

Математическое моделирование основных этапов технологического процесса механической обработки керамических и ферритовых деталей СВЧ- и КВЧ-устройств

В.А. Козлов, Ю.А. Светлаков, Д.Р. Шишкин, М.М. Ивойлова

ФГУП «ФНПЦ НИИ измерительных систем им. Ю.Е. Седакова»
603137, Российская Федерация, г. Нижний Новгород
ул. Тропинина, 47

Представлены математические модели основных этапов изготовления керамических и ферритовых деталей СВЧ- и КВЧ-устройств методами механической обработки плоских и цилиндрических заготовок. Рассмотрены модели грубого и тонкого шлифования внешних поверхностей керамических и ферритовых деталей абразивным и алмазным кругами, а также формирования отверстий сверлением алмазным сверлом и ультразвуковыми методами.

Ключевые слова: математические модели, механическая обработка, керамические и ферритовые материалы.

Введение

В современной радиоэлектронике широко используются СВЧ и КВЧ функциональные узлы на основе керамических и ферритовых материалов [1; 2]. Это коаксиальные и диэлектрические резонаторы, полосно-пропускающие фильтры, ферритовые циркуляторы, вентили, переключатели и т. п. [3; 4].

Основным способом серийного изготовления заготовок из керамических материалов является прессование в пресс-формах с последующим обжигом.

Для производства ограниченного количества деталей, необходимого при проведении НИОКР, как правило, целесообразно использовать технологии, основанные на методах механической обработки серийно выпускаемых керамических заготовок [5]. Микроволновая керамика и ферриты по механическим свойствам представляют собой твердые и хрупкие материалы [6], механическая обработка которых (резка, шлифование, полирование, формирование отверстий) возможна, в основном, с использованием абразивных инструментов.

Целью совместных усилий разработчиков, конструкторов и технологов предприятий, разрабатывающих и выпускающих керамические и ферритовые СВЧ и КВЧ функциональные узлы, является повышение качества создаваемых устройств, улучшение их технических харак-

теристик: сокращение затрат на их разработку и изготовление. Достижение поставленной цели возможно по двум направлениям: во-первых, за счет совершенствования методов проектирования; во-вторых, за счет создания и внедрения более совершенных технологий изготовления перечисленных устройств. В настоящее время возможности совершенствования методов проектирования в существенной степени исчерпаны. В области разработки более совершенных технологических процессов неиспользованных возможностей еще достаточно много. Причем они связаны не только с разработкой принципиально новых технологических процессов, но и с оптимизацией основных операций существующих технологических процессов на основе методов математического моделирования. При этом становится возможным оптимальный выбор технологического процесса, необходимого для данного вида механической обработки деталей с заданной степенью точности, без его предварительной реализации. В этом случае в качестве исходных требований по точности и качеству обработки используются результаты построения математических моделей функциональных СВЧ- и КВЧ-узлов.

В настоящей работе предложены математические модели основных операций технологического процесса механической обработки керамических и ферритовых заготовок, практическое использование которых позволяет оценивать

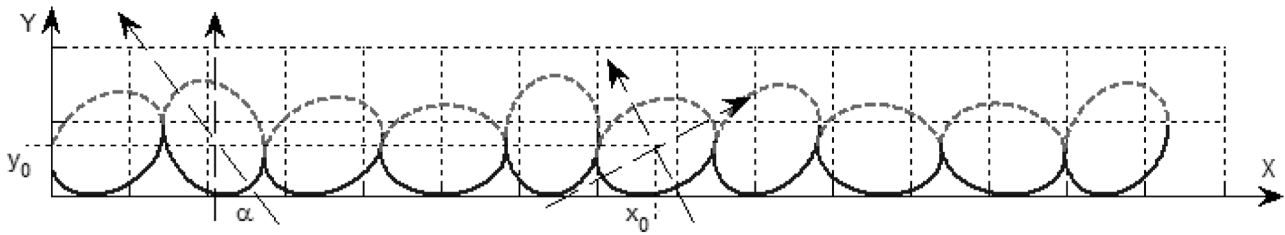


Рис. 1. Размещение зерен на поверхности абразивного круга

ожидаемую шероховатость поверхностей керамических и ферритовых деталей еще до этапа изготовления экспериментальных образцов.

