

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.396.6.001.66

МОДЕЛИ ПАРАЗИТНЫХ АНТЕНН В УЗЛАХ ОБОРУДОВАНИЯ КЛЮЧЕВЫХ СИСТЕМ ИНФОРМАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ С УЧЕТОМ РЕЗОНАНСНЫХ РЕЖИМОВ

Д.В. Комнатный

*Гомельский государственный технический университет им П.О. Сухого
(Республика Беларусь, г. Гомель)*

© Комнатный Д.В., 2025

Аннотация. Рассматриваются модели паразитных антенн в узлах микроэлектронной аппаратуры ключевых систем информационной инфраструктуры. Для расчета восприимчивости к электромагнитным помехам применяется метод передаточных функций. Описаны резонансные и аналогичные резонансным режимы в электрически малых антенных, модели которых представляют собой цепи со сосредоточенными параметрами. Для моделей паразитных антенн в виде цепей с распределенными параметрами получено выражение для передаточной функции и выявлены режимы в нагрузке, аналогичные резонансным. Рассмотрен способ исследования перечисленных режимов при испытаниях аппаратуры на устойчивость к электромагнитным помехам. Анализ резонансных режимов работы паразитных антенн дает возможность исключить ухудшение электромагнитной совместимости микроэлектронной аппаратуры.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, импульсные помехи, паразитные антенны, резонанс, полоса пропускания, электрически малые антенны, цепи с распределенными параметрами, испытательные импульсы.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-4-28-35

ВВЕДЕНИЕ

Современные условия придают особое значение проблеме воздействия импульсных помех на микроэлектронную и микропроцессорную аппаратуру ключевых систем информационной инфраструктуры (в Республике Беларусь – критически важных объектов информатизации). Это объясняется снижением помехоустойчивости современной элементной базы, ростом числа источников электромагнитных помех, расширением полосы частот спектра данных помех. Немаловажным обстоятельством является и то, что в числе импульсных помех имеются электромагнитные импульсы, создаваемые преднамеренно с вредоносными целями (электромагнитные импульсы преднамеренного воздействия (ЭИПВ)) [1].

При воздействии некондуктивных импульсных помех конструкция аппаратуры ключевых систем информационной инфраструктуры рассматривается как сложная система паразитных антенн [2]. Для обеспечения требуемой помехоустойчивости оборудования такие антенны, в отличие от штатных антенн радиоэлектронных средств, должны быть

минимально эффективны по восприимчивости. Но паразитная антенна может непреднамеренно заработать в резонансном режиме. В этом случае эффективность приема антенной электромагнитных помех становится максимальной. Соответственно, недопустимо ухудшается электромагнитная совместимость микроэлектронной и микропроцессорной аппаратуры, целостность полезного сигнала и целостность электропитания [3].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для анализа и прогнозирования восприимчивости электронного оборудования к импульсным электромагнитным помехам в источнике [4] предложен метод передаточных функций. Передаточная функция рецептора имеет вид

$$K(j\omega) = \frac{U_{out}(j\omega)}{E_{in}(j\omega)}, \quad (1)$$

где ω – круговая частота, рад/с; U_{out} – выходное напряжение, В; E_{in} – входная напряженность электромагнитного поля, В/м.

По известной передаточной функции рассчитывается напряжение помех, наведенное в антenne электромагнитным полем. Эффективность воздействия по энергии определяется формулой

$$\eta_w = \frac{\frac{\omega_2}{\omega_1} \int_{\omega_1}^{\omega_2} U_{out}^2(\omega) d\omega}{\int_0^{\omega_2} U_{out}^2(\omega) d\omega}, \quad (2)$$

где ω_1, ω_2 – граничные круговые частоты полосы пропускания, рад/с.

Из (1) и (2) следует, что для осуществления анализа восприимчивости паразитной антенны требуется определить ее передаточную функцию и найти верхнюю и нижнюю частоты полосы пропускания. Для решения этой задачи следует рассмотреть электродинамические модели паразитных антенн. Такое рассмотрение и осуществляется в статье.

МОДЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИ КОРОТКИХ АНТЕНН

В источнике [5] описываются паразитные антенны, которые допустимо считать электрически малыми. Для их анализа применяются квазистатический подход и модели в виде схем замещения из сосредоточенных элементов. Анализ схем замещения легко выполнить методами теории цепей [3].

В таблице приведены модели антенн, схемы замещения, указана возможность резонансного или аналогичного резонансному режима. Таблица составлена по источникам [5–7].

