

УДК 621.382.33

РАСЧЕТ ТОКОВ В СИСТЕМЕ СОЕДИНЕНИЙ В МОДЕЛИ МОЩНОГО ВЧ (СВЧ) ТРАНЗИСТОРА

© 2003 Б. К. Петров, О. М. Булгаков*, Г. А. Осецкая*

*Воронежский государственный университет
Воронежский институт МВД России

Предложена и апробирована методика расчета элементов эквивалентной схемы мощного ВЧ (СВЧ) транзистора, обусловленных явлениями самоиндукции и взаимной индукции в его входных и выходных цепях, одновременно с расчетом распределения токов, протекающих по контурам, образованным монтажно-соединительными элементами отдельных транзисторных ячеек.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из ключевых позиций моделирования мощного ВЧ (СВЧ) транзистора является расчет его эквивалентных индуктивностей и обусловленных ими активных и реактивных составляющих импедансов входного и выходного контуров оконечного каскада (ОК) СВЧ усилителя мощности (УМ) в целом. Разделение активной области транзистора на отдельные ячейки, автономно соединенные с электродами корпуса, а также сложность и неоднозначность учета взаимной индукции в системе входных и выходных контуров транзисторных ячеек (ТЯ) вынуждают использовать для расчетов индуктивнозависимых параметров физических моделей транзисторов и ОК УМ на их основе наиболее общие подходы. В основе таких подходов лежит вычисление потоков индукции магнитного поля в замкнутых контурах, образованных проводниками в системе соединений активных областей ТЯ с электродами корпуса.

ОБЩАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В некотором входном контуре i -ой ТЯ из их общего количества N наводится ЭДС индукции:

$$\dot{E}_{ni} \cdot e^{j\omega t} = -\frac{d}{dt} (\dot{\Phi}_i \cdot e^{j\omega t}) = -j\omega \dot{\Phi}_i \cdot e^{j\omega t},$$

где \dot{E}_{ni} и $\dot{\Phi}_i$ — комплексные амплитуды ЭДС индукции и магнитного потока, пронизывающего контур.

Ввиду сдвига фаз между входным и выходным токами транзистора составляющая

входного импеданса рассматриваемого контура за счет наведенной ЭДС индукции является комплексной величиной:

$$\dot{Z}_{vxi} = \frac{\dot{U}_{ni}}{\dot{I}_{vxi}} = \frac{j\omega \dot{\Phi}_i}{\dot{I}_{vxi}} = j\omega L_{ki} + r_{vxi}. \quad (1)$$

Здесь \dot{I}_{vxi} , \dot{U}_{ni} — комплексные амплитуды контурного тока и падения напряжения в контуре за счет наведенной в нем ЭДС индукции,

$$L_{ki} = \text{Re} \left\{ \frac{\dot{\Phi}_{i\text{СИ}} + \dot{\Phi}_{i\text{ВХ}} + \dot{\Phi}_{i\text{ВЫХ}}}{\dot{I}_{vxi}} \right\} \quad (2)$$

— эквивалентная индуктивность контура,

$$r_{vxi} = -\omega \cdot \text{Im} \left\{ \frac{\dot{\Phi}_{i\text{ВХ}} + \dot{\Phi}_{i\text{ВЫХ}}}{\dot{I}_{vxi}} \right\} \quad (3)$$

— эквивалентное сопротивление потерь за счет взаимной индукции. В (2) и (3) $\dot{\Phi}_{i\text{СИ}}$, $\dot{\Phi}_{i\text{ВХ}}$, $\dot{\Phi}_{i\text{ВЫХ}}$ — соответственно комплексные амплитуды потока самоиндукции рассматриваемого контура, а также суммарные потоки взаимной индукции в данном контуре от входных и выходных контуров.

Представив комплексный коэффициент передачи тока из входного контура в выходной контур в виде:

$$\dot{h}_{21}(\omega) = \text{Re}\{\dot{h}_{21}(\omega)\} + j \text{Im}\{\dot{h}_{21}(\omega)\} \equiv a(\omega) + jb(\omega),$$

где $a(\omega)$ и $b(\omega)$ — параметры, определяемые конструкцией транзистора, типом схемы усилительного каскада (с общим эмиттером, общим истоком и т.п.), классом усилителя (А, В, С и др.) и напряжением питания [1], перепишем (2) и (3):

$$L_{ki} = F_i + \operatorname{Re} \left\{ \frac{1}{\dot{I}_{\text{ВХ } i}} \left(\sum_{\substack{m=1 \\ m \neq i}}^{N_{\text{ВХ}}} F_{m \text{ ВХ}} \cdot \dot{I}_{\text{ВХ } m} + \sum_{n=1}^{N_{\text{ВЫХ}}} F_{n \text{ ВЫХ}} \cdot \dot{I}_{\text{ВЫХ } n} \right) \right\} = F_i + \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq i}}^{N_{\text{ВХ}}} F_{m \text{ ВХ}} \cdot \operatorname{Re}\{\dot{\xi}_{mi}\} + a(\omega) \cdot \sum_{n=1}^{N_{\text{ВЫХ}}} F_{n \text{ ВЫХ}} \cdot \operatorname{Re}\{\dot{\chi}_{ni}\}, \quad (4)$$

$$r_{\text{ВН } i} = -\omega \cdot \operatorname{Im} \left\{ \frac{1}{\dot{I}_{\text{ВХ } i}} \left[\sum_{n=1}^{N_{\text{ВЫХ}}} F_{n \text{ ВЫХ}} \cdot \dot{I}_{\text{ВЫХ } n} + \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq i}}^{N_{\text{ВХ}}} F_{m \text{ ВХ}} \cdot \dot{I}_{\text{ВХ } m} \right] \right\} = -\omega \cdot b(\omega) \cdot \sum_{n=1}^{N_{\text{ВЫХ}}} F_{n \text{ ВЫХ}} \cdot \operatorname{Re}\{\dot{\chi}_{ni}\} - \omega \cdot \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq i}}^{N_{\text{ВХ}}} F_{m \text{ ВХ}} \cdot \operatorname{Im}\{\dot{\xi}_{mi}\}. \quad (5)$$

