigates the characteristic features of structural defects of powerful magnetrons that failed during operation and are aimed at regeneration, in the form of sprays and melts in the resonator system. A detailed analysis of physicochemical processes occurring in the object of diagnosis, the result of which are the listed defects. Based on the analysis, it was decided to search for methods and tools for studying the microwave field in the field of interaction of the resonator system of the magnetron. A typical method for conducting such studies and a description of the installation with a movable probe for the study, as a means of conducting basic tests of the object of diagnosis.

The hypothesis of the influence of the defect in the form of sputtering on the lamellae of the resonator system of the magnetron on the phase of the signal received by the probe placed in the interaction region is put forward.

As a research task and in order to test the hypothesis, the authors studied the effect of structural defects on the parameters of the electromagnetic microwave field in the field of magnetron interaction using simulation.

Anso-ft HFSS software was chosen by the authors as an environment for modeling and studying microwave structures. The basis of this software product is the use of the finite element method, a brief overview of which is given in the article.

The object of study is a simulation model of an eight-cavity magnetron unit with a probe rotating in the interaction medium. The simulation results confirm the hypothesis put forward by the authors.

The work is interdisciplinary in nature and is written at the intersection of technical diagnostics and microwave technology.

Key words: *regeneration of microwave devices, magnetron, latent defect, structural defect, non-destructive diagnostic methods, finite element method, simulation.*