



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2002 – 26  
ОЭА

А.Ф. Дунайцев, А.П. Леонов, Г.Д. Некипелова,  
А.В. Савельев, С.Н. Федотов

**О РАЗВИТИИ ЭЛЕКТРОННЫХ БИБЛИОТЕК  
ДЛЯ НИЗКОВОЛЬТНЫХ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ  
КОНДЕНСАТОРОВ**

Направлено в журнал «Инженерная физика»

Протвино 2002

**Аннотация**

Дунайцев А.Ф., Леонов А.П., Некипелова Г.Д. и др. О развитии электронных библиотек для низковольтных высокочастотных конденсаторов: Препринт ИФВЭ 2002 – 26. – Протвино, 2002. – 9 с., 6 рис., библиогр.: 6.

Исследована зависимость комплексного сопротивления конденсатора от частоты. Определена методика расчета зависимости граничной частоты конденсатора от его емкости и конструктивного исполнения. Даны рекомендации по развитию электронных библиотек, приведены графики, предназначенные для использования в библиотеках САПР.

**Abstract**

Dunaitsev A.F., Leonov A.P., Nekipelova G.D. et al. About Improvement of Electronic Libraries for Radiofrequency Capacitances with Low Operating Voltage: IHEP Preprint 2002 – 26. – Protvino, 2002. – p. 9, figs. 6, refs.: 6.

The dependence of capacitance's complex impedance from frequency was investigated. The method of calculation of capacitance's critical frequency was defined. The recommendations about improvement of electronic libraries and appropriate graphs for libraries of EDA-systems were given.

## Введение

В современном схемотехническом проектировании электронной аппаратуры для научных исследований можно выделить пять уровней [1]:

- разработку принципиальной электрической схемы модуля;
- микропрограммирование;
- моделирование принципиальной схемы;
- коррекцию принципиальной схемы и/или микропрограммы по результатам моделирования;
- уточнение выходных параметров модуля.

При разработке принципиальной схемы и ее моделировании широко используются электронные библиотеки системы автоматизированного проектирования (САПР), содержащие технические, конструктивные и технологические параметры компонентов. В связи с тем, что рабочие частоты  $f$  современных интегральных схем составляют десятки – тысячи МГц, жесткие требования предъявляются к эквивалентности высокочастотных характеристик библиотечных компонентов реальным. В частности, это касается и пассивных компонентов – конденсаторов. Для низковольтных высокочастотных конденсаторов в справочной литературе [2,3,4] указываются зависимость допустимой амплитуды переменной составляющей напряжения от частоты (допустимая реактивная мощность) и ориентировочные диапазоны рабочих частот для различных групп конденсаторов независимо от их номиналов, типов, номинальных напряжений  $U_{ном}$ , групп по температурному коэффициенту емкости (ТКЕ). Как правило, этой информации недостаточно для разработки современной электронной аппаратуры.

Поэтому целью данной работы является исследование зависимости комплексного сопротивления конденсатора от частоты и конструктивного исполнения с последующей разработкой конкретных предложений по развитию электронных библиотек САПР для низковольтных высокочастотных конденсаторов.

### 1. Исследование зависимости комплексного сопротивления низковольтного высокочастотного конденсатора от частоты и конструктивного исполнения

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

$$Z_C(j\omega)=[(1/R_p)+j\omega C]^{-1}+j\omega L_s+R_s], \quad (1)$$

где  $R_p$  – сопротивление утечки (сопротивление изоляции конденсатора) в омах,  $C$  – номинальная емкость в фарадах,  $L_s$  – паразитная последовательная индуктивность конденсатора в генри,  $R_s$  – паразитное последовательное сопротивление конденсатора в омах.

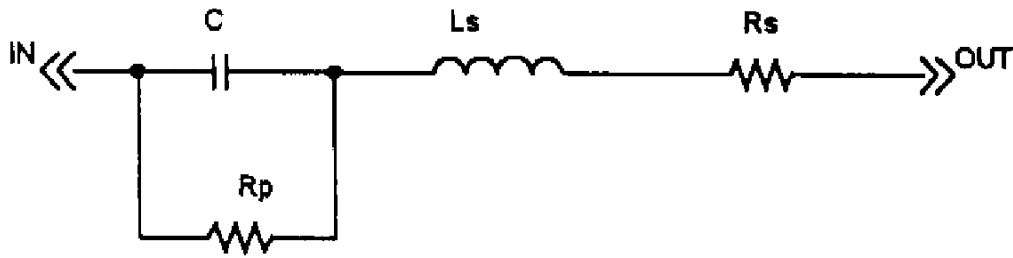


Рис.1. Схема замещения реального конденсатора.