Здесь $N_{\text{ВХ}}$, $N_{\text{ВЫХ}}$ — количество входных и выходных контуров; $F_{m \text{ ВХ}}$, $F_{n \text{ ВЫХ}}$ — геометрические индуктивные факторы (ГИФ) входных и выходных контуров, объединяющие в себе понятия индуктивности и коэффициента взаимоиндукции [2]; $\dot{I}_{\text{ВХ } m}$, $\dot{I}_{\text{ВЫХ } n}$ — комплексные амплитуды входных и выходных контурных токов; $\dot{\xi}_{mi} = \dot{I}_{\text{ВХ } m} / \dot{I}_{\text{ВХ } i}$; $\dot{\chi}_{ni} = \dot{I}_{\text{ВЫХ } n} / \dot{I}_{\text{ВЫХ } i}$. Полагая величины $a(\omega)$ и $b(\omega)$ не зависящими от порядкового номера ТЯ, получим:

$$\dot{\xi}_{mi} = \dot{\chi}_{ni}.$$

Для транзистора в целом индуктивность 1-го (отсчитываемого со стороны входного импеданса транзисторного кристалла) звена входной согласующей цепи, определяющая максимально реализуемую относительную ширину полосы рабочих частот усилителя:

$$L_1 = \left[\sum_{i=1}^{N_{\text{ВХ}}} L_{\text{ВН } i}^{-1} \right]^{-1}, \quad (6)$$

а активная составляющая входного импеданса за счет взаимоиндукции в системе монтажных соединений, в значительной мере определяющая значение коэффициента усиления по мощности $K_{\text{УР}}$ [1]:

$$r_{\text{ВН}} = \left[\sum_{i=1}^{N_{\text{ВХ}}} r_{\text{ВН } i}^{-1} \right]^{-1}. \quad (7)$$

Таким образом, точность определения L_1 и $r_{\text{ВН}}$ определяется точностью вычислений коэффициентов $\dot{\xi}_{mi}$ и $\dot{\chi}_{ni}$, т.е. точностью расчета распределения токов во входных и выход-

ных контурах транзистора. Поскольку следствием решения этой задачи является расчет распределения мощности по ТЯ, тем самым — возможность прогноза надежностных показателей ОК УМ (предельного уровня выходной мощности и предельного значения к.с.в.н.), вычисление $\dot{\xi}_{mi}$ и $\dot{\chi}_{ni}$ должно являться ядром численного моделирования мощных ВЧ (СВЧ) транзисторов и ОК УМ на их основе.

СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ РАСЧЕТНЫХ МЕТОДИК

Особенности методик расчета $\dot{\xi}_{mi}$ и $\dot{\chi}_{ni}$ определяются конфигурацией монтажных соединений в системе «транзисторный кристалл — согласующие LC-цепи (электроды корпуса)», а также геометрией контактной металлизации.

Рассмотрим типичную для схемы с общей базой конструкцию элемента ОК, включающего транзисторный кристалл 1 и проводники 2, соединяющие активные области его N транзисторных ячеек 3 с общим (базовым) выводом 4 и обкладками МДП-конденсатора входной согласующей цепи 5 (рис. 1). Элементы конструкции, образующие 1-е LC-звено входной согласующей цепи располагаются в пределах участка $F_1 F_2 F_3 F_4$. Входной (эмиттерный) ток i -ой ТЯ разветвляется в точках D_i , H_i и E_i , тем самым образуя контуры $B_i C_i D_i H_i F_1$, $B_i C_i D_i H_i F_2$, $B_i C_i D_i E_i F_3$, $B_i C_i D_i E_i F_4$ с токами соответственно $I_{\text{ВХ } i}^{F_1}$, $I_{\text{ВХ } i}^{F_2}$, $I_{\text{ВХ } i}^{F_3}$, $I_{\text{ВХ } i}^{F_4}$, причем

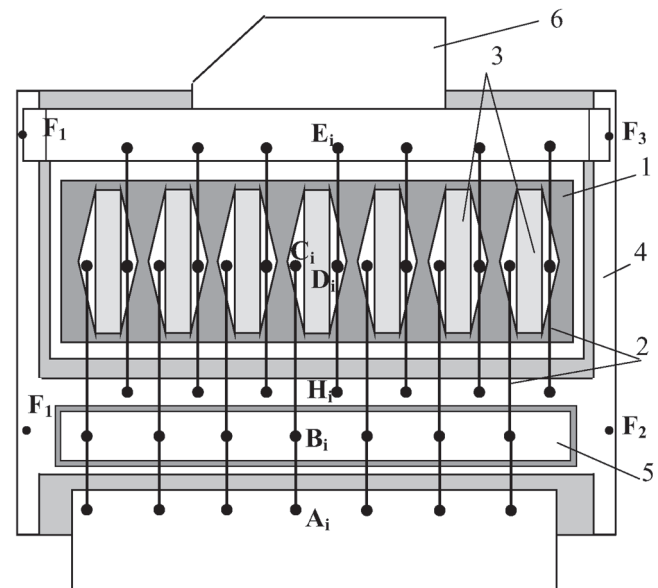


Рис. 1

$$\dot{I}_{\text{вх } i} = \dot{I}_{\text{вх } i}^{F1} + \dot{I}_{\text{вх } i}^{F2} + \dot{I}_{\text{вх } i}^{F3} + \dot{I}_{\text{вх } i}^{F4} \equiv \sum_{k=1}^M \dot{I}_{\text{вх } i}^{Fk}; M = 4, (8)$$

