

УДК 621.396

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНДУКТИВНО-ЕМКОСТНЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ

К. А. БОЧКОВ*Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель***Д. В. КОМНАТНЫЙ***Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Введение

При разработке и эксплуатации современных микроэлектронных и микропроцессорных систем управления ответственными технологическими процессами энергетики, транспорта и промышленности возникает проблема защиты аппаратуры указанных систем от электромагнитных помех. Такие широко распространенные виды электромагнитных помех, как электростатический разряд (ЭСР) и наносекундные импульсные помехи, обладают малой длительностью до десятков наносекунд и достаточно большими амплитудами около киловольт. Энергия импульсов помех оказывается достаточной для того, чтобы вызвать тепловой пробой полупроводниковых структур или пробой диэлектрических областей современной элементной базы [1], [2]. Последствия этих явлений для функционирования систем управления оказываются сравнимыми с последствиями структурных отказов и сбоев. В современных условиях существует возможность преднамеренного создания кондуктивных помех наносекундной длительности, а следовательно, с очень широкой полосой частот спектра и высокой амплитуды около киловольт. Эти импульсы могут использоваться с целью нарушения работы систем управления ответственными технологическими процессами, вплоть до создания аварийных ситуаций [3]. Поэтому возникает крайне востребованная на практике задача проектирования защитных схем для исключения опасного влияния сверхширокополосных электромагнитных помех на микроэлектронное и микропроцессорное оборудование.

Постановка задачи

Для борьбы с электромагнитными помехами широкое применение находят индуктивно-емкостные фильтры. Тем не менее в существующих руководствах по электромагнитной совместимости ряд вопросов проектирования фильтров электромагнитных помех отражен недостаточно. Так, в [4], [5] приведены соотношения для расчета затухания фильтров, но не описаны методики их синтеза. В [6] приводятся только рекомендации по выбору конструктивных решений при разработке схем фильтра, но не рассмотрены вопросы синтеза фильтров. В [7] даны выражения для передаточных функций фильтров, но вопросы синтеза также не раскрыты. Кроме того, выражения передаточных функций приведены в неясной форме записи.

В [8] рассмотрена методика синтеза фильтров помех методами аппроксимации по Баттерворту, Чебышеву, Бесселю. Но в этой работе не отражены особенности ра-

боты таких фильтров при воздействии на них импульсных электромагнитных помех. В этом случае на фильтр действует импульс напряжения с очень широкой полосой спектра (до 3 ГГц в случае ЭСР [2]). Следовательно, согласование сопротивлений фильтра и нагрузки оказывается принципиально невозможным. Результатом фильтрации помехи должно быть снижение ее энергии до уровня, безопасного для элементной базы. Рассчитывать затухание, вносимое фильтром, в данном случае малоинформативно. Также не представляет практического интереса, какие изменения претерпевает форма импульса при прохождении через фильтр. Кроме того, в [8] недостаточно подробно изложены методы расчета элементов фильтра, особенно при неравных сопротивлениях на стороне нагрузки и генератора, что может вызвать затруднения при практических расчетах фильтров.

Поэтому в настоящей работе ставится задача апробации метода синтеза индуктивно-емкостных фильтров, предназначенных для подавления широкополосных импульсных помех, с учетом указанных особенностей.

Основная часть

Предполагается, что индуктивно-емкостной фильтр нагружен по входу и выходу на конечные неравные омические сопротивления. Так как фильтры типа Баттерворта обладают максимально плоской характеристикой в полосе пропускания, то в статье рассматривается синтез фильтра путем аппроксимации его амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) полиномами Баттерворта [7]–[9]. Для подавления широкополосной импульсной помехи, спектр которой располагается в полосе частот от 0 до единиц гигагерц, целесообразным является применение фильтра нижних частот, схема которого показана на рис. 1. Взаимное расположение амплитудных спектров полезного сигнала, помехи и полосы пропускания/непропускания фильтра нижних частот показано на рис. 2.

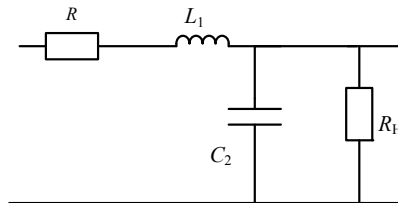


Рис. 1. Схема фильтра нижних частот

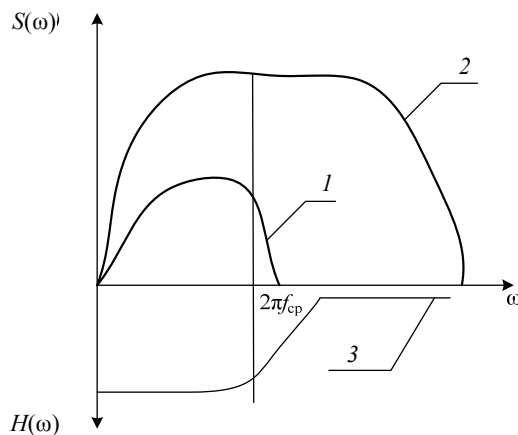


Рис. 2. Взаимное расположение спектров сигнала и помехи в полосе пропускания/непропускания фильтра нижних частот:
1 – спектр полезного сигнала; 2 – спектр помехи;
3 – полоса пропускания/непропускания фильтра

