

УДК 621.382; 621.3.013

К РАСЧЕТУ МАГНИТНЫХ ПОТОКОВ В ПЛОСКИХ КОНТУРАХ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

Б. К. Петров, О. М. Булгаков

*Воронежский государственный университет
Воронежский институт МВД России*

Получены точные и приближенные аналитические выражения для расчета магнитных потоков самоиндукции и взаимной индукции в треугольных участках плоских контуров. Это позволяет существенно расширить возможности методик расчета эквивалентных индуктивностей мощных ВЧ (СВЧ) транзисторов, а также уточнить модели физических процессов, обусловленные взаимной индукцией рабочих токов в системах соединений мощных ВЧ (СВЧ) транзисторов.

ВВЕДЕНИЕ

Высокая точность расчета эквивалентных индуктивностей мощных ВЧ (СВЧ) транзисторов может быть обеспечена в рамках модели, основанной на вычислении магнитных потоков самоиндукции и взаимной индукции в замкнутых контурах, образованных за счет протекания рабочих токов транзистора по системе соединительных проводников [1, 2]. Однако, используемые в рамках данной модели выражения для расчета магнитных потоков, наводимых в плоских прямоугольных контурах токами, протекающими в прямолинейных проводниках, не позволяют в ряде случаев адекватно отразить реальную геометрию и взаиморасположение контуров и проводников. В этом плане точность двумерных и трехмерных моделей существенно возрастает, если контур представлен совокупностью плоских многоугольников. Поскольку магнитный поток находится как интеграл по площади контура, а любой многоугольник может быть разбит на конечное количество прямоугольников и треугольников, представляет интерес получение аналитических выражений для расчета магнитных потоков в треугольных контурах различной конфигурации.

ПОЛУЧЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКИХ ВЫРАЖЕНИЙ

Рассмотрим контур в форме прямоугольного треугольника с вершинами, имеющими координаты $(0; r_0)$, $(l; r_0)$ и $(l; h+r_0)$ (рис. 1,

треугольник I), в котором наводится магнитный поток самоиндукции током, протекающим по проводнику круглого сечения радиусом r_0 , длиной l , ограничивающему контур по катету. Магнитный поток в таком контуре будет вычисляться как интеграл по площади контура от магнитной индукции, создаваемой в некоторой точке током I , протекающим в данном проводнике [3]:

$$\Phi_1 [S_{\Delta}(l; h); l] \equiv \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{r_0}^{h+r_0} \int_{(y-r_0)_h}^l \left(\frac{x}{y\sqrt{x^2+y^2}} + \frac{l-x}{y\sqrt{(l-x)^2+y^2}} \right) dy dx. \quad (1)$$

Здесь μ_0 — магнитная постоянная. Аналитическое решение [4]:

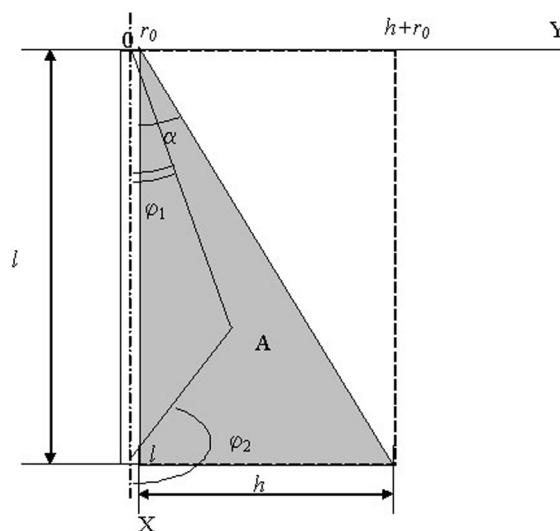


Рис. 1. К расчету магнитного потока в треугольном контуре

$$\Phi_1 [S_{\Delta}(l; h); l] = \frac{\mu_0 I l}{4\pi} \left\{ \frac{2r_0}{l} - 2\sqrt{1 + \frac{r_0^2}{l^2}} - \ln \frac{(\sqrt{l^2 + (h+r_0)^2} + l)r_0}{(\sqrt{l^2 + r_0^2} + l)(h+r_0)} + \right. \\ \left. + \frac{r_0}{h} \left[\frac{l}{\sqrt{l^2 + h^2}} \ln \frac{\sqrt{l^2 + h^2} \sqrt{l^2 + (h+r_0)^2} + l^2 + h(h+r_0)}{r_0(\sqrt{l^2 + h^2} + h)} + \ln \frac{\sqrt{l^2 + (h+r_0)^2} - l}{h+r_0} \right] + \left(1 + \frac{r_0}{h}\right) \times \right. \\ \left. \times \left[\frac{l}{\sqrt{l^2 + h^2}} \ln \frac{\sqrt{l^2 + h^2} \sqrt{l^2 + r_0^2} + r_0 h - l^2}{(h+r_0)(\sqrt{l^2 + h^2} + h)} + \ln \frac{\sqrt{l^2 + r_0^2} + l}{r_0} \right] \right\}. \quad (2)$$

Аналогично для контура II (рис. 1):

$$\Phi_2 [S_{\Delta}(l; h); l] \equiv \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{r_0}^{h+r_0} \int_0^{\frac{y-r_0}{h}l} \left(\frac{x}{y\sqrt{x^2 + y^2}} + \frac{l-x}{y\sqrt{(l-x)^2 + y^2}} \right) dy dx = \\ = \frac{\mu_0 I l}{4\pi} \left\{ 2\sqrt{1 + \left(\frac{h+r_0}{l}\right)^2} - 2\frac{h+r_0}{l} - \ln \frac{(l + \sqrt{l^2 + (h+r_0)^2})r_0}{(l + \sqrt{l^2 + r_0^2})(h+r_0)} - \right. \\ \left. - \left(1 + \frac{r_0}{h}\right) \left[\frac{l}{\sqrt{l^2 + h^2}} \ln \frac{\sqrt{l^2 + h^2} \sqrt{l^2 + r_0^2} + r_0 h - l^2}{(h+r_0)(\sqrt{l^2 + h^2} + h)} + \ln \frac{\sqrt{l^2 + r_0^2} + l}{r_0} \right] - \right. \\ \left. - \frac{r_0}{h} \left[\frac{l}{\sqrt{l^2 + h^2}} \ln \frac{\sqrt{l^2 + h^2} \sqrt{l^2 + (h+r_0)^2} + l^2 + h(h+r_0)}{r_0(\sqrt{l^2 + h^2} + h)} + \ln \frac{\sqrt{l^2 + (h+r_0)^2} - l}{h+r_0} \right] \right\}. \quad (3)$$

Сумма (2) и (3):

$$\Phi_1 [S_{\Delta}(l; h); l] + \Phi_2 [S_{\Delta}(l; h); l] = \\ = \frac{\mu_0 I l}{2\pi} \left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{h+r_0}{l}\right)^2} - \sqrt{1 + \frac{r_0^2}{l^2}} - \right. \\ \left. - \frac{h}{l} \ln \frac{(l + \sqrt{l^2 + (h+r_0)^2})r_0}{(l + \sqrt{l^2 + r_0^2})(h+r_0)} \right\} = \Phi_1 [S_{\square}(l; h); l],$$

представляет собой магнитный поток, наведенный данным током в примыкающем к проводнику прямоугольном контуре, образованному суммой контуров I и II.

На рис. 2 а, б показаны зависимости

$\vartheta(h) = \frac{\Phi_1 [S_{\Delta}(l; h); l]}{\Phi_1 [S_{\square}(l; h); l]}$ и $\zeta(h) = \frac{\Phi_2 [S_{\Delta}(l; h); l]}{\Phi_1 [S_{\square}(l; h); l]}$ для

$r_0 = 0,02$ мм и нескольких значений длины проводника l в диапазоне от 1 до 3 мм, ха-