или

$$\xi_{im} = \xi_{im}^{F1} + \xi_{im}^{F2} + \xi_{im}^{F3} + \xi_{im}^{F4} \equiv \sum_{k=1}^M \xi_{im}^{Fk}; M = 4. (9)$$

Выходной (коллекторный) ток i -ой ТЯ протекает по контурам $KD_iH_iF_1, KD_iH_iF_2, KD_iE_iF_3, KD_iE_iF_4$, контурные токи соответственно: $I_{\text{вых } i}^{F1}, I_{\text{вых } i}^{F2}, I_{\text{вых } i}^{F3}, I_{\text{вых } i}^{F4}$. По аналогии с (6) и (7):

$$\dot{I}_{\text{вых } i} = \dot{I}_{\text{вых } i}^{F1} + \dot{I}_{\text{вых } i}^{F2} + \dot{I}_{\text{вых } i}^{F3} + \dot{I}_{\text{вых } i}^{F4} \equiv \sum_{k=1}^M \dot{I}_{\text{вых } i}^{Fk}; M = 4, (10)$$

$$\chi_{im} = \xi_{im} = \chi_i^{F1} + \chi_i^{F2} + \chi_i^{F3} + \chi_i^{F4} \equiv \sum_{k=1}^M \chi_i^{Fk}; M = 4. (11)$$

Ввиду разнонаправленного растекания контурных токов в электроде общего вывода 4 будем считать участки F_1F_4 и F_2F_3 замыкающими эквипотенциальными проводниками, что позволяет попарно совместить точки F_1 и F_4, F_2 и F_3 , тем самым, замкнув контуры и исключив их участки F_1F_4 и F_2F_3 из дальнейшего рассмотрения. В рассматриваемой конструкции проводники $D_iH_i, D_iE_i, H_iF_1, H_iF_2, E_iF_3$ и E_iF_4 принадлежат одновременно входным и выходным контурам (рис. 1), поэтому $N_{\text{вх}} = N_{\text{вых}} = MN$.

В рассматриваемых параллельных контурах величины падения напряжения в одинаковы и равны напряжению на обкладках МДП-конденсатора (разности потенциалов между точками B_i и F_k). Комплексная амплитуда падения напряжения в контуре $B_iC_iD_iH_iF_1$ для случая произвольного M :

$$\begin{aligned} \dot{U}_i^{F1} = & \sum_{k=1}^M \dot{I}_{\text{вх } i}^{Fk} \cdot (\dot{Z}_{C_iD_i} + r_{\text{пв}B_iC_i}) + \\ & + \sum_{k=1}^{M/2} (\dot{I}_{\text{вх } i}^{Fk} + \dot{I}_{\text{вых } i}^{Fk}) \cdot r_{\text{вх}D_iH_i} + \\ & + \sum_{n=1}^N \left\{ \sum_{k=1}^M \dot{I}_{\text{вх } n}^{Fk} \cdot j\omega \cdot \lambda(n; i) \cdot F(B_iC_iD_iH_iF_1; D_nH_n) + \right. \\ & + \sum_{k=1}^{M/2} (\dot{I}_{\text{вх } n}^{Fk} + \dot{I}_{\text{вых } n}^{Fk}) \cdot j\omega \cdot \lambda(n; i) \cdot F(B_iC_iD_iH_iF_1; D_nH_n) + \\ & \left. + \sum_{k=M/2+1}^M (\dot{I}_{\text{вх } n}^{Fk} + \dot{I}_{\text{вых } n}^{Fk}) \cdot j\omega \cdot \lambda(i-1; n) \times \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \times F(B_iC_iD_iH_iF_1; D_nH_n) + (\dot{I}_{\text{вх } n}^{F1} + \dot{I}_{\text{вых } n}^{F1}) \times \\ & \times (j\omega \cdot F(B_iC_iD_iH_iF_1; H_nF_1) + \sigma(n, i) \cdot r_{\text{пв}H_iF_1} + \\ & + \sigma(i, n+1) \cdot r_{\text{пв}H_nF_1}) - (\dot{I}_{\text{вх } i}^{F2} + \dot{I}_{\text{вых } i}^{F2}) \times \\ & \times (j\omega \cdot F(B_iC_iD_iH_iF_1; H_nF_2) + \sigma(i, n) \cdot r_{\text{пв}H_iH_n}) + \\ & + (\dot{I}_{\text{вх } n}^{F3} + \dot{I}_{\text{вых } n}^{F3}) \cdot j\omega \cdot F(B_iC_iD_iH_iF_1; E_nF_3) - \\ & - (\dot{I}_{\text{вх } i}^{F4} + \dot{I}_{\text{вых } i}^{F4}) \cdot j\omega \cdot F(B_iC_iD_iH_iF_1; E_nF_4) \} + \\ & \sum_{g=1}^G \dot{I}_{\text{вх } g}^* \cdot j\omega \cdot \gamma_i(A_g) \cdot F(B_iC_iD_iH_iF_1; A_gB_g). \end{aligned} (12)$$