Учитывая, что для реальных конденсаторов выполняется соотношение  $1/R_p \ll j\omega C$ , выражение (1) преобразуем к виду

$$Z_C(j\omega) = (1/j\omega C) + j\omega L_S + R_S. \quad (2)$$

После преобразований получаем

$$Z_C(j\omega) = R_S + j(\omega^2 L_S C - 1)/\omega C. \quad (3)$$

Анализ выражения (3) показывает, что комплексное сопротивление конденсатора имеет наименьшее значение  $Z_C(j\omega) = R_S$  на резонансной частоте

$$\omega_R = 1/\sqrt{L_S C} \quad (4)$$

или

$$f_R = 1/2\pi\sqrt{L_S C}. \quad (5)$$

При  $f > f_R$  комплексное сопротивление конденсатора имеет индуктивный характер (в выражении (3)  $\omega^2 L_S C > 1$ ), вследствие чего использование конденсатора может быть только на частотах ниже резонансной.

Исследуем зависимость  $Z_C(j\omega)$  от величины последовательного сопротивления  $R_S$ . Анализ выражения

$$|Z_C(j\omega)| = \sqrt{R_S^2 \omega^2 C^2 + (\omega^2 L_S C - 1)^2 / \omega C} \quad (6)$$

показывает, что существует некоторое критическое сопротивление

$$R_C = \sqrt{2L_S/C}, \quad (7)$$

при котором наблюдается наиболее быстрый и плавный переход от емкостного характера комплексного сопротивления к индуктивному при  $f = f_R$ .

В качестве иллюстрации рассмотрим логарифмические амплитудно- и фазочастотные характеристики сопротивления (рис. 2а и 2б соответственно) некоторого абстрактного конденсатора емкостью 1000 пФ, при  $L_S = 2$  нГн и различных значениях  $R_S$ , полученные в результате расчетов с использованием пакета Pspice [5]. Анализ показывает, что при  $R_S \leq R_C$  конденсатор следует использовать в интервале частот до

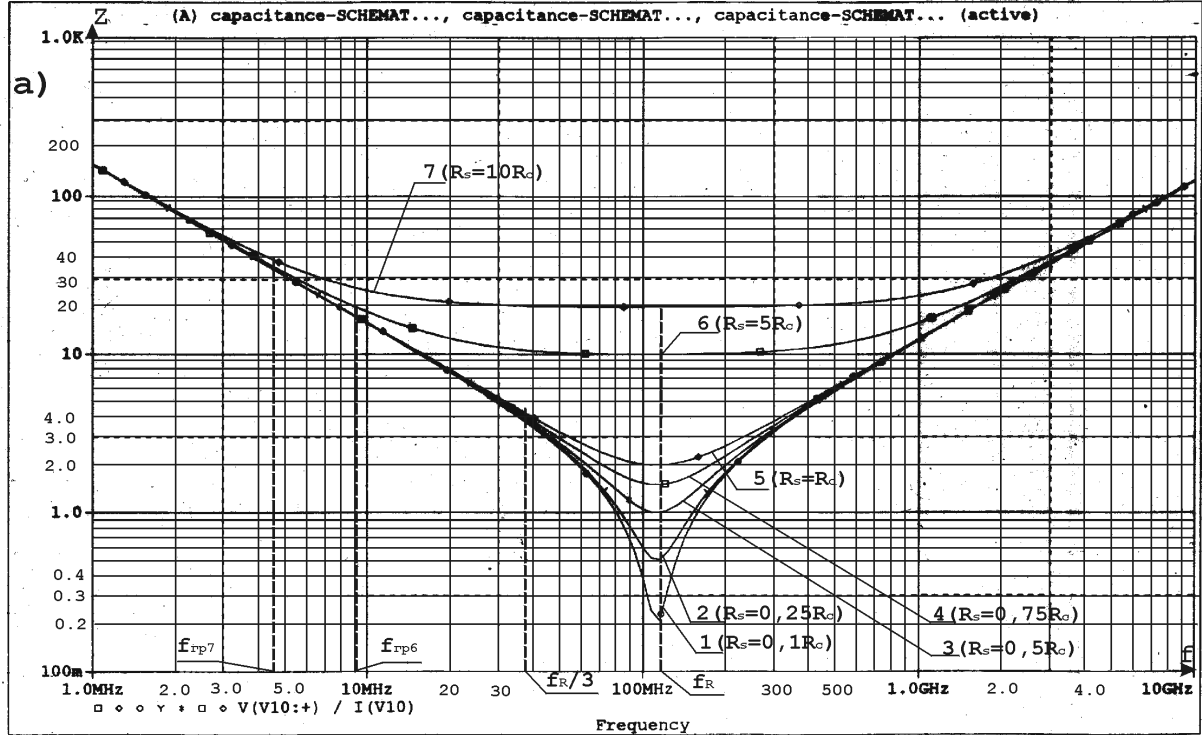
$$f_{ГР} = f_R/3, \quad (8)$$

где  $Z_C(j\omega) = 1/j\omega C$  и отрицательный фазовый сдвиг  $\varphi \geq -60^\circ$  (кривые 1-5 на рис. 2а и 2б). Аналогичные исследования показывают, что при  $R_S > R_C$  граничная рабочая частота конденсатора

$$f_{ГР} \leq (3,5\pi R_S C)^{-1} \quad (9)$$

( $f_{ГР6}$  и  $f_{ГР7}$  для кривых 6 и 7 рис. 2а и 2б).