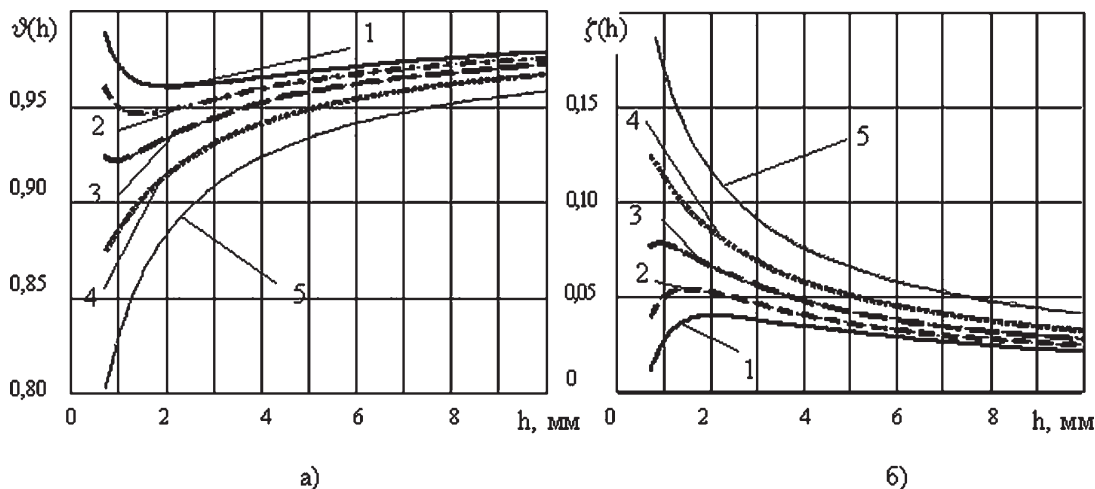


Рис. 2. Зависимости нормированных магнитных потоков в треугольных контурах от ширины контуров: 1 — $l=3$ мм; 2 — $l=2,5$ мм; 3 — $l=2$ мм; 4 $l=1,5$ мм; 5 — $l=1$ мм

раактерном для реальных конструкций мощных ВЧ и СВЧ транзисторов.

Относительная величина магнитного потока, наводимого в треугольнике I, соответствующая функции $\vartheta(h)$, составляет 0,8...0,95 от $\Phi_1[S_{\square}(l;h);l]$. Это хорошо согласуется с полученными ранее результатами, характеризующими резкое убывание величины магнитного потока при удалении прямоугольного контура от проводника на расстояние $h_1 \leq 0,5l$ [2]. Рост значений $\vartheta(h)$ по мере увеличения длины проводника обусловлен увеличением доли площади треугольника I, охватываемой примыкающей к проводнику областью в пределах $0,5l$.

ПОЛУЧЕНИЕ ВЫРАЖЕНИЙ ДЛЯ ПРИБЛИЖЕННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Распространим подход, положенный в основу получения аналитических выражений (2) и (3) на более общие случаи взаиморасположения прямоугольного проводника и треугольного контура (рис. 3). Так, для контура I на рис. 3а:

$$\Phi_3[S_{\Delta}(l_2;h);l] = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \left(\frac{x}{y\sqrt{x^2+y^2}} + \frac{l-x}{y\sqrt{(l-x)^2+y^2}} \right) dy dx. \quad (1a)$$

Здесь: $y_1 = r_0 + h_1$; $y_2 = r_0 + h_1 + h$;
 $x_1 = l_1 + (y - r_0 - h_1)l_2/h$; $x_2 = l - l_1 - l_2$.

Интеграл (1a) имеет аналитическое решение, в частном случае, при $h_1 = 0$, совпада-

ющее с выражением (2). Однако из-за громоздкой записи аналитического решения интеграла (1a) удобнее пользоваться приближенным решением вида:

$$\Phi_3[S_{\Delta}(l_2;h);l] \approx k_{\Delta 1}(h;h_1+r_0)\Phi_1[S_{\square}(l_2;h);l] = I\Theta(l;l_1;l_2;h;h_1;r_0)k_{\Delta 1}(h;h_1+r_0), \quad (4)$$

где $\Theta(l;l_1;l_2;h;h_1;r_0)$ — линейный алгебраический оператор, определяющий величину магнитного потока в прямоугольном контуре, расположенном в створе проводника, параллельного одной из сторон контура [1],

$$k_{\Delta 1}(h;h_1+r_0) = \Phi_1[S_{\Delta}(l=1\text{ мм};h);l=1\text{ мм}]/I$$

— коэффициент формы контура, численно равный значению магнитного потока, наводимого единичным током и вычисляемому по формуле (2) при условии: $l=1$ мм, и прочих параметрах, выражаемых в миллиметрах.

