



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2001–17  
ОЭА

А. П. Леонов

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ:  
ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РЕЗИСТОРОВ**

Направлено в журнал  
«Инженерная физика»

**Протвино 2001**

**Аннотация**

Леонов А.П. Моделирование электронных схем: особенности применения резисторов: Препринт ИФВЭ 2001 – 17. – Протвино, 2001. – 7 с., 4 рис., 1 табл., библиогр.: 4.

Исследована зависимость комплексного сопротивления резистора от частоты. Для наилучшего сочетания паразитных параметров построены справочные кривые, позволяющие определить граничные частоты применения резисторов различных типов. Справочные кривые предназначены для использования в библиотеках САПР.

**Abstract**

Leonov A.P. Electronic Simulation: Peculiarities of Resistors: IHEP Preprint 2001 – 17. – Protvino, 2001. – p. 7, fig. 4, table 1, refs.: 4.

The dependence of resistor's complex impedance from frequency was investigated. The curves for determination of critical frequency of various kinds of resistors were calculated for worst-case analysis of parasitic parameters. These curves are destined for libraries of EDA-systems.

## Введение

В последнее время моделирование принципиальных схем стало неотъемлемой частью интегрированного процесса автоматизированного проектирования и производства электроники [1]. Однако, несмотря на то, что эта процедура является одной из наиболее проработанных задач проектирования, имеется ряд нерешенных проблем, снижающих ее эффективность. В частности, при моделировании не всегда учитываются некоторые важные конструктивно-технологические параметры компонентов. Например, как правило, в рабочем диапазоне частот сопротивление резистора считается активным и постоянным. В действительности резисторы имеют паразитные индуктивность  $L_S$  и емкость  $C_P$ , вклад которых в определенном диапазоне частот может стать доминирующим. Причем граничная частота применения зависит не только от типа резистора, но и от величины его сопротивления. Использование при моделировании точной математической модели резистора не всегда возможно, так как точные значения паразитных параметров, как правило, неизвестны. Поэтому в библиотеке системы автоматизированного проектирования (САПР) целесообразно иметь для каждого типа резисторов справочные кривые, отражающие зависимость граничной частоты от величины сопротивления резистора при наихудшем сочетании паразитных параметров. По этим кривым разработчик может быстро оценить область допустимого использования резисторов данного типа. Поскольку исследования проводятся для случая *наихудшего сочетания* паразитных параметров, область рекомендуемого применения резисторов смещается в сторону более низких частот. Поэтому, если рабочая частота резистора превышает граничную (приведенную на справочных кривых), то это является предупреждением о необходимости учета зависимости импеданса и реактивной составляющей сопротивления (если это критично) от частоты.

Целью данной работы является выработка рекомендаций по применению резисторов различных типов при моделировании принципиальных схем, осуществляемая на основе исследования зависимости импеданса резистора и его фазовых характеристик от частоты  $f$ .

### 1. Построение математической модели и исследование схемы замещения резистора

Определим аналитическое выражение для расчета комплексного сопротивления резистора  $Z(j\omega)$  как функции частоты  $\omega=2\pi f$ . В соответствии со схемой замещения реального резистора, представленной на рис. 1а,  $Z(j\omega)$  будет определяться выражением

$$Z(j\omega)=[1/(R+j\omega L_S)+j\omega C_P]^{-1}, \quad (1)$$

где  $R$  - номинальное, активное сопротивление резистора.

$$Z(j\omega)=R(1+j\omega L_S/R)/(1+j\omega RC_P-\omega^2 L_S C_P)=R(1+j\omega T_1)/[1+2\xi j\omega T_0+(j\omega T_0)^2], \quad (2)$$