Передаточная функция (1) для моделей в виде последовательной RLC -цепи получается из амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) этой цепи, которая имеет вид классической резонансной кривой для резонанса напряжений [8, 9]. Таким образом, выявляется резонансный режим работы антennы.

Для моделей в виде смешанной RLC -цепи схема замещения может быть преобразована в последовательную RLC -цепь [10].

Модели электрически коротких паразитных антенн

| Модель антенны | Схема замещения | Резонансный режим |
|---------------------------------|------------------------------|---------------------|
| Несимметричный вибратор | Последовательная RC -цепь | Невозможен |
| НЧ резонансный вибратор | Последовательная RLC -цепь | Резонанс напряжений |
| Пластинчатая дипольная | Смешанная RC -цепь | Псевдорезонанс |
| Рамочный квазистатический виток | Последовательная RL -цепь | Невозможен |
| НЧ резонансный виток | Смешанная RLC -цепь | Резонанс напряжений |
| Емкостная шлейфовая | Смешанная RLC -цепь | Резонанс напряжений |
| Т-образная индуктивная | Смешанная RLC -цепь | Резонанс напряжений |

Полоса пропускания последовательной RLC -цепи, соответствующей паразитной антенне, должна рассчитываться с учетом добротности, которая определяет избирательность антенны и значение максимума АЧХ. Так как паразитные антенны непреднамеренно имеют и высокую и низкую добротность, то граничные частоты полосы пропускания определяются по общей формуле [9]

$$f_{1,2} = f_0 \left(-1 \mp \frac{1}{2Q} + \sqrt{1 + \frac{1}{4Q^2}} \right), \quad f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (3)$$

где $f_{1,2}$ – граничные частоты, Гц; f_0 – собственная частота, Гц; Q – добротность; L – индуктивность антенны, Гн; C – емкость антенны, Ф.

Передаточная функция для модели в виде смешанной RC -цепи аналогично получается из АЧХ цепи [5]. В этом же источнике указана формула для граничных частот полосы пропускания антенны. АЧХ этой цепи учитывает режим псевдорезонанса.

Таким образом, в моделях паразитных антенн в виде цепей с сосредоточенными параметрами резонансные и аналогичные им режимы заложены изначально и выявляются непосредственно. Следовательно, имеется возможность анализа восприимчивости таких антенн с учетом резонансных режимов.

МОДЕЛИ В ВИДЕ ЦЕПИ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

В источнике [5] указано, что модели в виде цепи с сосредоточенными параметрами оказываются недостаточными для воздействия импульсов с очень короткими наносекундными фронтами. Такими импульсами являются электростатические разряды, и ЭИПВ с узкой и средней полосами частот по классификации стандарта IEC61000-4-36, и, в меньшей степени, наводки от соседних линий быстродействующих цифровых узлов. Для рассмотрения воздействия этих помех используются модели в виде нагруженных идеальных длинных линий [6, 11, 12].

В этих моделях принимают, что расстояние между проводниками линии мало, поэтому линии являются электрически короткими по зазору между проводниками. В зависимости от длины проводников линия с распределенными параметрами может быть электрически короткой и электрически длинной по длине проводников.

В источниках [6, 11] приведены модели паразитных антенн в виде электрически коротких линий по длине проводников, а также формулы для расчета помех в нагрузках этих линий. Из этих формул следует, что резонансные режимы в электрически коротких по длине линиях невозможны. Воздействие электромагнитных излучений на электрически длинные линии с позиции электромагнитной совместимости исследовалось в источниках [12, 13]. Но в них не рассматривались подробно процессы в нагрузках линий и не выявлялись резонансные режимы. В руководствах по теории электрических цепей [14], как

правило, рассматриваются распределения напряжения и тока по длине идеальной линии, выявляются точки резонанса.

Для применения метода передаточных функций к моделям в виде длинных линий требуется получить выражение передаточной функции, связывающей характеристики поля помех и напряжение в нагрузках на концах линии. Линии связи печатных микроЭлектронных узлов зачастую согласовываются с нагрузками для снижения помех, возникающих из-за отражений электромагнитных волн от нагрузок [12]. Кроме того, при согласованной нагрузке в нее поступает вся подводимая энергия, таким образом, воздействие помех становится опаснее. По источникам [11, 12] возможны два типа поляризации некондуктивных помех. Первый тип: вектор напряженности магнитного поля перпендикулярен плоскости линии, вектор напряженности электрического поля параллелен плоскости линии. Второй тип: вектор напряженности магнитного поля параллелен плоскости линии, а вектор напряженности электрического поля перпендикулярен плоскости линии.