Для вычисления величины потока в контуре II (рис. 3) $\Phi_4[S_{\Delta}(l_2;h);l]$ изменим в интеграле (1a), пределы интегрирования по переменной x :

$$x_1 = l_1; \quad x_2 = l_1 + (y - r_0 - h_1)l_2/h.$$

Аналитическое решение такого интеграла существует и в частном случае, при $h_1 = 0$, совпадает с выражением (3). Однако из-за его громоздкой записи удобнее использовать приближенное решение:

$$\Phi_4[S_{\Delta}(l_2;h);l] \approx k_{\Delta 2}(h;h_1+r_0)\Theta(l;l_1;l_2;h;h_1;r_0), \quad (5)$$

где

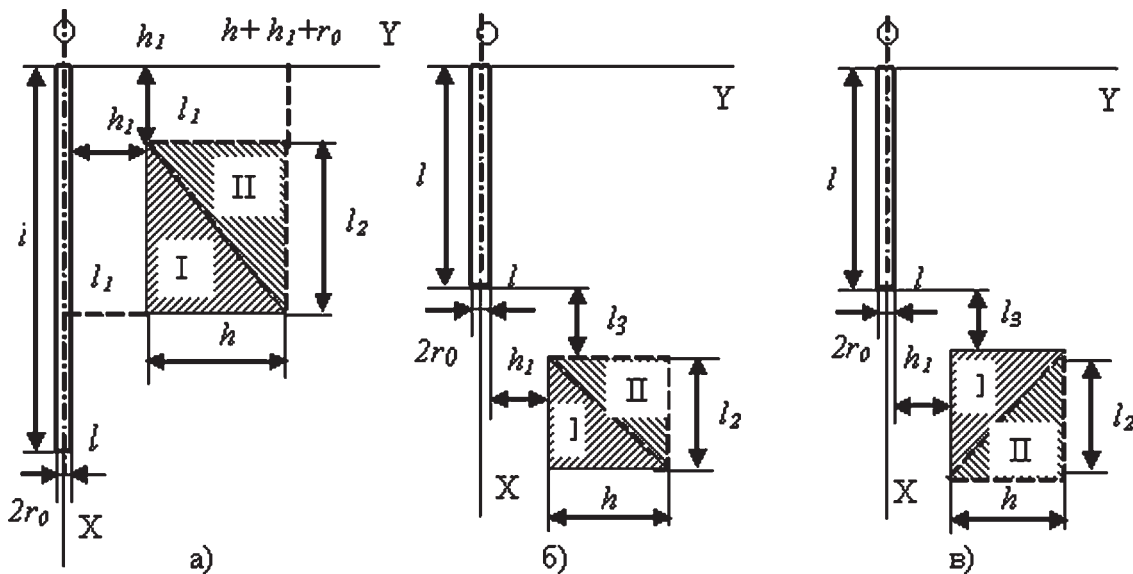


Рис. 3. Различные варианты расположения треугольных контуров относительно прямолинейного проводника

$k_{\Delta 2}(h; h_1 + r_0) = \Phi_2[S_{\Delta}(l = 1 \text{ мм}; h); l = 1 \text{ мм}] / I$
 — коэффициент формы контура, вычисляемый по формуле (3) для единичного тока при условиях: $l = 1 \text{ мм}$, и прочих параметрах, выражаемых в миллиметрах. Из полученных ранее соотношений следует:

$$k_{\Delta 1}(h; h_1 + r_0) + k_{\Delta 2}(h; h_1 + r_0) = 1,$$

для любого набора фиксированных значений h , h_1 и r_0 .

На рис. 4 приведены графики зависимостей $k_{\Delta 1}(h_1 + r_0)$ и $k_{\Delta 2}(h_1 + r_0)$ для некоторых значений ширины контуров h , характерных для систем проволочных соединений мощных ВЧ и СВЧ транзисторов. При увеличении расстояния от проводника до контура $k_{\Delta 1}$ монотонно убывает, а $k_{\Delta 2}$ монотонно возрастает, причем обе этих величины стремятся к значению 0,5, что оправданно, так как при $h_1/h > 20$, величина магнитного потока определяется уже не формой контура, а только его площадью, которая в данном случае равна половине площади соответствующего прямоугольника.