где

$$T_1=L_S/R; \quad (3)$$

$$T_0=\sqrt{L_S C_P}; \quad (4)$$

$$\xi=0,5R\sqrt{C_P/L_S}. \quad (5)$$

В соответствии с выражением (2) схему замещения реального резистора можно представить [2] в виде последовательного соединения форсирующего звена  $W_1(j\omega)=(1+j\omega T_1)$  и звена второго порядка  $W_2(j\omega)=R/[1+2\xi j\omega T_0+(j\omega T_0)^2]$  (рис. 1б), где при  $\xi < 1$  звено второго порядка является колебательным, а при

$\xi \geq 1$  эквивалентно двум последовательно соединенным звеньям первого порядка (рис.1в), описываемым передаточными функциями (6) и (7).

$$W_3(j\omega) = R/(1+j\omega T_3), \quad (6)$$

$$W_4(j\omega) = 1/(1+j\omega T_4), \quad (7)$$

$$\text{где } T_{3,4} = [RC_P \pm \sqrt{R^2 C_P^2 - 4L_S C_P}] / 2. \quad (8)$$

Таким образом, при  $\xi \geq 1$

$$Z(j\omega) = (1+j\omega T_1) / \{ [R/(1+j\omega T_3)] \times [1/(1+j\omega T_4)] \}. \quad (9)$$

Определим значение сопротивления  $R_{\text{КРИТ}}$ , при котором  $\xi = 1$ , то есть  $0,5R\sqrt{C_P/L_S} = 1$  или

$$R_{\text{КРИТ}} = 2\sqrt{L_S/C_P}. \quad (10)$$

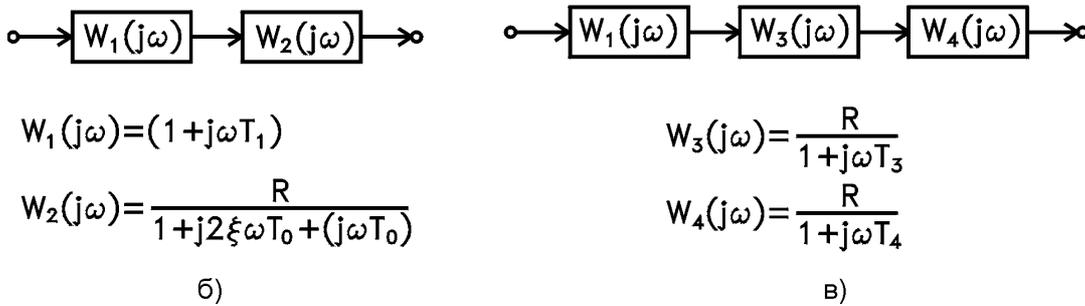
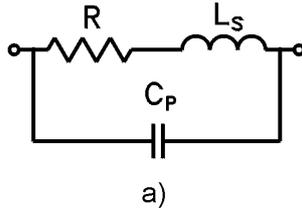


Рис.1. Схема замещения резистора.

При  $R < R_{\text{КРИТ}}$  сопротивление  $Z(j\omega)$  определяется выражением (2). В этом случае из-за наличия колебательного звена при  $\xi \leq 0,5$  происходит увеличение  $|Z(j\omega)|$  по сравнению с номинальным  $R$  в области частот близких к резонансной  $f_0 = 1/2\pi\sqrt{L_S C_P}$  [2]. Из выражения (5) для  $\xi = 0,5$  определим значение

$$R_\xi = \sqrt{L_S/C_P} = 0,5R_{\text{КРИТ}}, \quad (11)$$

где  $R_\xi$  - наибольшее значение сопротивления резистора, при котором в области резонансной частоты  $f_0$  происходит более чем 10% увеличение  $|Z(j\omega)|$ .