\*\* circuit file for profile: AC Sweep10-20 , \*\* circuit file for profile: AC Sweep0.2 , \*\* circuit file for p...  
 Date/Time run: 05/07/02 11:33:38 Temperature: 27.0



\*\* circuit file for profile: AC Sweep10-20 , \*\* circuit file for profile: AC Sweep0.2 , \*\* circuit file for p...  
 Date/Time run: 05/07/02 11:33:38 Temperature: 27.0

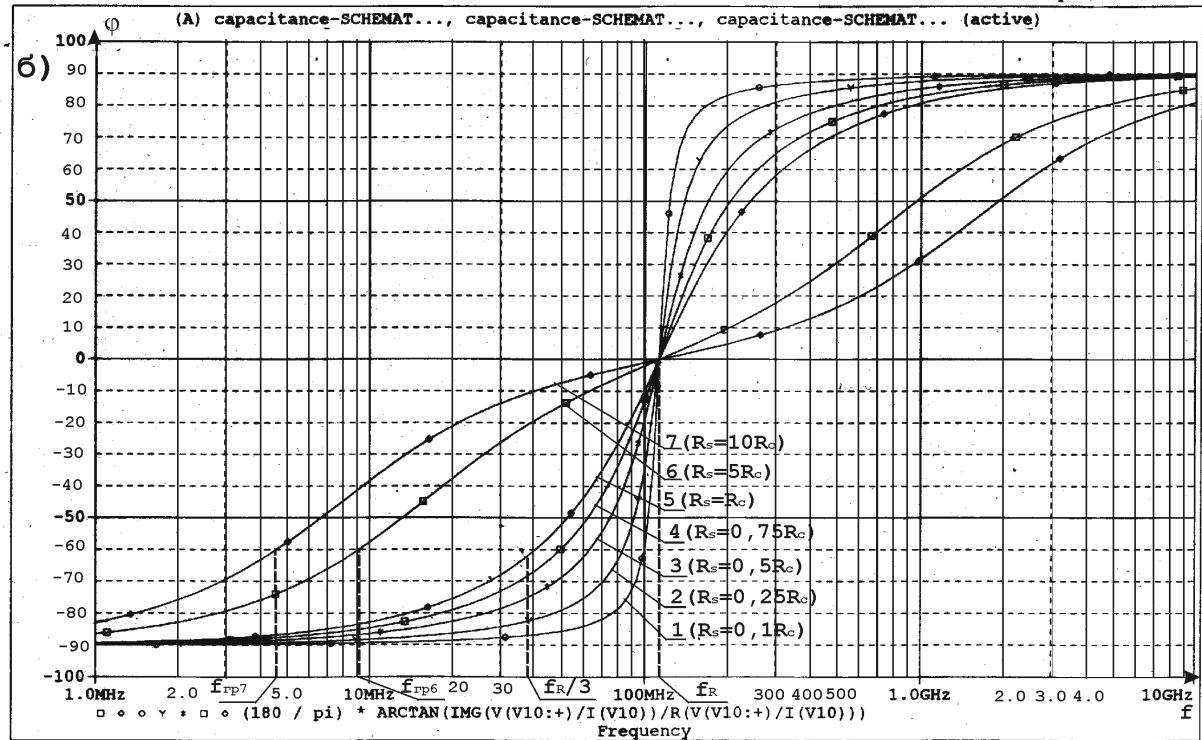


Рис. 2. Амплитудно-частотные  $Z=F(f)$  и фазочастотные  $\phi=F(f)$  характеристики комплексного сопротивления конденсатора с номинальной емкостью  $C=1000$  пФ,  $L_S=2$  нГн и различными значениями  $R_S$ .

При выполнении расчетов по формуле (9), как и при расчетах по формуле (8), обеспечивается выполнение условия  $\varphi \geq |-60^\circ|$ . Поэтому, по мнению авторов, ее использование является более предпочтительным по сравнению с приводимой в литературе [4] формулой  $f < (2\pi R_S C)^{-1}$ .

Анализ кривых на рис. 2а и 2б показывает, что чем больше  $R_S$ , тем меньше граничная частота  $f_{ГР}$ . Поэтому в дальнейшем при расчетах будем использовать наибольшее справочное значение  $R_S$ .

В рассматриваемом примере исследована зависимость комплексного сопротивления абстрактного конденсатора от величины  $R_S$  при постоянных значениях  $C$  и  $L_S$ , определены выражения для расчета граничной рабочей частоты конденсатора в зависимости от соотношения между  $R_S$  и  $R_C$ . В реальных библиотеках для каждой группы по ТКЕ определенного типа конденсатора с заданным номинальным напряжением приведены пределы изменения номинальных емкостей. Величины их комплексного сопротивления, а следовательно и значения граничных рабочих частот зависят от величин номинальной емкости  $C$ ,  $L_S$  и  $R_S$ . Исследуем эту ситуацию на примере керамических конденсаторов для поверхностного монтажа (КПМ) фирмы SAM-SUNG с типом корпусов 1206, номинальными напряжениями 50 В и группами по ТКЕ: COG ( $0,5 \text{ пФ} \leq C \leq 4700 \text{ пФ}$ , **рис. 3**) и X7R ( $1000 \text{ пФ} \leq C \leq 470000 \text{ пФ}$ , **рис. 4**) [6].