Как показывают расчеты, наибольшая разница между аналитическим и приближенным решением имеет место в ближней зоне проводника. Эта разница монотонно убывает по мере увеличения ширины контура, и для минимальных реализуемых на практике значений ширины контура $h = 0,1 \text{ мм}$ не превышает по абсолютной величине 6% точного решения. При $h_1 \geq l$, разница между

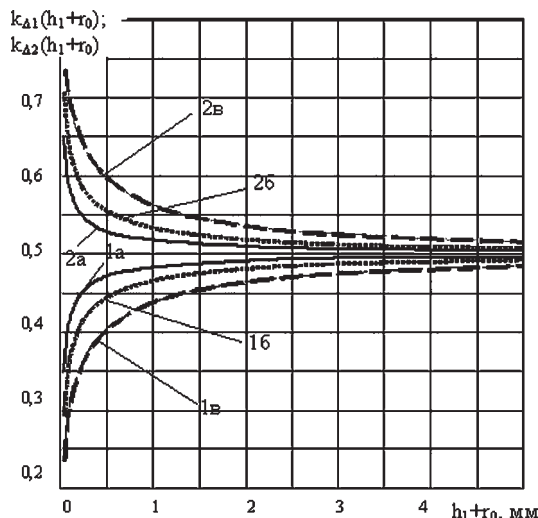


Рис. 4. Зависимость коэффициентов формы $k_{\Delta 1}$ (кривые 1) и $k_{\Delta 2}$ (кривые 2) от расстояния между проводником и контуром: а — $h = 0,12 \text{ мм}$; б — $h = 0,25 \text{ мм}$; в — $h = 0,5 \text{ мм}$

приближенным и аналитическим решениями находится в пределах 1,5 %.

Распространим рассмотренные выше подходы на взаиморасположение проводника и треугольных контуров, показанные на рис. 3 б, в. Для контура I (рис. 3 б) соответствующий интеграл для расчета магнитного потока запишется:

$$\Phi_5[S_{\Delta}(l_2; h); l] = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{x_3}^{x_4} \int_{y_1}^{y_2} \left(\frac{x}{y\sqrt{x^2 + y^2}} - \frac{x-l}{y\sqrt{(x-l)^2 + y^2}} \right) dy dx, \quad (6)$$

где $y_1 = r_0 + h_1$; $y_2 = r_0 + h_1 + h$;
 $x_3 = l + l_3 + (y - r_0 - h_1)l_2/h$; $x_4 = l + l_3 + l_2$.

Будем искать приближенное аналитическое решение в виде:

$$\begin{aligned} \Phi_5[S_{\Delta}(l_2; h); l] &\approx \Phi_2[S(l_2; h^*); l] = \\ &= I\Delta(l; l_3; l_2; h^*; h_1; r_0) = I\Delta(l; l_3; l_2; k_{\Delta 5} h; h_1; r_0), \end{aligned} \quad (7)$$

где $\Phi_2[S_{\square}(l_2; h^*); l]$ — магнитный поток от рассматриваемого тока в прямоугольном контуре той же длины l_2 , что и контур I, шириной $h^* = k_{\Delta 5} h$; $k_{\Delta 5}$ — коэффициент, определяемый из условия:

$$\frac{|I\Delta(l; l_3; l_2; k_{\Delta 5} \cdot h; h_1; r_0) - \Phi_5^*[S_{\Delta}(l_2; h); l]|}{\Phi_5^*[S_{\Delta}(l_2; h); l]} \leq \varepsilon, \quad (8)$$

$\Delta(l; l_3; l_2; h^*; h_1; r_0)$ — алгебраический оператор, определяющий величину потока магнитной индукции в прямоугольном контуре, расположенном вне створа прямолинейного проводника [1]; $\Phi_5^*[S_{\Delta}(l_2; h); l]$ — результат численного интегрирования (6) в MathCad 2000 Pro (аналитического интегрирования по переменной x и последующего численного интегрирования по y).