Анализ выражения (2) показывает, что при  $T_1 > T_0$  значение  $|Z(j\omega)|$  увеличивается при  $f < f_0$  за счет влияния форсирующего звена, то есть этот эффект имеет место при  $T_1 \geq T_0$  или  $L_S/R \geq \sqrt{L_S C_P}$ . Отсюда  $R_{\text{ФОР}} \leq \sqrt{L_S/C_P}$  или, сравнивая с выражением (11),

$$R_{\text{ФОР}} \leq R_\xi = 0,5R_{\text{КРИТ}}, \quad (12)$$

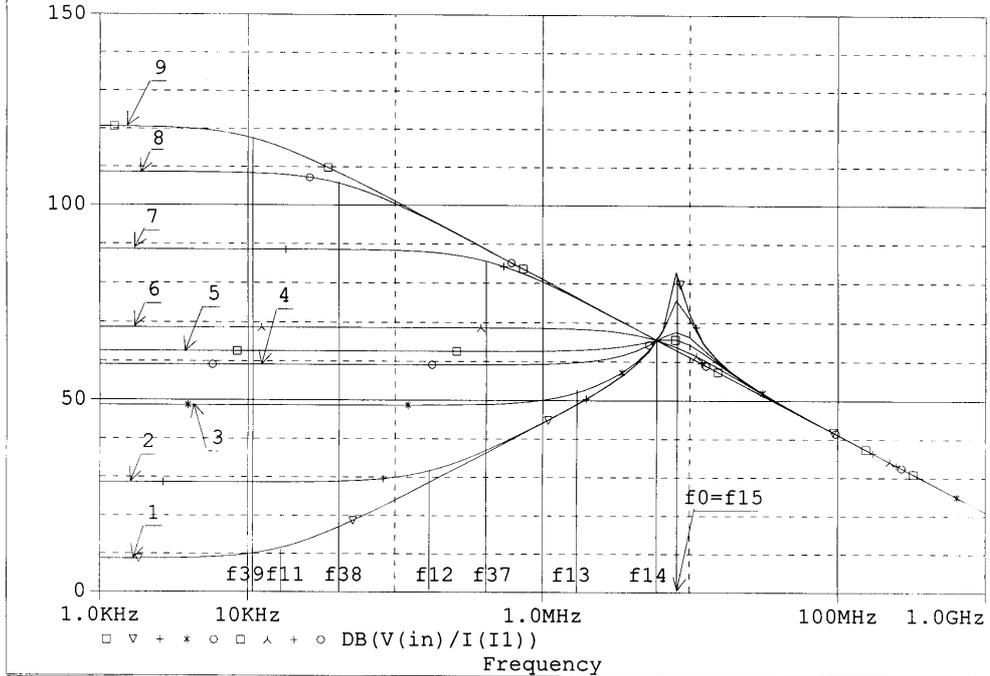
где  $R_{\text{ФОР}}$  - значение сопротивления резистора, при котором величина  $|Z(j\omega)|$  увеличивается за счет влияния форсирующего звена.

Исследование выражений (2) и (9) проведем с использованием логарифмических амплитудных (ЛАХ) и фазовых (ЛФХ) характеристик, что позволит получить удобные для анализа кривые при изменении величин  $f$  и  $R$  в широком диапазоне.