Для конденсаторов группы COG выполняется условие  $R_S \ll R_C$  во всем диапазоне номинальных емкостей, и граничные частоты конденсаторов могут быть определены из выражения (8) ( $f_{ГР1}$ ,  $f_{ГР2}$ ,  $f_{ГР3}$  на рис. 3). При использовании данных конденсаторов на частотах  $f < f_{ГР}$  их сопротивление определяется в соответствии с выражением  $Z_C(j\omega) = 1/j\omega C$  (изменение сопротивления происходит на линейном участке логарифмической амплитудно-частотной характеристики, и угол сдвига по фазе напряжения на конденсаторе относительно тока  $\varphi > |-80^\circ|$ ).

Таким образом, в этом случае реальный конденсатор соответствует идеальному, что позволяет обеспечить адекватность результатов моделирования реальным параметрам схемы.

Аналогично для конденсаторов группы X7R в диапазоне номинальных емкостей от 0,001 до 0,01 мкФ выполняется соотношение  $R_S \leq R_C$ , и граничные частоты конденсаторов определяются выражением (8) ( $f_{ГР1}$  и  $f_{ГР2}$  на рис. 4). При определении граничных частот конденсаторов с емкостями  $C > 0,01 \text{ мкФ}$ , для которых  $R_S > R_C$ , следует пользоваться выражением (9) ( $f_{ГР3}$  на рис. 4).

Для имеющих выводы конденсаторов (не предназначенных для поверхностного монтажа) следует учитывать, что величина паразитной индуктивности  $L_S$  является суммой величин собственной индуктивности конденсатора и индуктивности выводов. Противоположно направленные или параллельные выводы конденсатора можно рассматривать как отрезок проводника длиной  $S = S_1 + S_2$ , где  $S_1$  и  $S_2$  – длины первого и второго выводов соответственно. На высоких частотах индуктивность  $L$  проводника круглого сечения диаметром  $D$  и длиной  $S$  определяется выражением [4]

$$L \approx (\mu_v S / 2\pi) [\ln(4S/D) + \mu_r \delta / D - 1 + 0,5D/S] \text{ [Гн]}, \quad (10)$$

где  $\mu_v$  – магнитная проницаемость вакуума ( $\approx 1,257 \times 10^{-6}$  Гн/м),  $\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость ( $\approx 1$  для немагнитных проводников),  $\delta = [\rho / (\pi \mu_v \mu_r f)]^{1/2}$  – толщина скин-слоя, определяющего эффективное поперечное сечение проводника,  $\rho$  – удельное сопротивление проводника [Ом · м]. Для медного проводника при  $S = 6 \text{ мм}$  (полагаем  $S_1 = S_2 = 3 \text{ мм}$ ) и  $D = 0,5 \text{ мм}$  величина  $L \approx 3,5 \text{ нГн}$ , при  $S = 10 \text{ мм}$  и том же диаметре  $L \approx 6,8 \text{ нГн}$ . Таким образом, индуктивность выводов может значительно превосходить собственную индуктивность конденсатора [2,3,4] и граничная частота конденсатора должна определяться для фиксированной длины выводов.

\*\* circuit file for profile: AC Sweep100E-12 , \*\* circuit file for profile: AC Sweep1000p , \*\* circuit file f...  
 Date/Time run: 05/07/02 10:55:47 Temperature: 27.0