Для расчета магнитного потока в контуре II (рис. 3б) $\Phi_6[S_{\Delta}(l_2; h); l]$ необходимо в интеграле (6) изменить пределы интегрирования по x :

$$x_3 = l + l_3; \quad x_4 = l + l_3 + (y - r_0 - h_1)l_2/h.$$

Приближенное аналитическое решение:

$$\begin{aligned} \Phi_6[S_{\Delta}(l_2; h); l] &= \Phi_2[S(l_2; h^{**}); l] = \\ &= I\Delta(l; l_3; l_2; h^{**}; h_1; r_0) = \\ &= I\Delta(l; l_3; l_2; (1 - k_{\Delta 5})h; h_1; r_0). \end{aligned} \quad (9)$$

В общем случае при фиксированном значении h искомый коэффициент $k_{\Delta 5}$ будет сложным образом зависеть от h и l , в меньшей степени — от l_3 и h_1 . Одними из сравнительно универсальных решений (8) являются:

$$k_{\Delta 5}(h; l) = 0,5 - \frac{l}{20\sqrt{h^2 + l^2}} \left(1 + \ln \frac{3h}{l} \right) + \frac{h}{5\sqrt{h^2 + l^2}}; \quad (10a)$$

$$k_{\Delta 5}(h; l) = 0,5 - 0,3 \left[\exp \left(-\frac{l}{2\sqrt{h^2 + l^2}} \right) - 0,6 \exp \left(-\frac{h}{3\sqrt{h^2 + l^2}} \right) \right]. \quad (10б)$$

Расчеты, проведенные для характерных для конструкций ВЧ (СВЧ) транзисторов размеров проводников и контуров показывают, что относительная разница между результатами численного интегрирования и вычисления магнитных потоков с помощью формул (7), (9), (10a), (10б) не превышает 5 %.

Для записи интеграла для вычисления магнитного потока в контуре I (рис. 3 в) $\Phi_6[S_{\Delta}(l_2; h); l]$ необходимо следующим образом записать в (6) пределы интегрирования по x :

$$x_3 = l + l_2 + l_3 - (y - r_0 - h_1)l_2 / h; \quad x_4 = l + l_3 + l_2.$$

Соответствующее приближенное аналитическое решение по аналогии с (4):

$$\Phi_7[S_{\Delta}(l_2; h); l] \approx k_{\Delta 1}(h; h_1 + r_0) \Phi_2[S(l_2; h); l], \quad (11)$$

где

$$\Phi_2[S(l_2; h); l] = I\Delta(l; l_3; l_2; h; h_1; r_0)$$

— магнитный поток, создаваемый током рассматриваемого проводника, в прямоугольном контуре, образованном треугольниками I и II (рис. 3 в).

Аналогично для контура II (рис. 3в), приближенное решение интеграла (6) с пределами:

$$x_{11} = l + l_3 - (y - r_0 - h_1)l_2 / h;$$

$$x_{10} = l + l_3 + l_2 - (y - r_0 - h_1)l_2 / h,$$

запишется в виде:

$$\Phi_7[S_D(l_2; h); l] \approx k_{\Delta 2}(h; h_1 + r_0) \Phi_2[S(l_2; h); l] = k_{\Delta 2}(h; h_1 + r_0) \Delta(l; l_1; l_3; h; h_1; r_0). \quad (12)$$

Погрешность формул (11) и (12) оценивалась посредством вычисления функций:

$$\delta\Phi_7^*(l; h; h_1 + r_0) = \frac{|\Phi_7^*[S_{\Delta}(l_2; h); l] - I\Delta(l; l_1; l_3; h; h_1; r_0)k_{\Delta 1}(h; h_1 + r_0)|}{\Phi_7^*[S_{\Delta}(l_2; h); l]}; \quad (13a)$$

$$\delta\Phi_8^*(l; h; h_1 + r_0) = \frac{|\Phi_8^*[S_{\Delta}(l_2; h); l] - I\Delta(l; l_1; l_3; h; h_1; r_0)k_{\Delta 2}(h; h_1 + r_0)|}{\Phi_8^*[S_{\Delta}(l_2; h); l]}; \quad (13б)$$

где $\Phi_7^*[S_{\Delta}(l_2; h); l]$, $\Phi_8^*[S_{\Delta}(l_2; h); l]$ — результаты численного решения соответствующих интегралов в MathCad 2000 Pro. Для расчетов использовались следующие параметры проводников и контуров (рис. 3в): $r_0 = 0,025$ мм; $l = 1,5$ и $2,0$ мм; $l_2 = 1,5$ и $2,0$ мм; $l_3 = 0$ и $0,5$ мм; $h = 0,2$, $0,5$, 10 и 20 мм; $h_1 = 0 \dots 10$ мм.