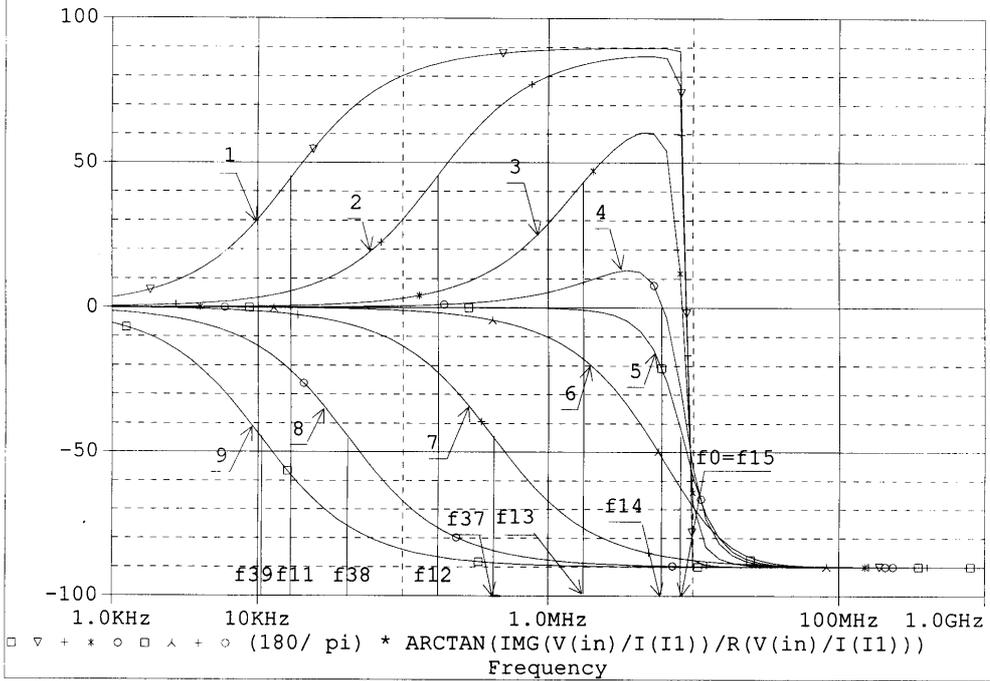
На рис.2а и 2б приведены соответственно ЛАХ и ЛФХ для проволочного резистора (таблица 1), полученные в результате расчетов на PSpice [3]. Анализ показывает, что в зависимости от величины сопротивления резистора следует выделить три области.

\*\* circuit file for profile: AC SweepPr1080K , \*\* circuit file for pr.....  
 Date/Time run: 03/07/01,... 12:30:53,... Temperature: 27.0,...

a) (A) resist-SCHEMATIC1..., resist-SCHEMATIC1..., resist-SCHEMATIC1..., ...



b) (B) resist-SCHEMATIC1..., resist-SCHEMATIC1..., resist-SCHEMATIC1..., ...



Date: March 07, 2001

Page 1

Time: 15:14:28

Рис.2. Логарифмические амплитудно- и фазочастотные характеристики резистора (кривые 1 соответствуют сопротивлению резистора, равному  $0,001R_{\text{КРИТ}}$ , 2 -  $0,01R_{\text{КРИТ}}$ , 3 -  $0,1R_{\text{КРИТ}}$ , 4 -  $0,3R_{\text{КРИТ}}$ , 5 -  $0,5R_{\text{КРИТ}}$ , 6 -  $R_{\text{КРИТ}}$ , 7 -  $10R_{\text{КРИТ}}$ , 8 -  $100R_{\text{КРИТ}}$ , 9 -  $400R_{\text{КРИТ}}$ ).

Первая область соответствует величинам резисторов  $R < 0,5R_{\text{КРИТ}}$  (кривые 1, 2,3,4 на рис.2а и 2б). В этом диапазоне сопротивление постоянно и равно номинальному при изменении частоты от 0 до

$$f_1 = 1/2\pi T_1 = R/2\pi L_S \quad (13)$$

(до частот  $f_{11}, f_{12}, f_{13}, f_{14}$  на рис.2а) и возрастает при  $f > f_1$ . Для  $R \leq R_{\text{КРИТ}}/3$  сопротивление резистора носит индуктивный характер (на частотах  $f_{11}, f_{12}, f_{13}$  для кривых 1,2,3 на рис.2б сдвиг по фазе более  $+40^\circ$  и  $0^\circ$  для кривой 4 на частоте  $f_{14}$ ). Для  $R_{\text{КРИТ}}/3 < R < 0,5R_{\text{КРИТ}}$  сопротивление резистора носит емкостной характер, изменяясь от  $0^\circ$  для кривой 4 (на частоте  $f_{14}$ , рис.2б) до более чем  $-40^\circ$  для кривой 5 (на частоте  $f_{15}$ , рис.2б). Кроме того, при  $R < 0,5R_{\text{КРИТ}}$  имеет место резкое увеличение величины сопротивления вблизи резонансной частоты  $f_0$  из-за  $\xi \leq 0,5$ .