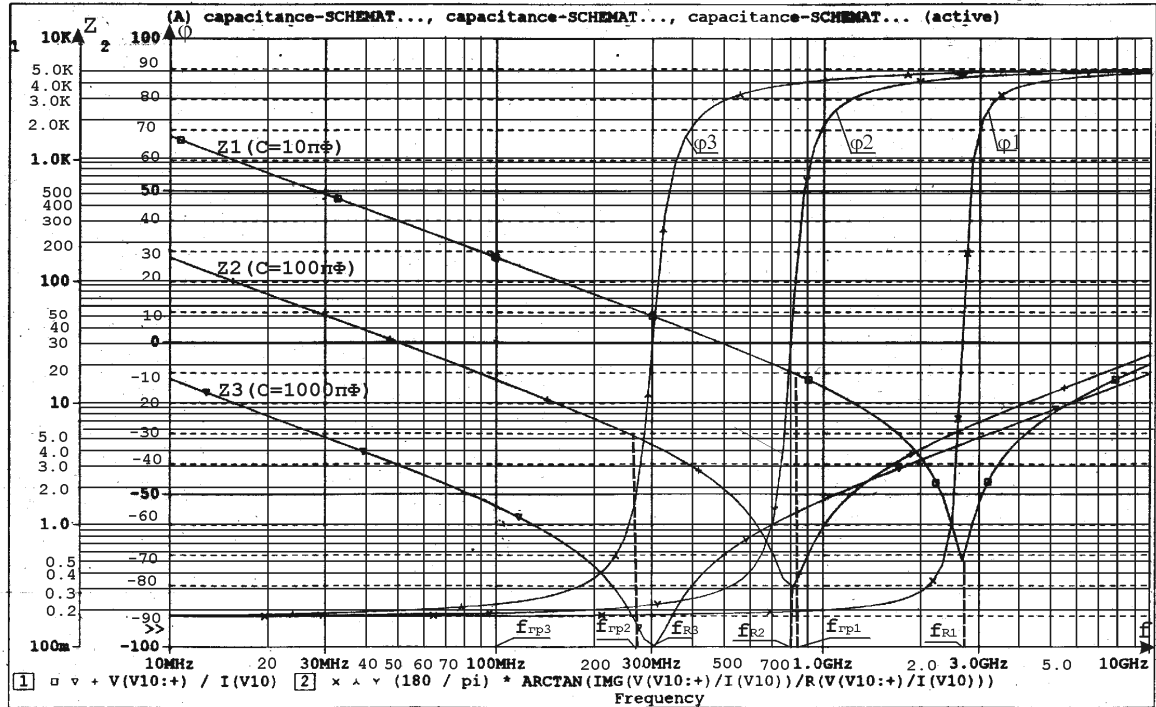


Рис. 3. Амплитудно-частотные  $Z=F(f)$  и фазочастотные  $\phi=F(f)$  характеристики комплексных сопротивлений многослойных керамических конденсаторов фирмы SAMSUNG (тип корпусов 1206, группа по ТКЕ – COG, номинальное напряжение – 50 В).

\*\* circuit file for profile: AC Sweep0.001E-6 , \*\* circuit file for profile: AC Sweep0.01 , \*\* circuit file f...  
 Date/Time run: 05/07/02 09:45:51 Temperature: 27.0

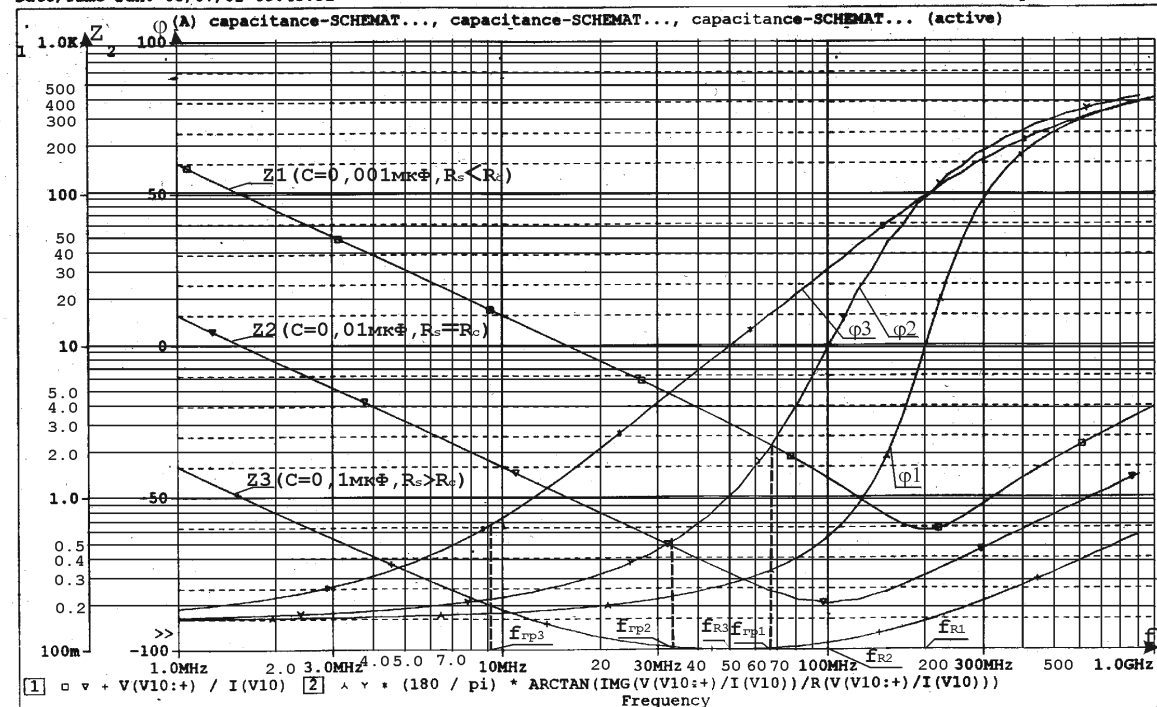


Рис. 4. Амплитудно-частотные  $Z=F(f)$  и фазочастотные  $\phi=F(f)$  характеристики комплексных сопротивлений многослойных керамических конденсаторов фирмы SAMSUNG (тип корпусов 1206, группа по ТКЕ – X7R, номинальное напряжение – 50 В).

Итак, граничная рабочая частота конденсатора заданной емкости  $C$  может быть определена в следующей последовательности:

- находится наибольшее справочное значение паразитной индуктивности  $L_S$  для данной конструкции конденсатора, для конденсаторов с выводами величина  $L_S$  определяется для фиксированной длины выводов;
- по формуле (5) рассчитывается значение резонансной частоты  $f_R$ ;
- по формуле (7) определяется величина критического сопротивления  $R_C$ ;
- находится наибольшее справочное значение  $R_S$  для данной конструкции конденсатора;
- если  $R_S \leq R_C$ , то  $f_{ГР}$  определяется по формуле (8), иначе – по формуле (9).