В рассмотренных примерах, охватывающих достаточно широкий диапазон значений h и h_1 , а также использующих характерные для внутрикорпусных соединений мощных ВЧ и СВЧ транзисторов значения длин l и l_2 , относительная разница между результатами численного интегрирования и вычислений по приближенным аналитическим формулам составила для всех численных значений параметров в совокупности: $-0,5 \dots +8,5$ % для формулы (16) и $-2,0 \dots +4$ % для формулы (17).

Полученные аналитические выражения для расчетов магнитных потоков в участках контуров треугольной формы учитывают конечные размеры контуров в конструкциях мощных ВЧ и СВЧ транзисторов, поэтому позволяют с высокой точностью решать задачи моделирования самоиндукции и взаимной индукции в плоских контурах, а также создавать унифицированные методики расчетов эквивалентных индуктивностей мощных ВЧ и СВЧ транзисторов. На их базе возможно создание комплексов формул для инженерных расчетов с максимально точным учетом геометрии реальных объектов.

ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ АНАЛИТИЧЕСКИХ ВЫРАЖЕНИЙ ДЛЯ ИНЖЕНЕРНЫХ РАСЧЕТОВ

В качестве примера запишем выражение для индуктивности контура, образованного

дугообразным проводником над проводящей поверхностью и изображенного на рис. 5. Такая конфигурация контура характерна для мощных ВЧ (СВЧ) LDMOS транзисторов (ДМОП транзисторов с горизонтальной структурой), где роль проводящей поверхности играет металлизация истока — основание корпуса, соединенного с нулевым потенциалом схемы. Представим дугообразный проводник приближенно проводником в форме ломаного отрезка, образованного симметричными сторонами равнобедренного треугольника. С погрешностью менее 0,5 % длина дуги AD_1C определяется в соответствии с формулой Гюйгенса [1]:

$$|AD_1C| \approx \frac{1}{3} \left(4\sqrt{|AC|^2 + 4 \cdot |DD_1|^2} - |AC| \right).$$

Тогда длина стороны равнобедренного треугольника ABC :

$$|AB| = \frac{4|AC|}{3} \left(\sqrt{\frac{1}{4} + \frac{|DD_1|^2}{|AC|^2}} - \frac{1}{8} \right);$$

высота треугольника:

$$\begin{aligned} |BD| &= \sqrt{|AB|^2 - \frac{|AC|^2}{4}} = \\ &= \frac{2|AC|}{3} \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{|DD_1|^2}{4|AC|^2} - \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{|DD_1|^2}{|AC|^2}}}; \end{aligned}$$

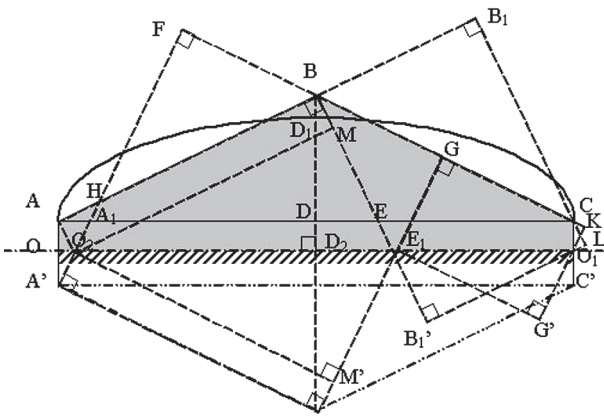


Рис. 5. К расчету индуктивности контура, образованного дугообразным проводником над проводящей поверхностью при аппроксимации дуги равнобедренным треугольником с учетом толщины ленточного электрода или полупроводникового кристалла.