Вторая область характеризуется величинами сопротивлений от  $0,5R_{\text{КРИТ}}$  до  $R_{\text{КРИТ}}$  (кривые 5 и 6 на рис.2а и 2б). В этой области влияние форсирующего звена сказывается на частотах больших  $f_0$ , увеличение сопротивления при  $\xi > 0,5$  незначительно, и его величину можно считать постоянной при  $f \leq f_0$ . При этом на частоте  $f_0$  сопротивление носит емкостной характер (сдвиг по фазе более  $-40^\circ$ , рис.2б).

Третья область представлена сопротивлениями  $R > R_{\text{КРИТ}}$  (кривые 7,8,9 на рис 2а и 2б). В этом диапазоне комплексное сопротивление описывается выражением (9). При условии, что  $T_3 \gg T_1$  и  $T_3 \gg T_4$ , выражение (9) преобразуется к виду

$$Z(j\omega) = R/(1+j\omega T_3), \quad (14)$$

что соответствует инерционному звену [2]. Соответственно величину сопротивления можно считать постоянной до частоты

$$f_3 = 1/2\pi T_3, \quad (15)$$

а затем она уменьшается. На этой частоте сопротивление имеет емкостной характер (для кривых 7,8,9 на частотах  $f_{37}, f_{38}, f_{39}$  сдвиг по фазе более  $-40^\circ$ , рис.2б).

Итак, граничная частота использования резистора определяется не только его типом, но и величиной. Определить ее можно следующим образом:

- выражением (13) для  $R \leq 0,5R_{\text{КРИТ}}$  ;
- величиной  $f_0$  для  $0,5R_{\text{КРИТ}} < R \leq R_{\text{КРИТ}}$  ;
- выражением (15) для  $R > R_{\text{КРИТ}}$  ;
- на частотах близких к граничным сопротивление является комплексным, то есть обладает индуктивным или емкостным характером; поэтому возникает необходимость в построении справочных кривых и для случая, когда сопротивление во всем диапазоне рабочих частот является активным (сдвиг по фазе не превышает  $\pm 10^\circ$ ).

## 2. Определение граничной рабочей частоты резистора

Построим справочные кривые для определения граничной рабочей частоты различных типов резисторов, приведенных в таблице 1, где использованы наибольшие для данного типа резисторов значения  $L_S^*$  и  $C_p^*$  [4]. При этом ограничим рабочую частоту сверху величиной 1ГГц, а сопротивление резистора величиной 1МОм.

Приведенные на рис.3 справочные кривые обеспечивают выбор граничной рабочей частоты резистора исходя из необходимости соблюдения условия  $Z(j\omega) \approx R$ .

При этом на частотах близких к граничным сопротивление резистора имеет индуктивный характер при  $R \leq 0,3R_{\text{КРИТ}}$  и емкостной при  $R > 0,3R_{\text{КРИТ}}$ .

На рис.4 приведены аналогичные кривые для случая, когда сопротивление резистора является активным во всем рабочем диапазоне частот, сдвиг по фазе не превышает  $\pm 10^\circ$ . Точный расчет показывает, что вблизи величины  $0,5R_{\text{КРИТ}}$  эти кривые имеют узкий выброс (на рис.4 показано штриховой линией для кривой 4), обусловленный переходом фазы через 0 (рис.2б). На справочных кривых этот узкий выброс целесообразно аппроксимировать ломаной (сплошная линия на рис.4).