При первом типе поляризации воздействие некондуктивных помех на линию моделируется распределенным генератором [11] и выражается формулой

$$\underline{E}(z) = j\omega\mu_0 H(j\omega)sl, \quad (4)$$

где E – ЭДС генератора, В; z – координата точки на линии, м; μ_0 – магнитная постоянная, Гн/м; H – напряженность магнитного поля А/м; s – длина зазора, м; l – длина линии, м.

Определение напряжения в нагрузках производится по общим формулам для расчета воздействия некондуктивных помех на длинную линию [13]. Для согласованной идеальной линии эти формулы принимают вид:

$$\begin{aligned} \underline{U}(z) &= Z_B \left(P_e(z) e^{-\gamma l} + Q_e(z) e^{\gamma l} \right), \\ P_e(z) &= \frac{1}{2Z_B} \int_{z_1}^z E(v) e^{\gamma v} dv; \quad Q_e(z) = \frac{1}{2Z_B} \int_z^{z_2} E(v) e^{-\gamma v} dv, \end{aligned} \quad (5)$$

где U – напряжение в точке на линии, В; $Z_B = \sqrt{\frac{L}{C}}$ – волновое сопротивление;

$\gamma = j\omega\sqrt{LC} = j\beta$ – постоянная распространения; z_1, z_2 – координаты начала и конца линии, м; L – погонная индуктивность линии, Гн/м; C – погонная емкость линии, Ф/м; v – вспомогательная переменная..

На рис. 1 показана принятая аналогично источнику [12] система координат. Тогда $z_1 = -l/2$, $z_2 = +l/2$.

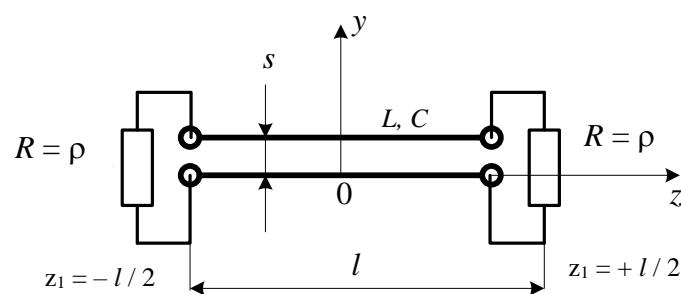


Рис. 1. Система координат модели в виде цепи с распределенными параметрами

Тогда после подстановки (4) в (5) и интегрирования с учетом координат начала и конца линии получено выражение для напряжений в нагрузках начала и конца линии

$$\underline{U}\left(-\frac{l}{2}\right) = \underline{U}\left(\frac{l}{2}\right) = \frac{\mu_0 s l \underline{H}(j\omega)}{2L} Z_B \left(1 - e^{-\gamma l}\right). \quad (6)$$

Из (6) следует выражение для передаточных функций для напряжения помех

$$\underline{K}_{1,2}(j\omega) = \frac{\underline{U}_{1,2}(j\omega)}{\underline{H}(j\omega)} = \frac{\mu_0 s l}{2L} Z_B \left(1 - e^{-\gamma l}\right). \quad (7)$$

Модуль передаточной функции (7) с учетом выражения для постоянной распространения имеет вид

$$K_{1,2}(\omega) = \frac{\mu_0 s l}{2L} Z_B \sqrt{2} \sqrt{1 - \cos \omega l \sqrt{LC}}. \quad (8)$$

Исследование функции $\sqrt{2} \sqrt{1 - \cos x}$, где $x = \omega l \sqrt{LC}$, показывает, что эта функция является периодической. Она имеет максимум при $\cos x = -1$, т.е. при $\omega = \frac{(2n+1)\pi}{l \sqrt{LC}}$.

Максимальное значение функции равняется 2. На этих частотах в нагрузках линии имеется максимум напряжения, поэтому данный режим является аналогом резонансного.

Тогда для определения полосы пропускания допустимо, по аналогии с резонансом напряжений в последовательной RLC -цепи, полагать, что на границе полосы пропускания

$$\sqrt{2} \sqrt{1 - \cos \omega l \sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{2}}.$$

Тогда граничные частоты полос пропускания

$$\omega_1 = \frac{\arccos \frac{3}{4} + \pi n}{l \sqrt{LC}}, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots. \quad (9)$$

$$\omega_2 = \frac{n\pi - \arccos \frac{3}{4}}{l \sqrt{LC}}, \quad n = 1, 2, 3, \dots. \quad (10)$$

Аналогично может быть исследован второй тип поляризации некондуктивной помехи.