Рассмотрено математическое моделирование основных этапов технологического процесса механической обработки керамических и ферритовых заготовок для формирования внешней поверхности (грубое шлифование абразивными кругами), а также моделирование формирования отверстий при сверлении заготовок алмазными сверлами. На основе результатов моделирования данных технологических операций оценивается пригодность полученного образца (детали СВЧ- или КВЧ-устройства) для следующей технологической операции, например, металлизации поверхностей, или необходима его дальнейшая механическая доработка (например, тонкое шлифование) с целью снижения шероховатости поверхностей, непосредственно влияющей на основные параметры устройства (например, добротность керамического резонатора [7]).

1. Математическое моделирование шлифования внешней поверхности керамических и ферритовых заготовок

Математическая модель техпроцесса обработки внешней поверхности заготовки шлифовальным кругом разрабатывалась с использованием схемы образования стружки по И.М. Брозголю [8]. В модель закладывались параметры зерен абразивного материала шлифовального круга, форма которых аппроксимирована эллипсом, а также осевой люфт. Распределение зерен по углу наклона α полуосей аппроксимирующего зерно эллипса на поверхности абразивного круга – случайное, равновероятное.

Процесс возникновения неровностей вследствие геометрических причин принято трактовать как копирование на обрабатываемой поверхности траектории движения и формы режущих кромок зерен. С геометрической точки зрения величина, форма и взаимное расположение не-

ровностей (направление обработочных канавок) определяются формой и состоянием режущих кромок зерен и теми элементами режима резания, которые влияют на изменение траектории движения режущих кромок зерен относительно обрабатываемой поверхности [9].

Причинами осевого люфта является ряд факторов, имеющих разную природу: деформация и микроскалывание материала, наличие люфтов в механизмах обрабатывающего оборудования и др. [10].

Модель абразивного круга построена на основе функциональной зависимости положения режущих кромок зерен на его поверхности. Размещение зерен на поверхности абразивного круга схематично показано на рис. 1.

Общее уравнение эллипса, аппроксимирующего абразивное зерно, имеет вид

$$\frac{(X \cos \alpha + Y \sin \alpha)^2}{a^2} + \frac{(Y \cos \alpha - X \sin \alpha)^2}{b^2} = 1, \quad (1)$$

где α – угол поворота; a и b – полуоси эллипса.

После решения уравнения (1) относительно переменных X и Y получим

$$Y_{1,2}^0 = \frac{-BX \pm \sqrt{B^2 X^2 - 4A(CX^2 - D)}}{2A}, \quad (2)$$

$$X_{1,2}^0 = \frac{-BY \pm \sqrt{B^2 Y^2 - 4C(AY^2 - D)}}{2C},$$

с учетом сдвигов по осям OX и OY

$$Y_{1,2} = [-B(X - x_0) \pm \sqrt{B^2(X - x_0)^2 - 4A(C(X - x_0)^2 - D)}] / 2A + y_0, \quad (3)$$

$$X_{1,2} = [-B(Y - y_0) \pm \sqrt{B^2(Y - y_0)^2 - 4C(A(Y - y_0)^2 - D)}] / 2C + x_0, \quad (4)$$