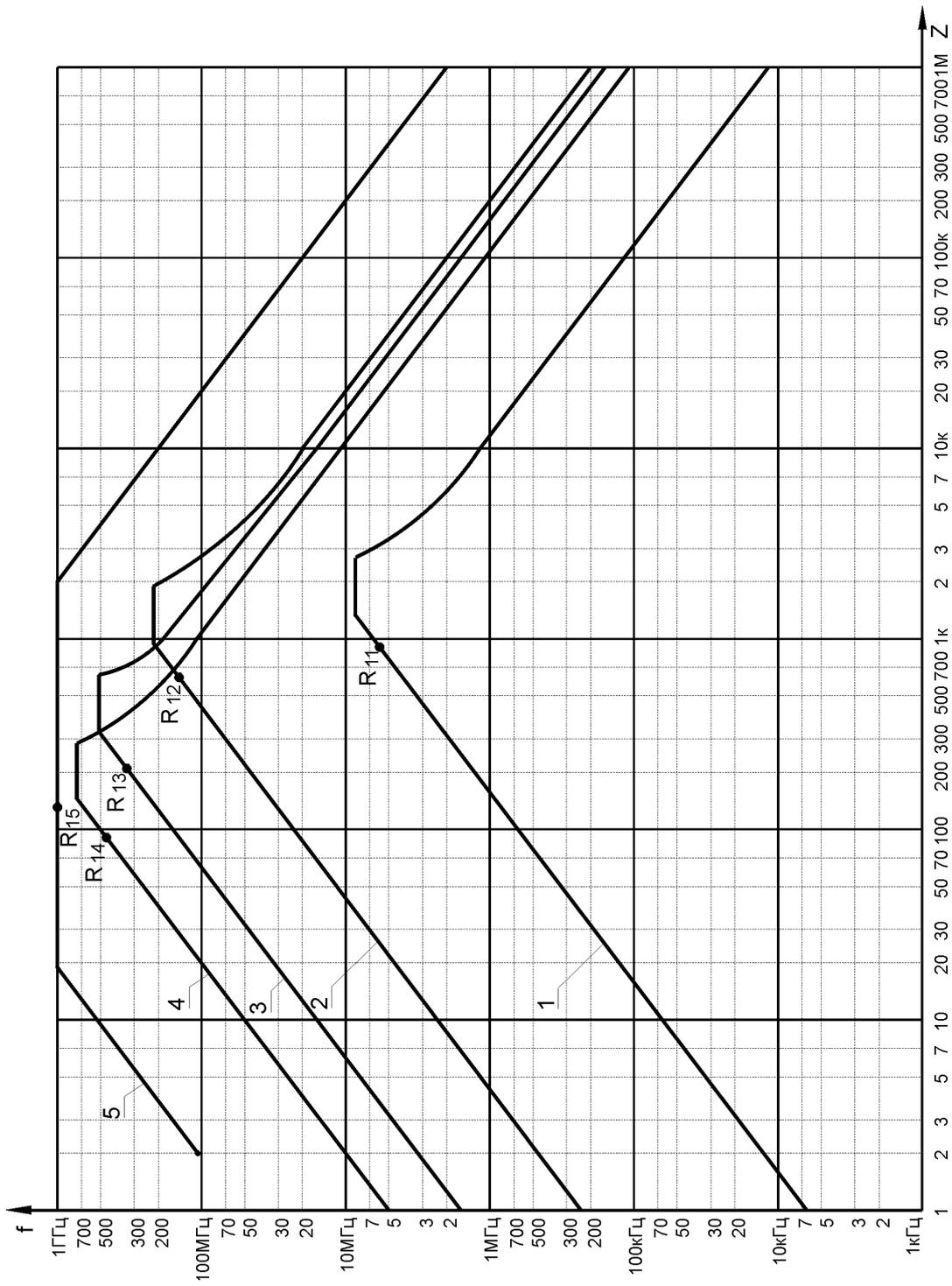


Рис.3. Зависимость граничной рабочей частоты резистора от его типа и номинала при наилучшем сочетании паразитных параметров и выполнении условия  $Z(j\omega) \approx R$  (кривые соответствуют следующим типам резисторов: 1 - проволочным, 2 - металлопленочным и углеродистым, 3 - металлическим объемным, 4 - композиционным, 5 - с поверхностным монтажом; точки  $R_{11}$ ,  $R_{12}$ ,  $R_{13}$ ,  $R_{14}$ ,  $R_{15}$  соответствуют величинам сопротивлений, равным  $0,3R_{\text{крит}}$ ).