В случае длинной линии с несогласованной нагрузкой расчет воздействия помех на нее усложняется в связи с необходимостью учета отражений электромагнитных волн от концов линии. Расчетные соотношения из источника [13] для этого случая имеют громоздкий вид, поэтому получить замкнутые выражения для передаточных функций затруднительно.

ПРОВЕРКА УСТОЙЧИВОСТИ АППАРАТУРЫ В РЕЗОНАНСНЫХ РЕЖИМАХ

Так как резонансные и аналогичные им режимы вызывают недопустимое ухудшение электромагнитной совместимости микроэлектронной аппаратуры, то необходимо проверять эти режимы на этапе испытаний. Одним из способов является воздействие импульсами, которые имеют максимум спектральной характеристики на частоте, равной частоте резонансного режима.

Для электрически малых антенн могут использоваться импульсы в виде затухающей синусоиды, косинусный радиоимпульс, радиоимпульс с колоколообразной огибающей. Спектральные характеристики этих импульсов имеют максимум на частоте, не равной 0 [15].

Для антенн, моделируемых длинными линиями, целесообразно производить тестирование суммой импульсов в виде затухающей синусоиды. Параметры импульсов подобраны так, чтобы частоты максимума спектральной характеристики совпадали с частотами максимумов напряжений в нагрузках [16].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По приведенным в статье результатам можно сделать следующие выводы.

Модели паразитных антенн позволяют выявлять резонансные и аналогичные им режимы работы антенн и осуществлять анализ восприимчивости узлов микроэлектронной и микропроцессорной аппаратуры к импульсным электромагнитным помехам. Это справедливо как для моделей в виде цепей с сосредоточенными параметрами, так и для моделей в виде цепей с распределенными параметрами.

При использовании метода передаточных функций цепей с сосредоточенными параметрами получаются из известных соотношений для АЧХ цепей. Для моделей в виде идеальной длинной линии в статье получены и проанализированы передаточные функции для напряжения на нагрузках. В существующих публикациях этот вопрос исследован недостаточно, несмотря на его высокую актуальность.

Анализ резонансных и аналогичных им режимов позволяет выбрать форму и параметры импульсов испытательных воздействий, с помощью которых можно установить восприимчивость микроэлектронной аппаратуры при наличии указанных режимов во время испытаний. Таким образом, повышается адекватность испытаний.

Как следует из источника [3] анализ электромагнитной совместимости современной микроэлектронной и микропроцессорной аппаратуры, в котором учитывается негативное влияние резонансных режимов, является востребованным. Несмотря на то, что модели паразитных антенн предложены достаточно давно, выявление резонансных и аналогичных режимов в них проводилось мало. Следовательно, представленное в статье рассмотрение представляет теоретический интерес и полезно для проектирования аппаратуры ключевых систем информационной инфраструктуры.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает искреннюю благодарность д.т.н., профессору К. А. Бочкову за полезные обсуждения, позволившие сформулировать цель исследования и выбрать методы его проведения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кечиев Л.Н. Электромагнитная несовместимость: опасности, катастрофы, риски. Инженерное пособие. М.: Грифон, 2022. 544 с.
2. Прищепенко А.Б. Взрывы и волны. Взрывные источники электромагнитного излучения радиочастотного диапазона. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. 208 с.
3. Кечиев Л.Н. Электрофизические основы конструирования электронной аппаратуры. Инженерное пособие. М.: Грифон, 2020. 480 с.
4. Mojert C., Nitsch D., Friedhoff H., Maack J., Sabath F., Camp M., Garbe H. UMB and EMP Susceptibility of Microprocessors and Networks // Proceedings of 14th International Zurich Symposium on EMC. February, 20–22. Switzerland: Zurich. 2021. pp. 47–52.
5. Электротехническая совместимость электрооборудования подвижных технических систем / Болдырев В.Г. [и др.] / под ред. В.П. Булекова. М.: Энергоатомиздат, 1993, 352 с.
6. Кравченко В.И., Болотов Е.А., Летунова Н.И. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи / под ред. В.И. Кравченко, М.: Радио и связь, 1987. 256 с.