Здесь $\dot{Z}_{C_iD_i}$ — входной импеданс ТЯ (полное сопротивление между точками C_iD_i); величины вида $r_{\text{пв}B_iC_i}$ — вычисляемые по формулам, приведенным в [3], эквивалентные сопротивления активных потерь за счет наведения вихревых токов в проводящих (низкоомных) подложках токами, протекающими в указанных проводниках; величины вида $F(B_iC_iD_iH_iF_1; B_nC_n)$ — ГИФ указанного проводника (в данном случае — B_nC_n) по отношению к указанному контуру (в данном случае — $B_iC_iD_iH_iF_1$), вычисляемые по формулам, приведенным в [2, 4]; $\lambda(i, n), \sigma(i, n)$ — коэффициенты, зависящие от направления обхода контура и направления тока в соответствующих проводниках, определяемые следующими выражениями:

$$\lambda(x, y) = \begin{cases} 1; & x \geq y, \\ -1; & x < y, \end{cases} \sigma(x, y) = \begin{cases} 1; & x \geq y, \\ 0; & x < y; \end{cases}$$

$\gamma_i(A_g)$ — знак проекции вектора $\overline{A_gB_i}$ на вектор $\overline{B_1H_i}$; $\dot{I}_{\text{вх } g}^*$ — комплексные амплитуды входных токов, протекающих в проводниках A_gB_g , в общем случае $G \neq N$.

Аналогично, для контура $B_iC_iD_iH_iF_2$:

$$\begin{aligned} \dot{U}_i^{F2} = & \sum_{k=1}^M \dot{I}_{\text{вх } i}^{Fk} \cdot (\dot{Z}_{C_iD_i} + r_{\text{пв}B_iC_i}) + \\ & + \sum_{k=1}^{M/2} (\dot{I}_{\text{вх } i}^{Fk} + \dot{I}_{\text{вых } i}^{Fk}) \cdot r_{\text{пв}D_iH_i} + \\ & + \sum_{n=1}^N \left\{ \sum_{k=1}^M (\dot{I}_{\text{вх } n}^{Fk} \cdot j\omega \cdot \lambda(i; n) \cdot F(B_iC_iD_iH_iF_2; B_nC_n) + \right. \\ & + \sum_{k=1}^{M/2} (\dot{I}_{\text{вх } n}^{Fk} + \dot{I}_{\text{вых } n}^{Fk}) \cdot j\omega \cdot \lambda(n; i) \times \\ & \times F(B_iC_iD_iH_iF_2; D_nH_n) + \sum_{k=M/2+1}^M (\dot{I}_{\text{вх } n}^{Fk} + \dot{I}_{\text{вых } n}^{Fk}) \times \\ & \left. \times j\omega \cdot \lambda(i-1; n) \cdot F(B_iC_iD_iH_iF_2; D_nH_n) + \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -\sigma(n, i + 1) \cdot r_{\text{пв } H_i H_n} + (\dot{I}_{\text{вх } i}^{F_2} + \dot{I}_{\text{вых } i}^{F_2}) \times \\
 & \quad \times (-j\omega \cdot F(B_i C_i D_i H_i F_2; H_n F_2) + \\
 & + \sigma(n, i + 1) \cdot r_{\text{пв } H_n F_2} + \sigma(i, n) \cdot r_{\text{пв } H_i F_2}) + \\
 & + (\dot{I}_{\text{вх } n}^{F_3} + \dot{I}_{\text{вых } n}^{F_3}) \cdot j\omega \cdot F(B_i C_i D_i H_i F_2; E_n F_3) - \\
 & - (\dot{I}_{\text{вх } n}^{F_4} + \dot{I}_{\text{вых } n}^{F_4}) \cdot j\omega \cdot F(B_i C_i D_i H_i F_2; E_n F_4) \} + \\
 & + \sum_{g=1}^G \dot{I}_{\text{вх } g}^* \cdot j\omega \cdot \gamma_i(A_g) \cdot F(B_i C_i D_i H_i F_2; A_g B_g).
 \end{aligned} \tag{13}$$

Комплексные амплитуды напряжения в контурах $B_i C_i D_i E_i F_3$ и $B_i C_i D_i E_i F_4$ запишем с учетом того, что их границами являются проводники $F_3 F_2$ и $F_4 F_1$ соответственно:

$$\begin{aligned}
 \dot{U}_i^{F_3} &= \sum_{k=1}^M \dot{I}_{\text{вх } i}^{F_k} \cdot (\dot{Z}_{C_i D_i} + r_{\text{пв } B_i C_i}) + \\
 & + \sum_{k=M/2+1}^M (\dot{I}_{\text{вх } i}^{F_k} + \dot{I}_{\text{вых } i}^{F_k}) \cdot r_{\text{пв } D_i E_i} + \\
 + \sum_{n=1}^N \left\{ \sum_{k=1}^M \dot{I}_{\text{вх } n}^{F_k} \cdot j\omega \cdot [\sigma(i; n) \cdot F(B_i C_i D_i E_i F_3; B_n C_n) + \right. \\
 & + \sigma(n; i + 1) \cdot (F(B_n C_n D_n E_n F_3; B_n C_n) - \\
 & \quad \left. - F(B_i C_i D_i E_i E_n D_n C_n B_n; B_n C_n))] + \right. \\
 & + \sum_{k=1}^{M/2} (\dot{I}_{\text{вх } n}^{F_k} + \dot{I}_{\text{вых } n}^{F_k}) \cdot j\omega \cdot [(-\sigma(i - 1; n)) \times \\
 & \quad \times F(B_i C_i D_i E_i F_3; D_n H_n) + \sigma(n; i) \times \\
 & \quad \times (F(B_i C_i D_i E_i E_n D_n H_n; D_n H_n) - \\
 & \quad \left. - F(H_n D_n E_n F_3; D_n H_n))] + \sum_{k=M/2+1}^M (\dot{I}_{\text{вх } n}^{F_k} + \dot{I}_{\text{вых } n}^{F_k}) \times \right. \\
 & \quad \times j\omega \cdot [\sigma(i - 1; n) \cdot F(B_i C_i D_i E_i F_3; D_n E_n) + \\
 & \quad + \sigma(n; i) \cdot (F(H_n D_n E_n F_3; D_n H_n) - \\
 & \quad \left. - F(B_i C_i D_i E_i E_n D_n H_n; D_n H_n))] + \\
 & + (\dot{I}_{\text{вх } n}^{F_1} + \dot{I}_{\text{вых } n}^{F_1}) \cdot j\omega \cdot F(B_i C_i D_i E_i F_3; H_n F_1) - \\
 & - (\dot{I}_{\text{вх } i}^{F_2} + \dot{I}_{\text{вых } i}^{F_2}) \cdot j\omega \cdot F(B_i C_i D_i E_i F_3; H_n F_2) + \\
 & + (\dot{I}_{\text{вх } n}^{F_3} + \dot{I}_{\text{вых } n}^{F_3}) \cdot (j\omega \cdot F(B_i C_i D_i E_i F_3; E_n F_3) + \\
 & + \sigma(i, n) \cdot r_{\text{пв } E_i F_3} + \sigma(n, i + 1) \cdot r_{\text{пв } E_n F_3}) - (\dot{I}_{\text{вх } n}^{F_4} + \dot{I}_{\text{вых } n}^{F_4}) \times \\
 & \quad \times (j\omega \cdot F(B_i C_i D_i E_i F_3; E_n F_4) + \sigma(n, i + 1) \cdot r_{\text{пв } E_n E_i}) \} + \\
 & + \sum_{g=1}^G \dot{I}_{\text{вх } g}^* \cdot j\omega \cdot \gamma_i(A_g) \cdot F(B_i C_i D_i E_i F_3; A_g B_g);
 \end{aligned} \tag{14}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{U}_i^{F_4} &= \sum_{k=1}^M \dot{I}_{\text{вх } i}^{F_k} \cdot (\dot{Z}_{C_i D_i} + r_{\text{пв } B_i C_i}) + \\
 & + \sum_{k=M/2+1}^M (\dot{I}_{\text{вх } i}^{F_k} + \dot{I}_{\text{вых } i}^{F_k}) \cdot r_{\text{пв } D_i E_i} + \\
 + \sum_{n=1}^N \left\{ \sum_{k=1}^M \dot{I}_{\text{вх } n}^{F_k} \cdot j\omega \cdot [\sigma(n; i) \cdot F(B_i C_i D_i E_i F_4; B_n C_n) + \right. \\
 & + \sigma(i - 1; n) \cdot (F(B_n C_n D_n E_n F_4; B_n C_n) - \\
 & \quad \left. - F(B_n C_n D_n E_n E_i D_i C_i B_i; B_n C_n))] + \right. \\
 & + \sum_{k=1}^{M/2} (\dot{I}_{\text{вх } n}^{F_k} + \dot{I}_{\text{вых } n}^{F_k}) \cdot j\omega \cdot [(-\sigma(n; i)) \times \\
 & \quad \times F(B_i C_i D_i E_i F_4; D_n H_n) + \sigma(i - 1; n) \times \\
 & \quad \times (F(B_n C_n D_n E_n E_i D_i H_i; D_n H_n) - \\
 & \quad \left. - F(H_n D_n E_n F_4; D_n H_n))] + \sum_{k=M/2+1}^M (\dot{I}_{\text{вх } n}^{F_k} + \dot{I}_{\text{вых } n}^{F_k}) \times \right. \\
 & \quad \times j\omega \cdot [\sigma(n; i) \cdot F(B_i C_i D_i E_i F_4; D_n E_n) + \\
 & \quad + \sigma(i - 1; n) \cdot (F(H_n D_n E_n F_4; D_n H_n) - \\
 & \quad \left. - F(B_n C_n D_n E_n E_i D_i H_i; D_n H_n))] - \\
 & - (\dot{I}_{\text{вх } n}^{F_1} + \dot{I}_{\text{вых } n}^{F_1}) \cdot j\omega \cdot F(B_i C_i D_i E_i F_4; H_n F_1) + \\
 & + (\dot{I}_{\text{вх } i}^{F_2} + \dot{I}_{\text{вых } i}^{F_2}) \cdot j\omega \cdot F(B_i C_i D_i E_i F_4; H_n F_2) - \\
 & - (\dot{I}_{\text{вх } n}^{F_3} + \dot{I}_{\text{вых } n}^{F_3}) \cdot (j\omega \cdot F(B_i C_i D_i E_i F_4; E_n F_3) + \\
 & + \sigma(i - 1, n) \cdot r_{\text{пв } E_n E_i}) - (\dot{I}_{\text{вх } n}^{F_4} + \dot{I}_{\text{вых } n}^{F_4}) \times \\
 & \quad \times (j\omega \cdot F(B_i C_i D_i E_i F_4; E_n F_4) + \sigma(n, i) \times \\
 & \quad \times r_{\text{пв } E_n F_4} + \sigma(n, i + 1) \cdot r_{\text{пв } E_i F_4}) \} - \\
 & - \sum_{g=1}^G \dot{I}_{\text{вх } g}^* \cdot j\omega \cdot \gamma_i(A_g) \cdot F(B_i C_i D_i E_i F_4; A_g B_g).
 \end{aligned} \tag{15}$$