Предлагаемая методика является примером расчета  $f_{ГР}$  при наихудшем сочетании параметров. В отличие от классического расчета на худший случай [4], в предлагаемой методике не учитываются производственные допуски и предельно допустимые отклонения от номинальных значений емкости. Это сделано умышленно, так как для одной и той же группы по ТКЕ в зависимости от величины емкости могут использоваться различные классы точности [6]. Поэтому разработчик должен учитывать этот факт при расчете, полагая  $C = C_{НОМ} + \Delta C$ , где  $\Delta C$  – производственный допуск на номинальное значение емкости  $C_{НОМ}$ .

## **2. Построение графиков зависимости граничной рабочей частоты от емкости низковольтных высокочастотных конденсаторов**

Полагая, что верхняя граница диапазона рабочих частот конденсатора должна превышать 50 МГц, для электронной библиотеки САПР ГНЦ ИФВЭ выделим следующие группы высокочастотных конденсаторов [2,3,6]:

1. Керамические:
  - многослойные монолитные типов КМ, К10-17, К10-42, К10-47, К10-50 и другие (группы по ТКЕ: Н30, Н50, Н90, П33, МП0, М47, М75, М750, М1500;  $U_{НОМ}$ : 25 В, 35 В, 40 В, 50 В, 7 В, 100 В, 160 В, 250 В);
  - многослойные для поверхностного монтажа фирмы SAMSUNG и других зарубежных фирм (группы по ТКЕ: COG, X5R, X7R, X8R, Y5V;  $U_{НОМ}$ : 6,3 В, 10 В, 16 В, 25 В, 50 В, 100 В);
  - дисковые типов КД, КДУ, К10У-5, К10-18, К10-19, К10-29 и другие (группы по ТКЕ: П100, П33, Н20, Н30, Н70, Н90, М47, М75, М750, М1500;  $U_{НОМ}$ : 10 В, 25 В, 32 В, 50 В, 63 В, 80 В, 100 В, 160 В, 250 В, 500 В);
  - трубчатые типов КТ, КТИ, К10-38 и другие (группы по ТКЕ: П100, П33, Н70, Н90, М47, М75, М750, М1500;  $U_{НОМ}$ : 160 В, 250 В, 300 В, 315 В, 325 В, 500 В, 700 В).
2. Стеклокерамические и стеклянные типов СКМ, КС, К22У-1, К21-5 и другие (группы по ТКЕ: Н30, П33, П60, МП0, М47, М150, М330, М470;  $U_{НОМ}$ : 35 В, 70 В, 100 В, 125 В, 160 В, 250 В, 300 В, 500 В).
3. Слюдяные типов КСГ, КСО, СГМ, ССГ, СГО, К31 и другие (группы по ТКЕ: А, Б, В, Г;  $U_{НОМ}$ : 100 В, 250 В, 350 В, 500 В).
4. Конденсаторы подстроечные керамические типов КТ4-21, КТ4-23, КТ4-24 и другие (группы по ТКЕ: П100, МП0, М75, М150, М470, М750, М1500;  $U_{НОМ}$ : 16 В, 25 В, 50 В, 80 В, 100 В, 150 В, 160 В, 200 В, 250 В, 300 В, 350 В, 500 В).
5. Конденсаторные сборки типа Б18 (группа керамических конденсаторов) на номинальные напряжения: 15 и 25 В.



В целях совершенствования электронных библиотек САПР для данных типов конденсаторов целесообразным представляется построение и включение в библиотеки кривых зависимости граничных рабочих частот конденсаторов от их номинальных емкостей.