где

$$A = a^2 \cos^2 \alpha + b^2 \sin^2 \alpha;$$

$$B = 2(b^2 - a^2) \sin \alpha \cos \alpha;$$

$$C = b^2 \cos^2 \alpha + a^2 \sin^2 \alpha;$$

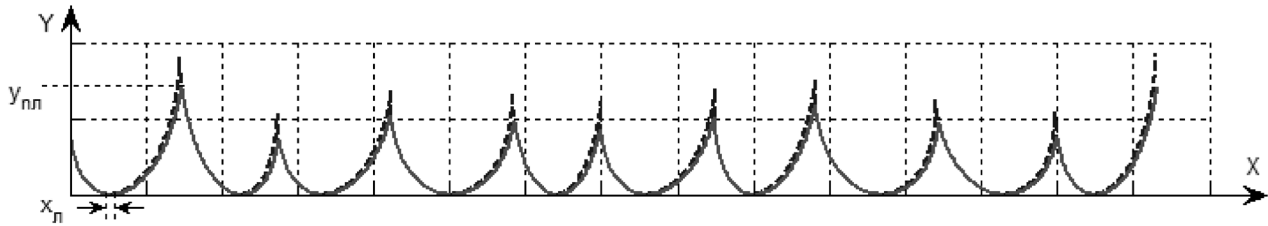


Рис. 2. Вид профиля поверхности после шлифования

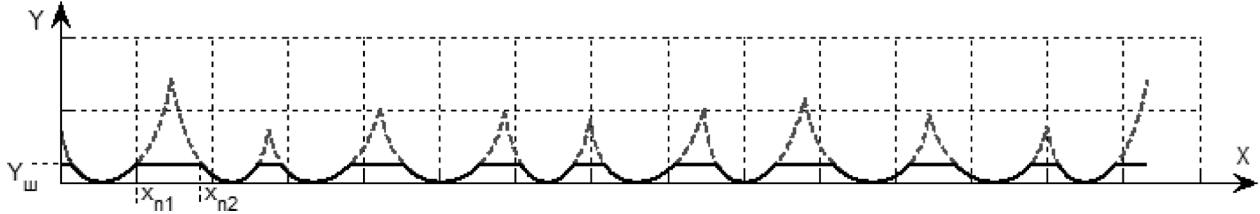


Рис. 3. Вид профиля поверхности после тонкого шлифования

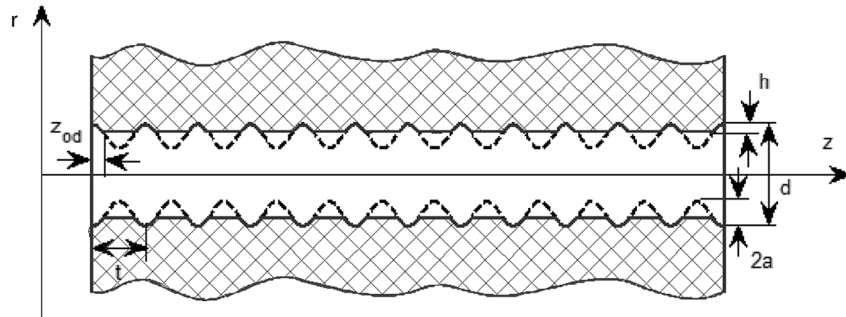


Рис. 4. Вид профиля поверхности отверстия после сверления алмазным сверлом (штриховая линия) и тонкого шлифования (сплошная линия)

$$D = a^2 b^2;$$

x_0 – сдвиг по оси OX; y_0 – сдвиг по оси OY.

Наличие осевого люфта x_n приводит к расширению канавок на поверхности обрабатываемой заготовки, образованных острыми кромками зерен круга. Таким образом, в результате первичной обработки заготовки периферией абразивного круга, с учетом осевого люфта, уравнение профиля шероховатой поверхности примет вид (для удобства X рассматривается как функция Y)

$$X = \begin{cases} \frac{F_X - \sqrt{G_X}}{2C(\alpha_n)} + x_{0n} & \text{при} \\ \left[\begin{array}{l} (n = 1) \quad 0 \leq Y < y_{01} + y_{\min X21} \\ (n > 1) \quad 0 \leq Y < y_{(n-1)n}, \quad n = 1, 2 \dots N; \end{array} \right. \\ \frac{F_X + \sqrt{G_X}}{2C(\alpha_n)} + x_{0n} + x_n & \text{при} \\ 0 \leq Y < y_{n\lambda}, \quad n = 1, 2 \dots N; \\ x_{\min Y2n} + x_{0n} \leq X < \\ < x_{\min Y2n} + x_{0n} + x_n, \\ n = 1, 2 \dots N \quad \text{при} \quad Y = 0, \end{cases} \quad (5)$$

где $F_X = -B(\alpha_n)(Y - y_{0n})$; N – количество зерен на поверхности круга;

$$G_X = B^2(\alpha_n)(Y - y_{0n})^2 - 4C(\alpha_n)[A(\alpha_n)(Y - y_{0n})^2 - D(\alpha_n)];$$