Подобным образом записываются и системы линейных уравнений для выходных контуров с контурными токами $I_{\text{вых } i}^{F_k}$; $k = 1, \dots, M$; $i = 1, \dots, N$. Например, для контура $KD_i E_i F_3$:

$$\begin{aligned}
 \dot{U}_{\text{вых } i}^{F_3} &= \\
 & = \sum_{k=1}^M \dot{I}_{\text{вых } i}^{F_k} \cdot \sum_{n=1}^N [(j\omega \cdot F(KD_i E_i F_3; KD_n) + r_{\text{пв } KD_n}) + \dot{Z}_{\text{вых } i}] + \\
 & \quad + \sum_{k=M/2+1}^M (\dot{I}_{\text{вх } i}^{F_k} + \dot{I}_{\text{вых } i}^{F_k}) \cdot r_{\text{пв } D_i E_i} + \\
 & + \sum_{n=1}^N \left\{ \sum_{k=1}^M \dot{I}_{\text{вх } n}^{F_k} \cdot j\omega \cdot [\sigma(i; n) \cdot F(KD_i E_i F_3; B_n C_n) + \right.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & +\sigma(n; i+1) \cdot (F(KE_n F_3; B_n C_n) - F(KE_i D_i; B_n C_n)) + \\
 & + \sum_{k=1}^{M/2} (\dot{I}_{\text{ВХ}n}^{Fk} + \dot{I}_{\text{ВЫХ}n}^{Fk}) \cdot j\omega \cdot [(-\sigma(i; n)) \cdot F(KD_i E_i F_3; D_n H_n) + \\
 & + \sigma(n; i+1) \cdot (F(KD_i E_i; D_n H_n) - F(KE_n F_3; D_n H_n))] + \\
 & + \sum_{k=M/2+1}^M (\dot{I}_{\text{ВХ}n}^{Fk} + \dot{I}_{\text{ВЫХ}n}^{Fk}) \cdot j\omega \cdot [\sigma(i; n) \cdot F(KD_i E_i F_3; D_n E_n) + \\
 & + \sigma(n; i+1) \cdot (F(KE_n F_3; D_n H_n) - F(KD_i E_i; D_n H_n))] - \\
 & - (\dot{I}_{\text{ВХ}n}^{F1} + \dot{I}_{\text{ВЫХ}n}^{F1}) \cdot j\omega \cdot F(KE_i F_3; H_n F_1) + \\
 & + (\dot{I}_{\text{ВХ}i}^{F2} + \dot{I}_{\text{ВЫХ}i}^{F2}) \cdot j\omega \cdot F(KE_i F_3; H_n F_2) + \\
 & + (\dot{I}_{\text{ВХ}n}^{F3} + \dot{I}_{\text{ВЫХ}n}^{F3}) \cdot (j\omega \cdot F(KE_i F_3; E_n F_3) + \\
 & + \sigma(i, n) \cdot r_{\text{пв} E_i F_3} + \sigma(n, i+1) \cdot r_{\text{пв} E_n F_3}) - \\
 & - (\dot{I}_{\text{ВХ}n}^{F4} + \dot{I}_{\text{ВЫХ}n}^{F4}) \cdot (j\omega \cdot F(KE_i F_3; E_n F_4) + \\
 & + \sigma(n, i+1) \cdot r_{\text{пв} E_n E_i}) \} + \\
 & + \sum_{g=1}^G \dot{I}_{\text{ВХ}g}^* \cdot j\omega \cdot \gamma_i(A_g) \cdot F(KD_i E_i F_3; A_g B_g).
 \end{aligned} \tag{16}$$

Поскольку распределение токов $I_{\text{ВХ}g}^*$ не оказывает существенного влияния на величины магнитных потоков в рассматриваемых контурах, в первом приближении можно считать все величины $I_{\text{ВХ}g}^*$ равными между собой: $\dot{I}_{\text{ВХ}g}^* = \dot{I}_{\text{ВХ}}/G$. На основе приведенных выражений (12), ..., (16) с учетом условий (8), (10), а также равенств:

$$\left| \sum_{n=1}^N \dot{I}_{\text{ВХ}n} \right| = |\dot{I}_{\text{ВХ}}| = \sqrt{\frac{2P_{\text{ВХ}}}{R_{\text{ВХ}1}}} = \tag{17}$$

$$= \frac{1}{|\dot{h}_{21}(\omega)|} \sqrt{\frac{2P_{\text{ВХ}}}{R_1}} = \frac{2P_{\text{ВХ}}}{|\dot{h}_{21}(\omega)| \cdot U_1},$$

$$\left| \sum_{n=1}^N \dot{I}_{\text{ВЫХ}n} \right| = |\dot{I}_{\text{ВЫХ}}| = |\dot{h}_{21}(\omega) \cdot \dot{I}_{\text{ВХ}}| = \frac{2P_{\text{ВЫХ}}}{U_1}, \tag{18}$$

где $P_{\text{ВХ}}$ и $P_{\text{ВЫХ}}$ — соответственно входная и выходная мощности ОК;

$$R_{\text{ВХ}1} = \left(\sum_{i=1}^N \text{Re}\{Z_{C_i D_i}\} \right)^{-1} \approx \frac{\text{Re}\{Z_{C_i D_i}\}}{N}$$

— входное сопротивление транзистора, рассчитываемое согласно приведенным в [1] формулам; R_1 — эквивалентное сопротивление нагрузки ОК; $U_1 \approx 0,9 \cdot E_n$ — амплитуда напряжения на нагрузке, E_n — напряжение источника питания ОК, реализована итерационная процедура, структура которой приведена на рис. 2.