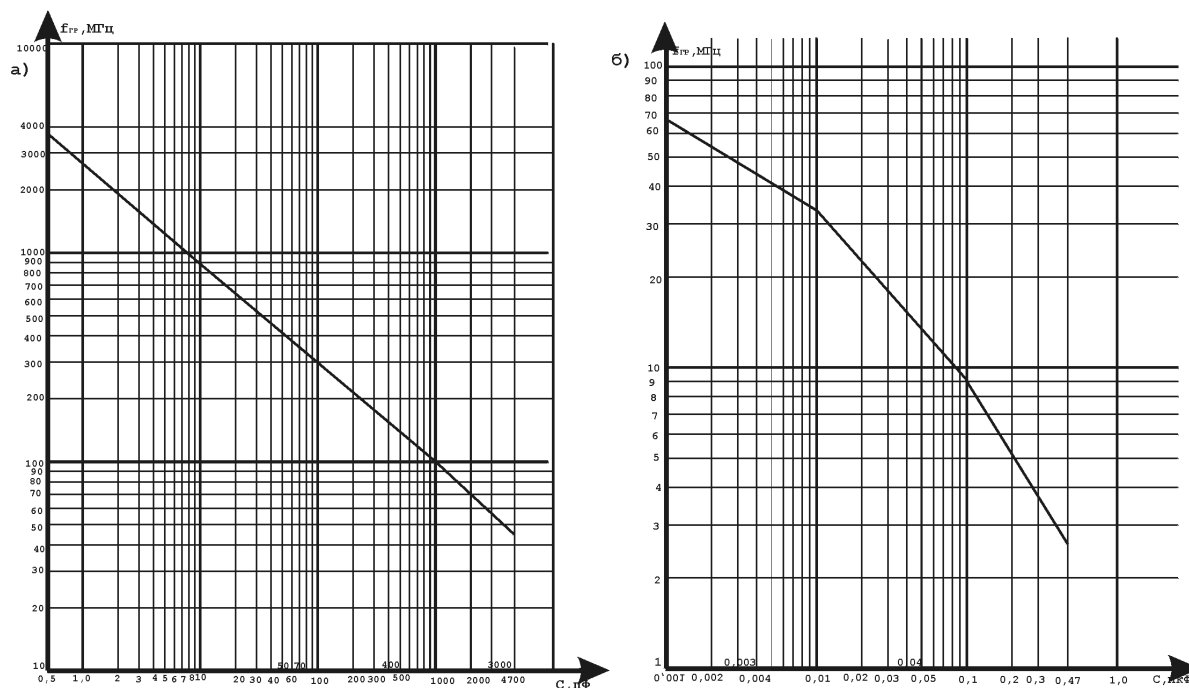
Определим методику построения таких кривых.

1. В соответствии с техническими требованиями выбираем группу конденсаторов (например, керамические), тип (например, SAMSUNG Multilayer Ceramic Chip Capacitors), тип корпуса (например, 1206), группу по ТКЕ (например, COG), номинальное напряжение (например, 50 В). Проведенный выбор позволяет определить диапазон номинальных емкостей  $C_{\min} \leq C \leq C_{\max}$ , для которых будет строиться искомая зависимость (для нашего примера  $0,5 \text{ пФ} \leq C \leq 4700 \text{ пФ}$ ). Выбираем наименьшее значение  $C_{\min}$  емкости, записываем в счетчик циклов  $K$  число 0 и переходим к пункту 2.
2. Для текущего значения емкости  $C_k$  ( $k$  – число, содержащееся в счетчике циклов  $K$ ) находим наибольшие справочные значения  $R_{Sk}$  и  $L_{Sk}$  (для конденсаторов с выводами с учетом их длины).
3. По формуле (5) определяем величину резонансной частоты  $f_{Rk}$ .
4. По формуле (7) рассчитываем величину  $R_C$  и сравниваем ее с величиной  $R_{Sk}$ . Если  $R_{Sk} \leq R_C$ , то  $f_{ГР}$  определяется по формуле (8), если  $R_{Sk} > R_C$ , то по формуле (9).
5. Если значения  $f_{ГР(k-1)}$  для  $C_{k-1}$  и  $f_{ГРk}$  для  $C_k$  (рассчитанные в предыдущем  $k-1$  и текущем  $k$  циклах) не определяются по одной и той же формуле (8) или (9), то переходим к п.8, если определяются, то для всех  $C_{k-1} \leq C \leq C_k$  расчет граничной частоты производим по этой же формуле (8) или (9). При построении графика функции  $f_{ГР}=F(C)$  значения  $f_{ГР}$  по оси  $Y$  и  $C$  по оси  $X$  изменяются в логарифмическом масштабе и точки с координатами  $(C_{k-1}, f_{ГР(k-1)})$  и  $(C_k, f_{ГРk})$  соединяем отрезком прямой линии.
6. Если  $C_k = C_{\max}$ , то расчет заканчивается. Если  $C_k < C_{\max}$ , то увеличиваем на 1 содержимое счетчика циклов  $K$  и определяем новое значение емкости  $C_{k+1} = 10 \times C_k$  (если  $C_{k+1} \geq C_{\max}$ , то выбираем  $C = C_{\max}$ ).
7. Для емкости  $C_{k+1}$  выполняем операции, предусмотренные в пунктах 2-5.
8. Увеличиваем на 1 содержимое счетчика циклов  $K$ , определяем новое значение емкости  $C_{k+1} = C_k / 2$  и переходим к п.2.

На **рис. 5** приведены построенные по предлагаемой методике графики зависимости  $f_{ГР}=F(C)$  для керамических конденсаторов фирмы SAMSUNG групп по ТКЕ: COG (рис. 5а) и X7R (рис. 5б) на номинальное напряжение 50 В.

Поскольку для конденсаторов группы COG при  $U_{НОМ}=50$  В во всем диапазоне емкостей (0,5 – 4700 пФ) соблюдается условие  $R_S < R_C$ , граничная рабочая частота определяется выражением (8) и график зависимости  $f_{ГР}=F(C)$  при логарифмическом масштабе по осям  $C$  и  $f_{ГР}$  практически является отрезком прямой линии.