Из рис. 2 следует, что частотные фильтры эффективно используются в том случае, если спектр полезного сигнала является узкополосным и расположен в диапазоне достаточно низких частот. При этом большая часть энергии помехи приходится на полосу непропускания фильтра и подавляется им. На практике этот случай чаще всего реализуется при использовании информационных сигналов тональных частот.

В этом случае основным параметром фильтра является частота среза. Для ее определения в [10] предложено интегральное уравнение вида

$$W(\omega_{cp}) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\tau} \int_0^{\tau} \frac{\sin \omega_{cp}(t-s)}{t-s} U(t)U(s) dt ds, \quad (1)$$

где W – энергия импульса, содержащаяся в спектре до частоты среза, Дж; τ – длительность импульса, с; ω_{cp} – частота среза, рад/с; t – время, с; s – вспомогательная переменная; $U(t)$ – зависимость напряжения импульса от времени.

Но решение интегральных уравнений является сложной математической задачей, не имеющей результатов в замкнутой форме [10], [11]. Поэтому на практике частоту среза определяют с помощью различных инженерных правил [8].

В [12] приведена методика синтеза фильтров Баттерворта, в которой четко указан способ учета неравенства сопротивлений, включенных на входе и выходе фильтра. Кроме того, изложение этой методики отличается ясностью и не вызывает затруднений при расчетах. Поэтому она применяется в данной статье. Смысл ее заключается в следующем. Вычисляются коэффициенты аппроксимации АЧХ по формулам:

$$a_v = 2 \sin \frac{2v-1}{n} \frac{\pi}{2}; \quad b_v = \frac{1}{b_{v-1}} \left(b_0^2 - b^2 \sin^2 \frac{v-1}{n} \frac{\pi}{2} \right). \quad (2)$$

В формулах (2) приняты обозначения:

$$a_H = n \sqrt{\frac{1-r}{1+r}}; \quad r = \frac{R}{R_H} \quad \text{при } R \leq R_H; \quad r = \frac{R_H}{R} \quad \text{при } R > R_H;$$

$$b_0 = 1 + a_H; \quad b^2 = 4a_H,$$

где n – порядок фильтра; R – сопротивление генератора, Ом; R_H – сопротивление нагрузки, Ом.

Значения нормированных емкостей и индуктивностей схемы фильтра определяются по формуле

$$g_v = \frac{a_v}{b_v}, \quad (3)$$

где v – номер элемента, отсчитываемый от входа фильтра.

Величины параметров реальных элементов определяются по формулам [13]:

$$L_v = \frac{g_v R_H}{2\pi f_{cp}}; \quad C_v = \frac{g_v}{2\pi f_{cp} R_H}, \quad (4)$$

где L_v – индуктивность, Гн; C_v – емкость, Ф; f_{cp} – частота среза, Гц.

Вычислительный эксперимент

Так как распределение энергии помех в частотном диапазоне характеризуется амплитудным спектром, то для проверки работы синтезированного фильтра требуется рассчитать амплитудный спектр помехи на выходе фильтра. Известно [14], что для любой электрической цепи амплитудные спектры сигналов на входе и выходе связаны АЧХ коэффициента передачи напряжения схемы:

$$S_{\text{вых}}(\omega) = H(\omega)S_{\text{вх}}(\omega). \quad (5)$$

Для расчета АЧХ коэффициента передачи напряжения фильтра нижних частот вначале определяется по известному соотношению комплексный коэффициент передачи напряжения [15]:

$$\underline{H}_U(j\omega) = \frac{1}{\underline{A}_{11} + \frac{\underline{A}_{12}}{\underline{Z}_H}}, \quad (6)$$

где \underline{A}_{11} , \underline{A}_{12} – А-параметры четырехполюсника, образованного фильтром с отключенной нагрузкой; \underline{Z}_H – сопротивление нагрузки, Ом.