7. Кравченко В. И. Грозозащита радиоэлектронных средств: справочник. М.: Радио и связь, 1991. 264 с.
8. Каплянский А.Е., Лысенко А.П., Полотовский Л.С. Теоретические основы электротехники: учебное пособие / под ред. А.Е. Каплянского. Изд. 2-е. М.: Высшая школа, 1972. 448 с.
9. Атабеков Г. И. Основы теории цепей: учебник для вузов. М.: Энергия, 1969. 424 с.
10. Справочное пособие по электротехнике и основам электроники: учебное пособие / П. В. Ермуратский, А.А. Косякин, В.С. Листвин [и др.] / под ред. А. В. Нетушила. М.: Высшая школа, 1986. 248 с.
11. Кечиев Л.Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры. М.: ООО Группа «ИДТ», 2007. 616 с.
12. Геворкян В.М. Электромагнитная совместимость электронных информационных систем: в 2 ч. Ч. 1. Общие вопросы электромагнитной совместимости технических средств М.: Изд. дом МЭИ, 2022. 421 с.
13. Аполлонский С.М., Горский А.Н. Расчеты электромагнитных полей: монография / под ред. А.Н. Горского. М.: Маршрут, 2006. 992 с.
14. Афанасьев Б.П., Гольдин О.Е., Кляцкин И.Г., Пинес Г.Я. Теория линейных цепей: учебное пособие. М.: Высшая школа, 1973. 592 с.
15. Крылов Н.Н. Теоретические основы радиотехники. М.: Морской транспорт, 1953. 552 с.
16. Carter N. J. The Revision of EMC Specifications for Military Aircraft Equipment. Philosophy Doctoral Thesis. Guildford: University of Surrey, 1985. 178 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

КОМНАТНЫЙ Дмитрий Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры теоретических основ электротехники, УО «Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого», 246746, Республика Беларусь, г. Гомель, просп. Октября, 48. E-mail: toe4031@gstu.by

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Комнатный Д.В. Модели паразитных антенн в узлах оборудования ключевых систем информационной инфраструктуры с учетом резонансных режимов // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2025. № 4 (28). С. 28–35.

THE MODELS OF PARASITIC ANTENNAS IN UNITS OF KEY SYSTEMS OF INFORMATION INFRASTRUCTURE TAKING INTO ACCOUNT RESONANCE REGIMES

D.V. Komnatny

*Gomel State Technical University named by P.O.Sukhoy
(Belarus Republic, Gomel)*

Abstract. The model of parasitic antennas in units of key systems of information infrastructure microelectronic apparatus is considered. The transfer functions method is used for electromagnetic noise susceptibility calculation. The resonance regimes and analogous to resonance regimes in electrically small antennas, which models are presented lumped-parameter

circuits, are described. The transfer function expression for parasitic antennas with models in the form of distributed parameter circuits is obtained and regimes, analogous to resonance in loads are exposed. The method of enumerated regimes investigation during apparatus testing for stability to electromagnetic noise is discussed. The analysis of resonance regimes in parasitic antennas give the possibility to exclude the worsening of microelectronic apparatus electromagnetic compatibility.

Keywords: electromagnetic compatibility, impulse noise, parasitic antennas, resonance regime, bandwidth, electrically small antennas, distributed parameters circuit, test impulses.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

KOMNATNY Dmitry Victorovich – Candidate of Technical Sciences,, Associate Professor of the Department theoretical foundations of electrical engineering, Gomel State Technical University named by P.O. Sukhoy, 48 October avenue, Gomel, 246746, Belarus Republic. E-mail: toe4031@gstu.by

CITATION FOR AN ARTICLE

Komnatny D.V. The models of parasitic antennas in units of key systems of information infrastructure taking into account resonance regimes // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 4 (28), pp. 28–35.

УДК 621.311:004.89

МЕТОДЫ ОБЪЯСНИМОГО ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ: ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

М.А. Куликова, Я.А. Чеботарев, О.Н. Торгованова, К.Б. Корнеев
Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Куликова М.А., Чеботарев Я.А.,
Торгованова О.Н., Корнеев К.Б., 2025

Аннотация. В статье рассматриваются возможности объяснимого искусственного интеллекта (ХАИ) для энергетических и электроэнергетических систем на примере приложений, которые используют машинное обучение, но еще не используют ХАИ.

Ключевые слова: электроэнергетика, энергосистема, нейронные сети, объяснимый искусственный интеллект, ХАИ, машинное обучение.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-4-35-43

Современные электрические сети становятся все более децентрализованными, лишаясь общего регулирующего органа. В таких условиях часто невозможно рассматривать сети как единый объект, обладающий неограниченным объемом информации и контролем. Кроме того, динамика изменения электрической нагрузки потребителей и работы возобновляемых источников энергии становится все более