

К. т. н. В. Г. КУДРЯ

Украина, Одесский государственный экологический университет

Дата поступления в редакцию  
09.03 2003 г. — 11.03 2004 г.

Оппонент к. т. н. А. А. ЕФИМЕНКО  
(ОНПУ, г. Одесса)

## МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ УВЧ-УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ

*В УВЧ-диапазоне корректное проектирование электронной аппаратуры практически невозможно без объединения схемотехнического и конструкторского проектирования.*

Задача повышения быстродействия, надежности и энергетической оптимизации электронной аппаратуры различного назначения наталкивается на проблему проектирования с учетом внутреннего электромагнитного состояния. Электромагнитные помехи в электрических цепях коммуникатора (т. е. помехи межкомпонентных соединений — токопроводящих дорожек печатных плат, экранов, распределенных шлейфов) не отображаются даже наиболее современными интегрированными пакетами анализа электронных схем наподобие MicroCap или OrCAD. Такое положение объясняется сложностью построения корректных *электродинамически обоснованных* моделей анализа высокочастотных электрических цепей [1].

На примере анализа характеристик реальной конструкции балансного усилителя мощности [2, с. 116—118] ультравысокочастотного (УВЧ) (0,3—3 ГГц) диапазона предлагается подход к проектированию электронной аппаратуры с учетом опасных электромагнитных помех.

Элементами множества компонентов усилителя мощности являются компоненты квадратурного делителя и сумматора, транзисторы канальных усилителей и компоненты развязки. К коммуникатору отнесены печатные дорожки, экраны, одно- и многопроводные соединители, разъемы и т. п. Другими словами, коммуникатор — это то, что остается в устройстве после удаления из него сосредоточенных компонентов.

Анализ коммуникатора предполагает определение его магнитных и электрических потоков через соответствующие поверхности коммуникатора реальной конструкции. При этом с целью упрощения вычисления этих потоков можно искусственно устранять геометрические неоднородности как элементов коммуникатора, так и компонентов со сложными геометрическими поверхностями. Незначительные размеры компонентов по отношению к коммуникатору позволяют заменять их геометрическими точками, не имеющими размеров, а места их расположения искусственно заменять продолжением проводников, к кото-

рым присоединен компонент. (Можно показать, что погрешность вычисления потоков при такой замене сведется к заведомо заданной величине.)

Анализ усилителя мощности выполнялся с учетом следующих факторов.

1. Действие законов Кирхгофа ограничивается выполнением соотношения  $l \ll \lambda$ , где  $l$ ,  $\lambda$  — размер створки платы и длина электромагнитной волны, соответственно. В случае  $l < \lambda$  поле коммуникатора усилителя не является «абсолютно» потенциальным, и поэтому использование понятий «напряжение» и «ток» в классическом их понимании недостаточно корректно.

В основу разработанной модели анализа усилителя положен принципиальный подход декомпозиции электрической цепи (ЭЦ) на компоненты и коммуникатор [3]. Это позволило применить теорию квазистационарных электромагнитных полей для анализа коммуникатора и классическую теорию ЭЦ для анализа сосредоточенных компонентов.

2. Продуктивной идеей электродинамического обоснования стало введение зон, или областей однозначного определения напряжений и токов. Такое представление позволяет однозначно определять как процессы в коммуникаторе, так и процессы в компонентах. В математической модели в качестве неизвестных величин используются токи и напряжения указанных зон.

3. Электромагнитные помехи как производные потоков векторов магнитной и электрической индукции учитывались в виде генераторов соответственно напряжений  $u_n$  и токов  $i_n$ , места подключения которых определяются на основе мажоритарной верификации:

$$u_n = \frac{d\Phi}{dt}; \quad i_n = \frac{dN}{dt},$$

где  $\Phi$  и  $N$  — магнитный и электрический потоки,  $t$  — время.

4. Расчет магнитных и электрических параметров коммуникатора выполнен на основе детального анализа его конструкторско-морфологической структуры. Для их вычисления применен системный принцип декомпозиции сложной конструкции на элементарные (параллельные и радиальные) части [4] с вычислением электрических и магнитных потоков на основе аналогии плоскопараллельных и сферопараллельных полей. Последние рассчитывались с использованием компьютерной техники как поля, ис-

точниками которых считались токи и напряжения полюсов компонентов.