угол при вершине, противоположной основанию:

$$\angle ABC = 2\angle ABD = 2 \arcsin \frac{3}{8 \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{|DD_1|^2}{|AC|^2} - 1}}.$$

Учтем конечную толщину полупроводникового кристалла (транзистора или МОП-конденсатора согласующей цепи) или ленточного электрода на кристаллодержателе корпуса, т.е. форма контура будет трапециевидной (рис. 5). Индуктивность контура будет определяться разностью магнитных потоков через рассматриваемую поверхность, создаваемых токами, протекающими в проводнике и его мнимом отображении относительно проводящей плоскости, т.е.

$$\begin{aligned} L_{ABC} &= \Gamma^{-1}(\Phi[S_{OAD,CO_1}; \cap AD_1C] - \Phi[S_{OAD,CO_1}; \cap A'D_1C']) \approx \\ &\approx \Gamma^{-1}(\Phi[S_{OABCO_1}; \angle ABC] - \Phi[S_{OABCO_1}; \angle A'B'C']) = \\ &= 2\{\Theta(|AB|; 0; |AB|; |AO_2|; 0; \tau_0) + \\ &+ \Theta(|AB|; 0; |AB|; |ME_1|; |AO_2|; \tau_0)k_{\Delta 1}(|ME_1|; |AO_2| + \tau_0) + \\ &+ \Delta(|AB|; 0; |BB_1|; |BB'_1|; 0; \tau_0) - \\ &- \Delta(|AB|; 0; |BB_1|; k_{\Delta 4}(|B_1C|; |AB|)|B_1C|; 0; \tau_0) - \\ &- \Delta(|AB|; 0; |BB_1|; (1 - k_{\Delta 4}(|E_1B'_1|; |AB|))|E_1B'_1|; |BE_1|; \tau_0)\} - \\ &- 2\{\Theta(|A'B'|; 0; |A'B'|; |A'F|; 0; \tau_0) - \\ &- \Theta(|A'B'|; 0; |A'B'|; |A'O_2|; 0; \tau_0) - \\ &- \Theta(|A'B'|; 0; |A'B'|; |M'E_1|; |A'O_2|; \tau_0)k_{\Delta 1}(|M'E_1|; |A'O_2| + \tau_0) - \\ &- \Theta(|A'B'|; 0; |BF|; |HF|; |A'H|; \tau_0)(1 - k_{\Delta 1}(|HF|; |A'H| + \tau_0) + \\ &+ \Delta(|A'B'|; 0; |GK|; |E_1G|; |B'E_1|; \tau_0) - \\ &- \Delta(|A'B'|; 0; |E_1G'|; k_{\Delta 4}(|E_1G|; |A'B'|)|E_1G|; |B'E_1|; \tau_0)\}. \end{aligned} \tag{14}$$

В уменьшаемом не учтен магнитный поток, наводимый током рассматриваемого проводника в треугольнике AOO_2 . В то же время из суммарного потока не исключена его составляющая, наводимая в треугольнике CLO_1 . В вычитаемом не учтен магнитный поток, наводимый током мнимого проводника в четырехугольнике A_1AOO_2 , и не устранен магнитный поток в треугольнике CKO_1 . Однако из-за большой величины угла $ABC (\geq 120^\circ)$, площади рассматриваемых фигур столь малы по сравнению с площадью прямоугольника $OABCO_1$ (рис. 5), а их расположение вне створа рассматриваемых проводников и суммирование с разными знаками, приводит к тому, что результаты вычислений по формуле (14), практически не отличаются от результатов применения более подробных процедур.

ЛИТЕРАТУРА

1. Булгаков О.М. К расчету индуктивности общего вывода мощного ВЧ (СВЧ) транзистора / О. М. Булгаков // Вестник Воронежского института МВД России. — 2003. — № 3 (15). — С. 16—21.
2. Булгаков О.М. Электромагнитные взаимодействия во входных цепях мощных ВЧ- и СВЧ-транзисторов и их энергетические и частотные характеристики: Дис. ... канд. техн. наук:

05.27.01 — Защищена 06.05.93; Утв. 02.07.93. — Воронеж: Воронежский гос. ун-т, 1993. — 152 с. — Библиогр.: С. 142—152.

3. Яворский Б.М. Справочник по физике / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф. — М.: Наука, 1985. — 512 с.

4. Двайт Г.Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы / Г. Б. Двайт. — М.: Наука, 1973. — 228 с.