α_n – случайное число в интервале $0 \leq \alpha_n \leq \pi$, с равномерным распределением вероятности; $y_{0n} = Y_2^0(x_{\min Y2n})$ – сдвиг по оси OY n -го эллипса, $x_{\min Y2n}$ определяется из условия

$$\frac{d}{dX}(Y_2^0) = 0 \text{ и}$$

$$x_{\min Y2n} = (-1)^m \sqrt{\frac{B^2(\alpha_n)D(\alpha_n)}{[4A(\alpha_n)C(\alpha_n) - B^2(\alpha_n)]C(\alpha_n)}},$$

где

$$m = \begin{cases} 1 & \text{при} \quad \pi/2 \leq \alpha_n \leq \pi, \\ 2 & \text{при} \quad 0 \leq \alpha_n < \pi/2; \end{cases}$$

$x_{01} = X_2^0(y_{\min X21})$ – сдвиг по оси OX 1-го эллипса, $y_{\min X21}$ определяется из условия

$$\frac{d}{dY}(X_2^0) = 0 \text{ и}$$

$$y_{\min X2n} = (-1)^m \sqrt{\frac{B^2(\alpha_n)D(\alpha_n)}{[4A(\alpha_n)C(\alpha_n) - B^2(\alpha_n)]A(\alpha_n)}},$$

где

$$m = \begin{cases} 1 & \text{при} \quad \pi/2 \leq \alpha_n \leq \pi, \\ 2 & \text{при} \quad 0 \leq \alpha_n < \pi/2; \end{cases}$$

x_{0n} (для $n > 1$) – сдвиг по оси ОХ n -го эллипса, определяется из условия, что уравнение $X_1(\alpha_{n-1}) = X_2(\alpha_n)$ имеет один действительный корень y_{n-1} , $x_{n-1} = X_1(y_{n-1})$, (x_{n-1}, y_{n-1}) – координаты точки касания двух соседних $(n - 1)$ -го и n -го эллипсов; $y_{n,l}$ – меньший корень уравнения $X_1(\alpha_n) + x_l = X_2(\alpha_{n+1})$.

Вид профиля поверхности после шлифования схематично показан на рис. 2.

При необходимости уменьшения глубины канавок после грубого шлифования в технологический маршрут включается тонкое шлифование, осуществляемое алмазными кругами. В результате удается снизить шероховатость поверхности после грубого шлифования примерно в 4 раза [8]. Вид профиля поверхности после тонкого шлифования показан на рис. 3.

Уравнение поверхности после тонкого шлифования имеет вид

$$X = \begin{cases} \frac{F_X - \sqrt{G_X}}{2C(\alpha_n)} + x_{0n} & \text{при} \\ 0 \leq Y < Y_{u}, & n = 1, 2 \dots N; \\ \frac{F_X + \sqrt{G_X}}{2C(\alpha_n)} + x_{0n} + x_l & \text{при} \\ 0 \leq Y < Y_{u}, & n = 1, 2 \dots N; \\ X < x_{12}, & x_{n1} \leq X < x_{(n+1)2}, \quad n = 1, 2 \dots N \\ \text{при } Y = Y_{u}; & \\ x_{\min Y 2n} + x_{0n} \leq X < x_{\min Y 2n} + x_{0n} + x_l, & \\ n = 1, 2 \dots N & \text{при } Y = 0 \end{cases} \quad (6)$$

или

$$Y = \begin{cases} \frac{F_Y - \sqrt{G_Y}}{2A(\alpha_n)} + y_{0n} & \text{при} \\ x_{n2} \leq X < x_{\min Y 2n} + x_{0n}, & n = 1, 2 \dots N; \\ \frac{F_{Y,l} - \sqrt{G_{Y,l}}}{2A(\alpha_n)} + y_{0n} & \text{при} \\ x_{\min Y 2n} + x_{0n} + x_l \leq X < x_{n1}, & n = 1, 2 \dots N; \\ Y_{u} & \text{при } (n = 1) \quad X < x_{12} \text{ и} \\ (n > 1) \quad x_{(n-1)1} \leq X < x_{n2}, & n = 1, 2 \dots N; \\ 0 & \text{при } x_{\min Y 2n} + x_{0n} \leq X < \\ < x_{\min Y 2n} + x_{0n} + x_l, & n = 1, 2 \dots N \end{cases} \quad (7)$$