В частном случае схемы на рис. 1 по [15] имеем:

$$\underline{A}_{11} = 1 + \frac{R + j\omega L}{\frac{1}{j\omega C}}; \quad \underline{A}_{12} = R + j\omega L. \quad (7)$$

Сопротивление нагрузки является чисто омическим R_H . Проводимость нагрузки, соответственно, $G_H = \frac{1}{R_H}$, См. Тогда после подстановки (7) в (6) и выделения модуля комплексного выражения (6) получается АЧХ коэффициента передачи напряжения в виде

$$H(\omega) = \frac{1}{\sqrt{(1 - \omega^2 LC + RG_H)^2 + (\omega RC + \omega LG_H)^2}}. \quad (8)$$

Для конкретности в работе осуществлен синтез фильтра при $R = 100$ Ом, $R_H = 900$ Ом при частоте среза $\omega_{\text{ср}} = 2\pi \cdot 3000$ рад/с. На вход фильтра поступает биэкспоненциальный импульс

$$u(t) = U(e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t}),$$

где U – амплитуда импульса, В; α_1 , α_2 – коэффициенты наклона экспонент, 1/с.

Таким импульсом может быть аппроксимирована форма значительного числа разновидностей сверхширокополосных импульсных помех. Амплитудно-частотный спектр этого импульса дается выражением [7] и показан на рис. 3:

$$S(\omega) = \frac{U(\alpha_2 - \alpha_1)}{\sqrt{(\alpha_1 \alpha_2 - \omega^2)^2 + \omega^2(\alpha_2 + \alpha_1)^2}}. \quad (9)$$

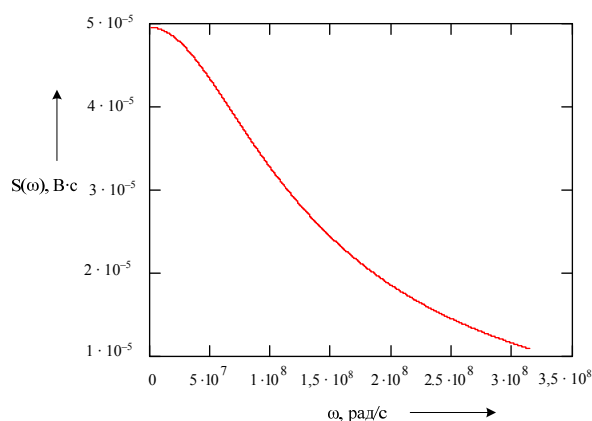


Рис. 3. Амплитудный спектр помехи в виде биэкспоненциального импульса

Для дальнейших расчетов принято, что $U = 6000$ В, $\alpha_1 = 9,324 \cdot 10^7$ с⁻¹, $\alpha_2 = 3,871 \cdot 10^8$ с⁻¹.

В результате синтеза по методике, описанной в основной части статьи, получены параметры схемы фильтра $L = 0,036$ Гн, $C = 8,774 \cdot 10^{-8}$ Ф.

По выражению (8) построена АЧХ коэффициента передачи напряжения (рис. 4).

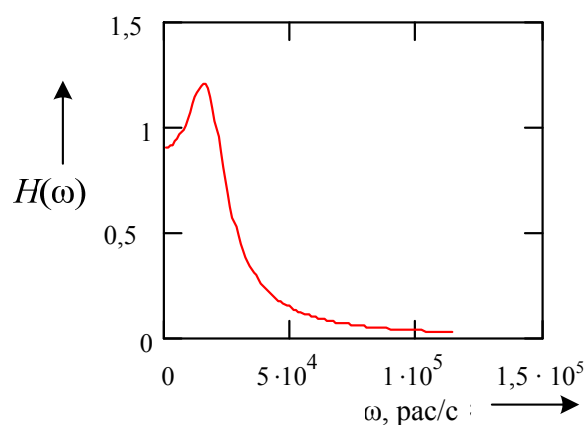


Рис. 4. АЧХ коэффициента передачи напряжения фильтра нижних частот

По формулам (5), (8) и (9) построен амплитудный спектр импульса помехи на выходе фильтра (рис 5).

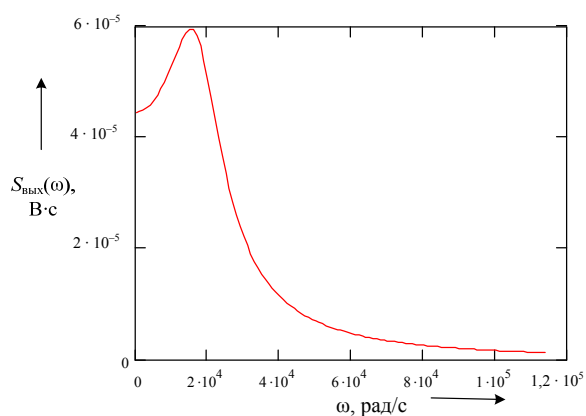


Рис. 5. Амплитудный спектр помехи на выходе фильтра нижних частот

При сравнении рис. 3 и 4 видно, что полоса частот спектра импульса сократилась на три порядка, следовательно, снизилась и энергия помехи. Однако на рис. 4 и 5 виден явный, но незначительный, пик, вызванный резонансом напряжений в цепи фильтра. Этот резонанс может оказать вредное влияние на обработку полезных сигналов. Поэтому применение фильтра оправдано, если при достаточном снижении энергии помех не происходит нежелательное резонансное усиление составляющих полезного сигнала. Это условие обязательно должно проверяться при выборе схемотехнических решений по защите от помех.