5. Электродинамические параметры позволили построить схематическую модель электромагнитных помех в виде зависимых источников электроэнергии. В качестве примера отображения магнитной составляющей электромагнитной помехи, источником которой является ток, может быть схема **рис. 1**, составленная в интегрированной программной среде пакета MicroCap. Здесь Pin\_1 и Pin\_2 — полюса компонентов, ток которых генерирует магнитный поток (источник магнитной помехи), PinB\_1 и PinB\_2 — полюса, на выходе которых генерируется напряжение, которое создается магнитным потоком помехи.

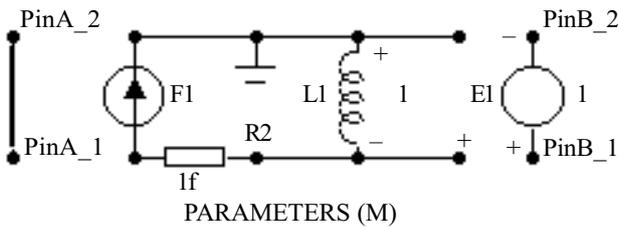


Рис. 1. Модель магнитной помехи

Подобным образом формируются макромодели препятствий электрических потоков, причем с разным количеством входов и выходов.

Дополнение схемы усилителя [2] макромоделями опасных электромагнитных препятствий позволит получить его частотные характеристики (см. **рис. 2**).

Сравнивая частотные характеристики, рассчитанные в соответствии с классической моделью и электродинамически обоснованной моделью, можно сделать следующие выводы.

1. Эффект активного усиления мощности в реальной конструкции значительно хуже ожидаемого. Действительно, на центральной частоте 1,05 ГГц коэффициент усиления по мощности на кривой *e* меньше в три раза, чем на кривой *k*.

2. Полоса прозрачности на кривой *e* отлична от полосы прозрачности на кривой *k*, т. е. избирательные свойства входной и выходной согласующих трансформаторной цепи изменяются за счет неотраженных электромагнитных препятствий конструкции коммуникатора усилителя мощности.

3. В реальной конструкции спектр выходного напряжения в меньшей мере поддается коррекции, т. е. он в большей мере совпадает по форме со спектром

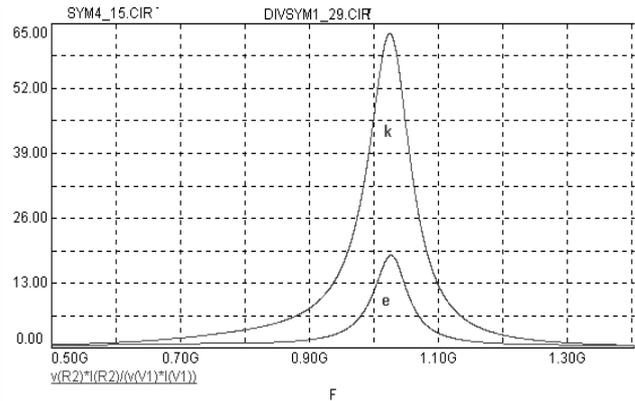


Рис. 2. Сравнение частотных характеристик классической (*k*) и электродинамически обоснованной (*e*) моделей

напряжения входного колебания. Объясняется такой результат тем, что “фантомные” пути передачи энергии снижают роль усилителя мощности.

4. Расхождение результатов вычисления по различным моделям обусловлено учетом и, соответственно, игнорированием электромагнитных обратных связей.

Безусловно, сравнительный анализ можно продолжить и по другим аспектам моделирования, например, получить характеристики устойчивости, выполнить вариационный анализ на разброс параметров компонентов и т. п.

\*\*\*

Подытоживая изложенное, можно утверждать, что в УВЧ-диапазоне корректное проектирование электронной аппаратуры практически невозможно без объединения схемотехнического и конструкторского проектирования в единый процесс на основе применения электродинамически обоснованных моделей, тем более что применение электродинамически обоснованных моделей вполне обеспечивается вычислительными возможностями современной компьютерной техники.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Тозони О. В., Князь А. И. Электродинамические итерации при проектировании ЭВМ // Электронное моделирование.— 1979.— № 2.— С. 57—63.
2. Радиопередающие устройства / М. В. Балакирев, Ю. С. Вохмяков, А. В. Журиков и др.— М.: Радио и связь, 1982.
3. Князь А. И., Кудря В. Г. Электродинамически обоснованные схемотехнические модели параметрического видеосуслителя // Радиотехника.— 1985.— № 6.— С. 87—88.
4. Князь А. И. Электродинамика информационных систем.— М.: Радио и связь, 1994.