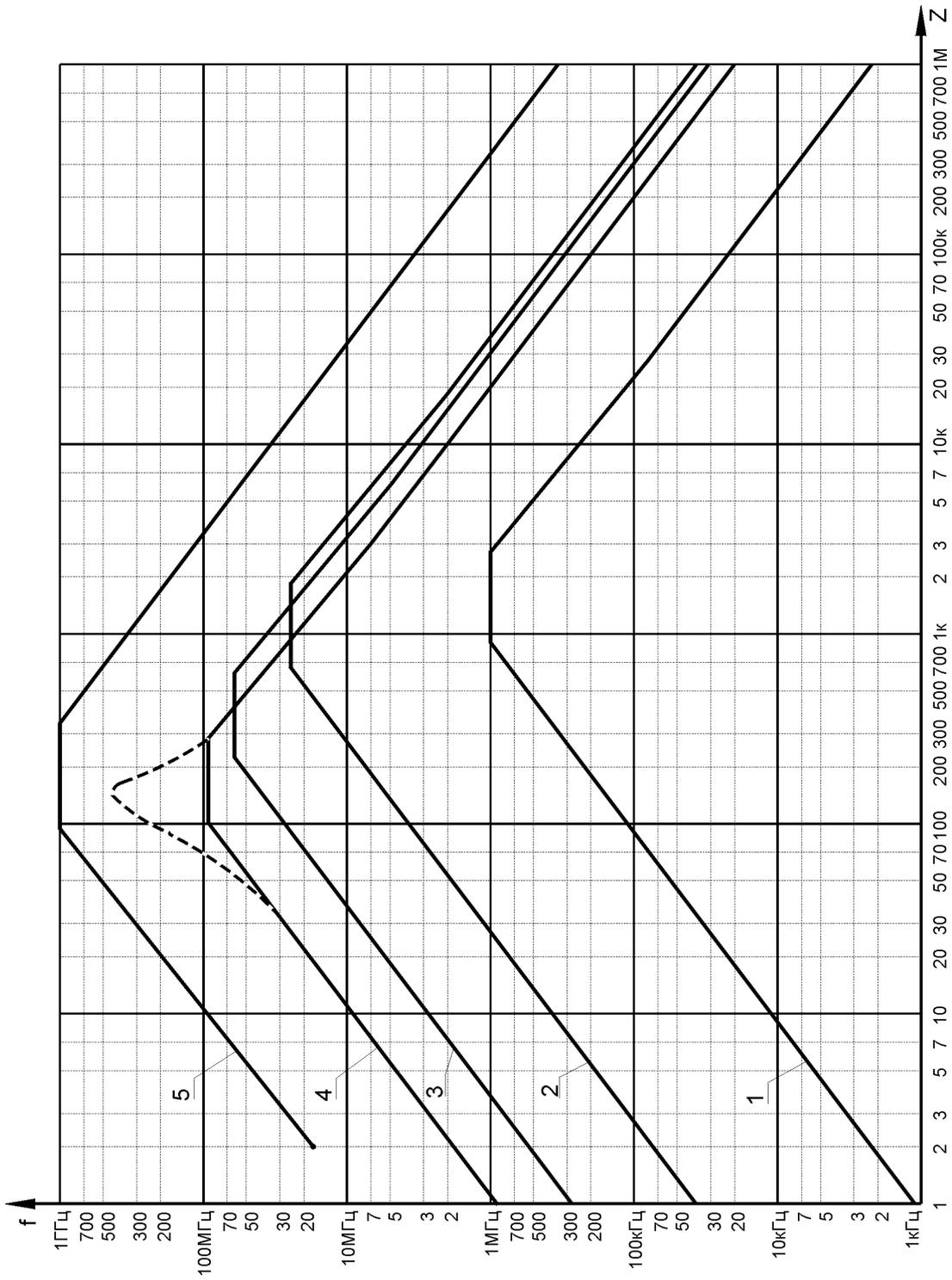


Рис.4. Зависимость граничной рабочей частоты резистора от его типа и номинала при наилучшем сочетании паразитных параметров и выполнении условий  $Z(j\omega) \approx R$ ,  $\varphi(j\omega) \leq \pm 10^\circ$  ( $\varphi(j\omega)$ -угол, определяющий сдвиг по фазе тока относительно напряжения на сопротивлении  $Z(j\omega)$ ); кривые соответствуют следующим типам резисторов: 1 - поверхностным, 2 - проволочным, 3 - металлоочным и углеродистым, 3 - металлическим объемным, 4 - композиционным, 5 - с поверхностным монтажом).

Таблица 1.

Тип резистора	$L_S^*$ , нГн	$C_P^*$ , пФ	$f_0$ , МГц	$R_{\text{крит}}$ , Ом	$R_{\xi} = R_{\text{ФОР}}$ , Ом	$f_3$ , МГц $R=10R_{\text{крит}}$	$f_3$ , МГц $R=100R_{\text{крит}}$
Проволочный	25000	14	8,5	2700	1350	0,42	0,042
Металлопленочный и углеродистый	700	0,8	213	1900	950	10,5	1,05
Металлический объемный	100	1,0	500	630	315	25,5	2,55
Композиционный	30	1,5	750	280	140	38	3,8
С поверхностным монтажом	3	0,08	10300	390	195	520	52

### Заключение

Анализ частотной зависимости сопротивления резистора с использованием стандартных звеньев и логарифмических частотных характеристик позволил:

- выделить характерные области изменения сопротивления в зависимости от частоты; определить выражения для расчета граничной рабочей частоты резистора для каждой из этих областей;
- определить фазовые частотные характеристики комплексного сопротивления резистора;