В целях обеспечения корректной работы реального фильтра необходимо использовать специальные конструкции дросселей и конденсаторов для исключения влияния на АЧХ фильтра паразитных параметров элементной базы [1], [4].

Заключение

Анализ результатов расчетов, представленных выше, дает основание сделать следующие выводы.

Существующие методики дают возможность синтезировать помеховые фильтры нижних частот типа Баттерворта, существенно снижающие уровень импульсных электромагнитных помех. При этом согласование сопротивлений нагрузок и сопротивлений фильтра не требуется.

Этот вид защитных цепей эффективен, если спектр полезного сигнала занимает полосу частот, значительно меньшую, чем полоса частот спектра помехи.

Снижение фильтром энергии помех является достаточно эффективным, несмотря на резонансные явления и на то, что затухание помехи в фильтре второго порядка имеет пологий спад [9]. Более крутой спад может быть получен путем применения многозвенных фильтров [9]. Однако такие фильтры громоздки и для подавления импульсных помех применяются реже [2].

Для проверки результатов синтеза помехоподавляющего фильтра нижних частот существуют сравнительно простые расчетные соотношения, которые позволяют реализовать проверку путем непосредственного сравнения спектров помехи на входе и выходе фильтра программами компьютерной математики.

Таким образом, вышеизложенное позволяет заключить, что рассмотренный метод синтеза апробацию прошел и может использоваться на практике при разработке схем защиты от импульсных помех.

Компьютерные расчеты схем фильтра и спектров помех осуществили в рамках НИРС студенты факультета автоматизированных и информационных систем ГГТУ им. П. О. Сухого Зиновенко В. С. и Миронов И. С. Авторы выражают им искреннюю благодарность за помощь в работе и проявленную при этом добросовестность.

Литература

1. Аполлонский, С. М. Расчеты электромагнитных полей / С. М. Аполлонский, А. Н. Горский. – М. : Маршрут, 2006. – 992 с.
2. Кечиев, Л. Н. Защита электронных средств от воздействия статического электричества / Л. Н. Кечиев, Е. А. Пожидаев. – М. : Технологии, 2005. – 352 с.
3. Электромагнитный терроризм на рубеже тысячелетий / М. Бакстром [и др.] ; под ред. Т. Р. Газизова. – Томск : Изд-во Том. ун-та, 2012. – 206 с.
4. Князев, А. Д. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной техники с учетом электромагнитной совместимости / А. Д. Князев, Л. Н. Кечиев, Б. В. Петров. – М. : Радио и связь, 1989. – 224 с.

5. Электромагнитная совместимость научного космического комплекса АРКАД-3 / Ю. И. Гальперин [и др.] ; под ред. Н. С. Лидоренко. – М. : Наука, 1984. – 187 с.
6. Барнс, Дж. Электронное конструирование. Методы борьбы с помехами / Дж. Барнс. – М. : Мир, 1990. – 238 с.
7. Электротехническая совместимость электрооборудования подвижных технических систем / В. Г. Болдырев [и др.] ; под ред В. П. Булекова. – М. : Энергоатомиздат, 1995. – 352 с.
8. Кечиев, Л. Н. Помехоподавляющие фильтры. Методы проектирования / Л. Н. Кечиев, А. А. Бобков, П. В. Степанов. – М. : МГИЭиМ, 1999. – 36 с.
9. Титце, У. Полупроводниковая схемотехника / У. Титце, К. Шенк. – М. : Мир, 1983. – 512 с.
10. Гуревич, М. С. Спектры радиосигналов / М. С. Гуревич. – М. : Связьиздат, 1963. – 311 с.
11. Верлань, А. Ф. Методы решения интегральных уравнений с программами для ЭВМ / А. Ф. Верлань, В. С. Сизиков. – К. : Наук. думка, 1978. – 291 с.
12. Альбац, М. Е. Справочник по расчету фильтров и линий задержки / М. Е. Альбац. – М. – Л. : Связьиздат, 1963. – 200 с.
13. Ханзел, Г. Справочник по расчету фильтров / Г. Ханзел. – М. : Совет. радио, 1974. – 288 с.
14. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л. А. Бессонов. – 7-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1979. – 528 с.
15. Шебес, М. Р. Задачник по теории линейных электрических цепей / М. Р. Шебес, М. В. Каблукова. – М. : Высш. шк., 1990. – 544 с.

Получено 06.04.2015 г.