где

$$F_Y = -B(\alpha_n)(X - x_{0n});$$

$$G_Y = B^2(\alpha_n)(X - x_{0n})^2 - 4A(\alpha_n) \times [C(\alpha_n)(X - x_{0n})^2 - D(\alpha_n)];$$

$$F_{Y,l} = -B(\alpha_n)(X - x_{0n} - x_l);$$

$$G_{Y,l} = B^2(\alpha_n)(X - x_{0n} - x_l)^2 - 4A(\alpha_n) \times [C(\alpha_n)(X - x_{0n} - x_l)^2 - D(\alpha_n)];$$

Y_{u} – глубина канавок после тонкого шлифования;

$$x_{n1} = \frac{F_{X_{u}} + \sqrt{G_{X_{u}}}}{2C(\alpha_n)} + x_{0n} + x_l;$$

$$x_{n2} = \frac{F_{X_{u}} - \sqrt{G_{X_{u}}}}{2C(\alpha_n)} + x_{0n};$$

$$F_{X_{u}} = -B(\alpha_n)(Y_{u} - y_{0n});$$

$$G_{X_{u}} = B^2(\alpha_n)(Y_{u} - y_{0n})^2 - 4C(\alpha_n) \times [A(\alpha_n)(Y_{u} - y_{0n})^2 - D(\alpha_n)].$$

В предложенной математической модели не учитывается шероховатость плоских участков поверхности между канавками, образуемая при тонком шлифовании алмазным диском.

2. Математическое моделирование формирования отверстий в керамических и ферритовых заготовках

Математическая модель профиля шероховатости поверхности отверстия, полученного в заготовке трубчатым алмазным сверлом, разрабатывалась с использованием схемы образования стружки по Л.А. Глейзеру [8], согласно которой абразивными зернами на поверхности изделия наносится большое число рисок. Распределение алмазных зерен по торцу и длине сверла принималось равномерным в соответствии с рис. 1. С учетом работы алмазных зерен, находящихся как на торцевой, так и на боковой поверхности сверла, профиль шероховатости поверхности полученного отверстия может быть аппроксимирован функцией [7]

$$r_d = f(z) = -a \sin\left(\frac{z2\pi}{t} - \frac{\pi}{2}\right) - a + \frac{d}{2}, \quad (8)$$

где r_d – уравнение поверхности отверстия; $2a$ – нормированная глубина рисок до шлифования; t – период следования рисок; d – нормированный диаметр отверстия; z – продольная координата.

Вид профиля поверхности отверстия после сверления алмазным сверлом схематически показан на рис. 4 штриховой линией.

При необходимости снижения глубины рисок в технологический маршрут включается этап тонкого шлифования поверхности отверстия заго-

товки, осуществляемый ультразвуковым способом. Вид профиля поверхности отверстия после тонкого шлифования схематически показан на рис. 4 сплошной линией.

Математическая модель поверхности отверстия, с учетом (8), после тонкого шлифования может быть представлена в виде функции распределения рисков по его длине

$$r_d = f(z) = \begin{cases} -a \sin\left(\frac{z2\pi}{t} - \frac{\pi}{2}\right) - a + \frac{d}{2} & \text{при} \\ \begin{cases} z < z_{0d} + nt, \\ z > t - z_{0d} + (n-1)t, \end{cases} \\ -h + \frac{d}{2} & \text{при} \begin{cases} z > z_{0d} + nt, \\ z < t - z_{0d} + nt, \end{cases} \end{cases} \quad (9)$$

где $n = 0, 1, \dots, E(L/t)$,

где r_d – уравнение поверхности отверстия; $2a$ – нормированная глубина рисков до шлифования; t – период следования рисков; d – нормированный диаметр отверстия; h – нормированная глубина рисков после шлифования; L – длина отверстия; z – продольная координата;

$$z_{0d} = \frac{t}{2\pi} \left[\arcsin\left(\frac{h-a}{a}\right) + \frac{\pi}{2} \right]$$

– половина ширины риски после шлифования.

В предложенной математической модели не учитывается профиль шероховатости поверхности отверстия, образуемой при ультразвуковой обработке.