- для наихудшего сочетания паразитных параметров построить справочные кривые, позволяющие определить граничные частоты использования резисторов различных типов.

Приведенные в работе справочные кривые (рис.3 и 4) предназначены для использования в библиотеках систем автоматизированного проектирования (САПР) при выборе резисторов и моделировании в процессе создания электронной аппаратуры.

### Список литературы

- [1] Дунайцев А.Ф., Леонов А.П., Лукьянцев А.Ф. и др. Об организации интегрированной системы автоматизированного проектирования и производства аппаратуры для проведения исследований в области физики высоких энергий. //Инженерная физика, 2000, №1.
- [2] Гольдфарб Л.С., Балтрушевич А.В., Круг Г.К. и др. Теория автоматического управления / Под редакцией Нетушила А.В. – М.: Высшая школа, 1968.
- [3] OrCAD® PSpice. User's Guide. Copyright © 1998 OrCAD Inc.
- [4] Барнс Дж. Электронное конструирование: методы борьбы с помехами . – М.: Мир, 1990.

*Рукопись поступила 29 марта 2001 г.*

А.П. Леонов  
Моделирование электронных схем: особенности применения резисторов.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы Word.

Редактор Л.Ф. Васильева.

Технический редактор Н.В. Орлова.

---

Подписано к печати 02.04.2001. Формат 60 × 84/8.      Офсетная печать.  
Печ.л. 0,87.      Уч.- изд.л. 0,7.      Тираж 130.      Заказ 69.      Индекс 3649.  
ЛР №020498 от 17.04.97.

---

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий,  
142281, Протвино Московской обл.