Для конденсаторов группы X7R для емкостей от 0,001 до 0,01 мкФ (рис. 4) соблюдается условие  $R_S \leq R_C$ , а для емкостей  $0,01 \text{ мкФ} < C \leq 0,47 \text{ мкФ}$  выполняется условие  $R_S > R_C$ . Поэтому график на рис. 5б имеет явно выраженный излом в точке с координатами:  $C = 0,01 \text{ мкФ}$ ;  $f_{ГР} \approx 33,3 \text{ МГц}$ .



**Рис. 5.** Зависимость граничной рабочей частоты  $f_{гр}$  от величины емкости  $C$  для многослойных керамических конденсаторов фирмы SAMSUNG. Тип корпусов 1206, номинальное напряжение – 50 В, группа по ТКЕ – COG (а) и X7R (б).

Графики на **рис. 6** иллюстрируют зависимость граничной рабочей частоты конденсатора от длины его выводов. Заметим, что для всего диапазона емкостей (1 пФ – 39 пФ) данного типа конденсаторов соблюдается условие  $R_S < R_C$ .

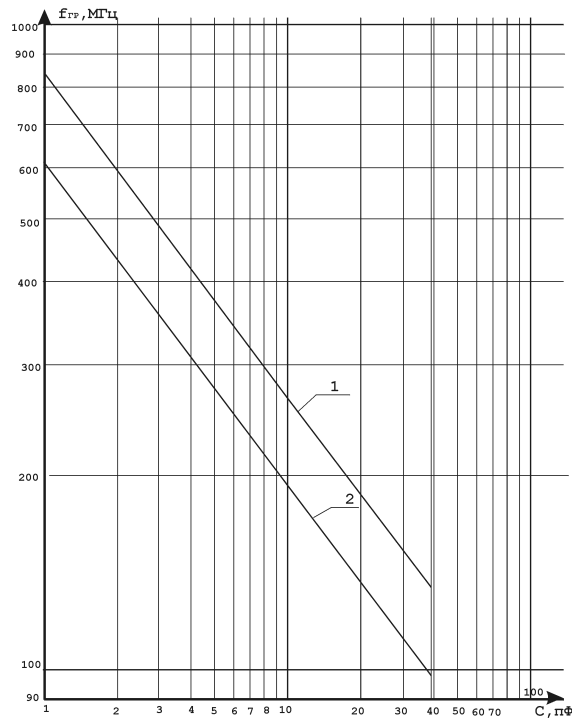
При моделировании принципиальной схемы графики зависимости  $f_{гр}=F(C)$  используются следующим образом:

- в электронной библиотеке для выбранного типа конденсатора на оси абсцисс определяется точка, соответствующая заданной величине емкости  $C$ ;
- для этой точки по графику  $f_{гр}=F(C)$  определяется соответствующая данной  $C$  величина  $f_{гр}$ ;
- если значение наибольшей рабочей частоты не больше  $f_{гр}$ , то при моделировании можно использовать идеальную модель конденсатора ( $Z=1/j\omega C$ );
- если значение наибольшей рабочей частоты больше  $f_{гр}$ , то необходимо выбрать другой тип конденсатора с большей  $f_{гр}$ .

### Заключение

Проведенные в данной работе исследования с использованием амплитудно- и фазочастотных характеристик показывают необходимость развития электронных библиотек САПР для низковольтных высокочастотных конденсаторов, которое заключается в построении и включении в библиотеки графиков зависимости  $f_{гр}=F(C)$  для всех типов конденсаторов, определенных в разделе 2. Использование указанных графиков в процессе моделирования принципиальных схем позволит адекватно оценить поведение конденсаторов в реальной схеме.

Работа поддерживается РФФИ, проект № 02-07-90474.



**Рис. 6.** Зависимость граничной рабочей частоты  $f_{гр}$  от величины емкости  $C$  для керамических дисковых конденсаторов КД-1 (группа по ТКЕ – М75, номинальное напряжение – 80 В, график 1 – для длины выводов 6 мм, 2 – для длины выводов 10 мм).

### 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, №1, 2000.
- [2] Четвертков И.И., Дьяконов М.Н., Присняков В.И. и др. Конденсаторы: справочник. / Под ред. Четверткова И.И., Дьяконова М. Н. – М.: Радио и связь, 1993.
- [3] Горячева Г.А., Добромислов Е.Р. Конденсаторы: справочник. – М.: Радио и связь, 1984.
- [4] Барнс Дж. Электронное конструирование: методы борьбы с помехами. – М.: Мир, 1990.
- [5] OrCAD® PSpice. User's Guide. Copyright© 1998 OrCAD Inc.
- [6] Multilayer ceramic capacitors. – www.SEM.samsung.com.

*Рукопись поступила 8 июля 2002 года*

А.Ф. Дунайцев, А.П. Леонов, Л.Д. Некипелова и др.  
О развитии электронных библиотек для низковольтных высокочастотных конденсаторов.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы WORD.  
Редактор Л.Ф. Васильева. Технический редактор Н.В. Орлова.

---

Подписано к печати 01.08.2002. Формат 60 x 84/8. Офсетная печать.  
Печ.л. 1,12. Уч.-изд.л. 0,9. Тираж 130. Заказ 123. Индекс 3649.  
ЛР №020498 17.04.1997.

---

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий  
142284, Протвино Московской обл.