Для вычисления L_{ki}^{Fk} , $r_{\text{ВВ}i}^{Fk}$ исключим из соответствующих выражений (12), ..., (16) слагаемые, не обусловленные магнитными потоками самоиндукции и взаимоиндукции. Так, например, для контура $B_i C_i D_i H_i F_i$ остаток комплексной амплитуды напряжения

$$\begin{aligned}
 \Delta \dot{U}_i^{F1} = & \sum_{n=1}^N \left\{ \sum_{k=1}^M \dot{I}_{\text{ВХ}n}^{Fk} \cdot j\omega \cdot \lambda(i; n) \cdot F(B_i C_i D_i H_i F_i; B_n C_n) + \right. \\
 & + \sum_{k=1}^{M/2} (\dot{I}_{\text{ВХ}n}^{Fk} + \dot{I}_{\text{ВЫХ}n}^{Fk}) \cdot j\omega \cdot \lambda(n; i) \cdot F(B_i C_i D_i H_i F_i; D_n H_n) + \\
 & + \sum_{k=M/2+1}^M (\dot{I}_{\text{ВХ}n}^{Fk} + \dot{I}_{\text{ВЫХ}n}^{Fk}) \cdot j\omega \cdot \lambda(i-1; n) \cdot F(B_i C_i D_i H_i F_i; D_n H_n) + \\
 & + (\dot{I}_{\text{ВХ}n}^{F1} + \dot{I}_{\text{ВЫХ}n}^{F1}) \cdot j\omega \cdot F(B_i C_i D_i H_i F_i; H_n F_1) - \\
 & - (\dot{I}_{\text{ВХ}i}^{F2} + \dot{I}_{\text{ВЫХ}i}^{F2}) \cdot j\omega \cdot F(B_i C_i D_i H_i F_i; H_n F_2) + \\
 & + (\dot{I}_{\text{ВХ}n}^{F3} + \dot{I}_{\text{ВЫХ}n}^{F3}) \cdot j\omega \cdot F(B_i C_i D_i H_i F_i; H_n F_3) - \\
 & \left. - (\dot{I}_{\text{ВХ}i}^{F4} + \dot{I}_{\text{ВЫХ}i}^{F4}) \cdot j\omega \cdot F(B_i C_i D_i H_i F_i; H_n F_4) \right\} + \\
 & \sum_{g=1}^G \dot{I}_{\text{ВХ}g}^* \cdot j\omega \cdot \gamma_i(A_g) \cdot F(B_i C_i D_i H_i F_i; A_g B_g).
 \end{aligned} \tag{19}$$

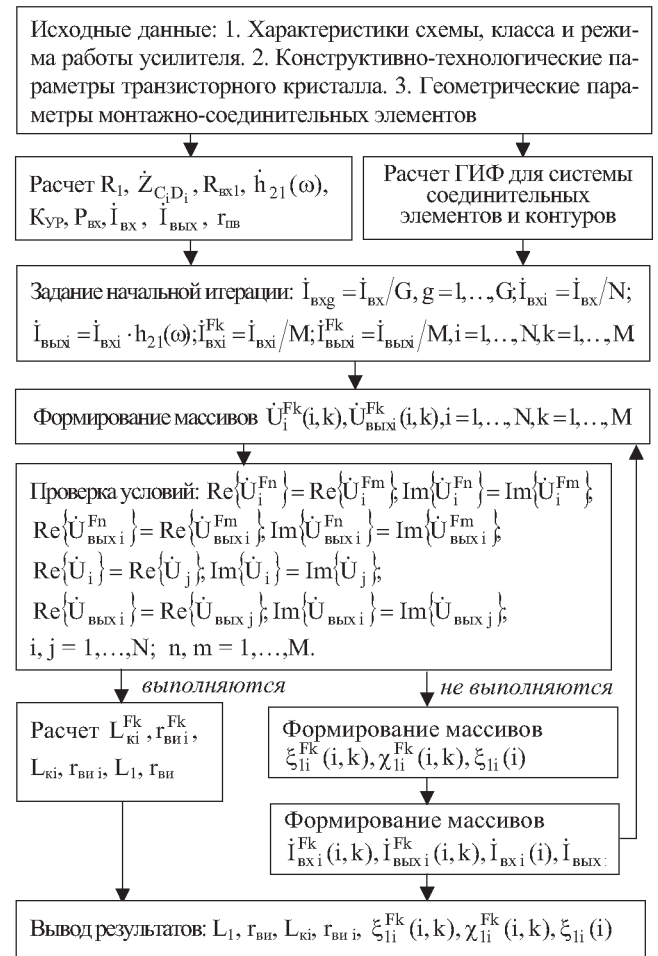


Рис. 2

Тогда в соответствии с выражением (1):

$$L_{ki}^{F1} = \frac{1}{\omega} \operatorname{Im} \left\{ \frac{\Delta \dot{U}_i^{F1}}{\dot{I}_{\text{вх}i}^{F1}} \right\}; \quad (20)$$

$$r_{\text{вн}i}^{Fk} = \operatorname{Re} \left\{ \frac{\Delta \dot{U}_i^{F1}}{\dot{I}_{\text{вх}i}^{F1}} \right\}. \quad (21)$$