Заключение

На примере построения математических моделей основных этапов технологического процесса механической обработки керамических и ферритовых деталей показана возможность оптимизации процессов проектирования и изготовления керамических и ферритовых СВЧ и КВЧ функциональных узлов (с позиций получения наилучших технических характеристик при минимальных затратах на проектирование и технологическую подготовку производства). Аналогичные методы моделирования можно разрабатывать и применять для большинства основных формообразующих операций технологических процессов обработки элементов СВЧ- и КВЧ-устройств. Это позволит в существенной степени использовать скрытые резервы для улучшения характеристик создаваемых СВЧ и КВЧ функциональных узлов.

При построении аналогичных математических моделей для большинства основных операций

механической обработки деталей СВЧ- и КВЧ-устройств, а также развитию представленных методов моделирования для других видов обработки, они могут быть введены в САПР СВЧ- и КВЧ-устройств. Это расширит возможности САПР и повысит качество проектирования этих устройств.

Список литературы

1. ВЧ и СВЧ керамические материалы и микроволновые элементы. Каталог продукции. СПб.: ООО «Керамика», 2004.
2. Каталог продукции ОАО «НИИ «Феррит-Домен», 2011.
3. Технология изготовления и практическое применение керамических резонаторов в устройствах СВЧ-диапазона / В.А. Козлов [и др.] // Антенны. 2010. Вып. 7. С. 63–66.
4. Козлов В.А., Светлаков Ю.А. Расчет и технология изготовления ферритовых элементов волноводных развязывающих и переключающих КВЧ-устройств // Вопросы радиоэлектроники. Сер. РЛТ. 2008. Вып. 3. С. 181–188.
5. Антенны и функциональные узлы СВЧ- и КВЧ-диапазонов. Методы расчета и технология изготовления / под ред. А.Ю. Седакова. М.: Радиотехника, 2011. 112 с.
6. Колесов С.Н., Колесов И.С. Материаловедение и технология конструкционных материалов. М.: Высшая школа, 2004. 519 с.
7. Шишкин Д.Р. Математическая модель коаксиального керамического резонатора // Материалы XIX Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии» ИСТ–2013. Нижний Новгород, 2013. С. 76.
8. Механическая обработка деталей из керамики и ситаллов / В.А. Хрульков [и др.]. Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1975. 352 с.
9. Физико-технические основы методов обработки / под ред. А.П. Бабичева. Ростов на Дону: Феникс, 2006. 409 с.
10. Керамика для машиностроения / А.П. Гаршин [и др.]. М.: ООО «Научтехлитиздат», 2003. 384 с.

Mathematical simulation for the main stages of mechanical treatment technological process for VHF and EHF devices ceramic and ferrite component parts

V.A. Kozlov, Yu.A. Svetlakov, D.R. Shishkin, M.M. Ivoylova

There are presented mathematical models of the main stages for producing ceramic and ferrite component parts of VHF and EHF devices by treating mechanically plane and cylindrical blanks. The models of rough and fine polishing ceramic and ferrite component parts external surfaces by abrasive and diamond wheels as well as drilling holes by diamond drill and ultrasonic methods.

Keywords: mathematical models, mechanical treatment, ceramic and ferrite materials.

Антипов, О.И.

Детерминированный хаос и фракталы в дискретно-нелинейных системах / О.И. Антипов, В.А. Неганов, А.А. Потапов. – М.: Радиотехника, 2009. – 235 с., ил.

ISBN 978-5-88070-237-4

УДК 530.1:621.372+621.396

ББК 32.96

Антипов О.И., Неганов В.А., Потапов А.А.

Детерминированный хаос и фракталы
в дискретно-нелинейных системах



В монографии рассмотрены явления детерминированного хаоса и фрактальности в дискретно-нелинейных системах на примере устройств импульсной силовой электроники, приведены некоторые основные определения современной нелинейной динамики и некоторые математические методы целочисленных и дробных мер.

Представленные явления стохастической работы могут наблюдаться в широком классе систем с переменной структурой, действие которых может быть описано системами дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами, скачкообразно меняющими свои значения с течением времени в зависимости от состояния системы. Объектами исследования явились импульсные стабилизаторы напряжения различных типов и структур. Научной новизной является применение как фрактальных, так и мультифрактальных мер детерминированного хаоса к анализу стохастической работы импульсных стабилизаторов.

Для специалистов, интересующихся проблемами детерминированного хаоса, численным моделированием дискретно-нелинейных систем.