Массивы коэффициентов $\xi_{im}^{Fk}(i, k), \chi_{im}^{Fk}(i, k), \xi_{im}(i)$ для некоторого $i \in \{1, \dots, N\}$, и $m = 1, \dots, N; k = 1, \dots, M$, формируются за счет приведения выражений (20) и (21) к виду соответственно (4) и (5).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В таблице 1 приведены расчетные значения коэффициентов ξ_{mi}^{Fk}, ξ_{mi} для модулей комплексных амплитуд входных контурных токов, при вычислении которых использовались конструктивные и технологические параметры транзистора КТ976А [5]. Значения коэффициентов нормированы на среднее значение входного тока $|\dot{I}_{\text{вх}i}| = |\dot{I}_{\text{вх}}| / N; N = 9$.

Амплитуды токов $I_{\text{вх}i}^{F3}, I_{\text{вх}i}^{F4}$ монотонно зависят от порядкового номера ТЯ i , а их сумма имеет минимум, приходящийся на среднее значение i , и максимумы, соответствующие номерам крайних ТЯ. В то же время сумма амплитуд токов $I_{\text{вх}i}^{F1}, I_{\text{вх}i}^{F2}$ изменяется с ростом i монотонно, определяя зависимость $|\dot{I}_{\text{вх}i}(i)|$ в целом, благодаря относительно большому значению коэффициентов ξ_{mi}^{Fk} для $k = 1, 2$. Ка-

чественный характер зависимости $|\dot{I}_{\text{вх}i}(i)|$ определяется количеством M и геометрией контуров, в состав которых входит проводник $B_i C_i$, а также знаками $a(\omega)$ и $b(\omega)$, зависящими от схемы включения транзистора. Приведенные в таблице 1 данные уточняют полученные ранее результаты [5] в части соотношения, в котором разделяются токи в точках D_i : показано, что доля входного тока, ответвляющегося в направлении $D_i C_i$ составляет порядка 35—45 % от $|\dot{I}_{\text{вх}i}|$ и уменьшается с ростом N .

Расчетные значения L_{ki} и $r_{\text{вн}i}$ согласуются с полученными ранее результатами [6]. Отрицательные величины $r_{\text{вн}i}$ свидетельствуют о характерной для схемы с общей базой передаче части выходной мощности во входной контур.

ЛИТЕРАТУРА

1. Никишин В.И. Проектирование и технология производства мощных СВЧ транзисторов / В. И. Никишин, Б. К. Петров, В. Ф. Сынов и др. — М.: Радио и связь, 1989. — 144 с.
2. Булгаков О.М. К расчету индуктивности общего вывода мощного ВЧ (СВЧ) транзистора // Вестник Воронежского института МВД России. — Вып. 3(15), — Воронеж: ВИ МВД РФ, 2003. — С. 16—21.
3. Евстигнеев А.С. Характеристики системы проводник — полупроводниковый кристалл // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. — 1982. — Вып. 7. — С. 53—58.

Таблица 1

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ξ_{mi}^{F1}	0,244	0,275	0,294	0,308	0,319	0,328	0,334	0,340	0,345
ξ_{mi}^{F2}	0,252	0,281	0,299	0,313	0,323	0,331	0,337	0,347	0,348
ξ_{mi}^{F3}	0,134	0,140	0,147	0,156	0,168	0,184	0,209	0,245	0,295
ξ_{mi}^{F4}	0,311	0,256	0,219	0,192	0,171	0,155	0,143	0,134	0,127
ξ_{mi}	0,940	0,952	0,959	0,969	0,980	0,997	1,024	1,063	1,116
$\frac{\xi_{mi}^{F1} + \xi_{mi}^{F2}}{\xi_{mi}}$	0,527	0,584	0,618	0,641	0,655	0,660	0,656	0,643	0,622
$\frac{\xi_{mi}^{F1} + \xi_{mi}^{F2}}{\xi_{mi}}$	0,473	0,416	0,382	0,359	0,345	0,340	0,344	0,357	0,378
$L_{ki}, \text{ нГн}$	0,897	0,974	1,045	1,109	1,160	1,202	1,231	1,262	1,301
$r_{\text{вн}i}, \text{ Ом}$	-1,80	-1,84	-1,88	-1,96	-2,03	-2,12	-2,29	-2,44	-2,73

4. Петров Б.К., Булгаков О.М., Гуков П.О. Расчет эквивалентных индуктивностей входных цепей мощных СВЧ-транзисторов / Воронежский гос. ун-т, г. Воронеж, 1992. — 11 с. — Деп. в ВИНТИ № 1420-В92.

5. Петров Б.К., Булгаков О.М., Гуков П.О. Расчет индуктивностей входных цепей и коэффициента усиления по мощности мощных СВЧ-транзисторов по схеме с общей базой / Воронеж. гос. ун-т, Воронеж, 1992. — 14 с. — Деп. в ВИНТИ, № 3429-В92.

6. Булгаков О.М., Петров Б.К. Компенсация уменьшения коэффициентов усиления по мощности конечных каскадов узкодиапазонных ВЧ и СВЧ транзисторных усилителей, вызванного индуктивным взаимодействием входных цепей транзисторных ячеек / Сборник докладов VII Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» (Воронеж, 24—26 апреля 2001 г.). — Воронеж: ВНИИС, ВорГУ, 2001. — Т. 3. — С. 1791—1799.