

УДК 51-74; 621.391.82; 004.3

## **ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ ПРИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА МАКРООБЪЕКТЫ**

**З. М. Гизатуллин, М. Г. Нуриев, Р. М. Гизатуллин**

**Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А. Н. Туполева - КАИ**

Статья получена 22 мая 2015 г.

**Аннотация.** В работе рассматривается применение метода физического моделирования для решения задач электромагнитной совместимости электронных средств с участием макрообъектов. Приведены математические модели, проведен расчет параметров и представлены результаты физического моделирования помех при электромагнитном воздействии на элементы металлоконструкции здания. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №14-01-31098 мол\_а.

**Ключевые слова:** физическое моделирование, электромагнитная совместимость, электронное средство, информационная безопасность, макрообъект, электромагнитная помеха, электромагнитное воздействие, математическая модель, методика.

**Abstract.** This paper considers the application of the method of physical modeling for problems of electromagnetic compatibility electronic means with the participation of macro-objects. The mathematical models, the calculated parameters and the results of physical modeling of electromagnetic interference under the influence of electromagnetic impulses on the metal construction of the building are presented. The reported study was supported by RFBR, research project No. 14-01-31098 мол\_а”.

**Key words:** physical modeling, electromagnetic compatibility, information security, electronic means, macro-object, electromagnetic interference, mathematical model, methodology.

## **Введение**

Анализ электромагнитной совместимости и защиты информации при электромагнитных воздействиях неразрывно связан с точным определением электромагнитной обстановки вокруг электронных средств (ЭС) и расчетом электромагнитных помех в линиях связи. Непосредственно, в формировании электромагнитной обстановки вокруг ЭС участвуют макрообъекты (проводящие элементы конструкции зданий, проводящие элементы вокруг зданий, элементы конструкции транспортных средств и т.п.), которые имеют геометрические размеры намного больше, чем размеры самого ЭС. В данных условиях возникают трудности с изготовлением макетов и имитаторов электромагнитного поля в реальном масштабе. Решением данной задачи является использование макетов или имитаторов, чьи размеры, материалы и временные характеристики приемлемы для экспериментатора. Задача сводится к определению критерия подобия при протекании электромагнитных процессов на макрообъектах с различными электромагнитными характеристиками, в предположении, что электромагнитные процессы на оригинале и модели описываются феноменологическими уравнениями Максвелла [1].

Наиболее часто макрообъектом, участвующим в формировании электромагнитной обстановки вокруг ЭС является здание и его конструкционные элементы. В рамках данной работы рассматривается применение физического моделирования для анализа электромагнитной обстановки и помех в линиях связи при воздействии источника тока на элементы металлоконструкции здания, в данном случае на систему отопления. Данная задача является частью общей проблемы обеспечения электромагнитной совместимости и защиты информации в ЭС при внешних непреднамеренных [2] и преднамеренных электромагнитных воздействиях [3,4].

## **2. Методика физического моделирования**

Возможность применения масштабных моделей для физического моделирования электромагнитных задач основано на свойстве линейности

уравнений Максвелла и применяется для области линейных свойств материалов [1,5]. Основные сложности реализации масштабных моделей связаны с необходимостью подбора материалов с определенными свойствами. Обычно, в реальных условиях проведения масштабного эксперимента практически нельзя подобрать материалы с определенными, сильно отличающимися от оригинала диэлектрическими и магнитными свойствами. Поэтому обычно придерживаются следующих выражений:

$$\varepsilon' = k\varepsilon, k = 1, \mu' = m\mu, m = 1, c = \frac{1}{\sqrt{km}},$$

где  $\varepsilon', \varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость материалов модели и оригинала;  $\mu', \mu$  – магнитная проницаемость материалов модели и оригинала;  $k$  – коэффициент изменения диэлектрической проницаемости;  $m$  – коэффициент изменения магнитной проницаемости;  $c$  – коэффициент масштабирования скоростей. Данные условия приводят к тому, что необходимо изменять значение проводимости материалов  $\sigma$ :

$$\sigma' = p\sigma, npt = 1, p = \frac{1}{n},$$

где  $\sigma', \sigma$  – проводимость материалов модели и оригинала;  $p$  – коэффициент изменения проводимости материалов;  $n$  – коэффициент изменения геометрических размеров модели. Если не изменять данную проводимость в масштабной модели, т.е.  $p = 1$ , тогда:

$$h = e\sqrt{\frac{p}{mF}},$$

где  $h$  – коэффициент изменения напряженности магнитного поля;  $e$  – коэффициент изменения напряженности электрического поля;  $F$  – коэффициент изменения частоты. Поэтому, в идеальном случае, масштабирование активного сопротивления осуществляется путем замены материала оригинала другим материалом, с увеличенным в  $p$  раз проводимостью. Однако на практике, где правила масштабирования физических размеров являются полезными, активное сопротивление играет не

определяющую роль, например, как и в случае воздействия электромагнитного источника на элементы металлоконструкции здания (металлические трубопроводы отопления, стальная арматура т.п.) активное сопротивление пренебрежимо мало. Следовательно, пропорциональное изменение физических размеров модели, при сохранении ее характеристик по электрической и магнитной проницаемости, приводит к пропорциональному изменению величин всех индуктивностей и емкостей, которые и являются определяющими при формировании электромагнитных процессов в оригинале и модели [6].

В рамках данной работы предлагается следующая методика физического моделирования электромагнитной обстановки и помех в линиях связи внутри здания на основе теории физического моделирования:

1. Выбор первичных и расчёт вторичных масштабных коэффициентов для физического моделирования (табл. 1) [7]. Данные коэффициенты зависят от следующих факторов: условий проведения физического эксперимента (например, размеров лаборатории, параметров генераторов электромагнитного воздействия и т.п.); параметров здания (геометрических размеров, формы и т.п.); параметров электромагнитного источника воздействующего на элементы металлоконструкции.

Таблица 1. Математические модели и расчет коэффициентов физических величин

Физическая величина	Математические модели для физического моделирования (с индексом ')	Расчет параметров
Первичные параметры		
Геометрические размеры ( $l$ )	$l' = nl$	$n = 1/12$ (уменьшение размера модели в 12 раз)
Время ( $t$ )	$t' = Tt$	$T = 1/12$
Частота ( $f$ )	$f' = Ff ; F = \frac{1}{n}$	$F = 12$
Ток ( $I$ )	$I' = AI$	$A = 1/6$

Вторичные параметры		
Производная от тока по времени	$\frac{dI'}{dt'} = \frac{A}{T} \frac{dI}{dt}$	$\frac{dI'}{dt'} = \frac{2}{1} \frac{dI}{dt}$
Напряженность магнитного поля ( $H$ )	$H' = I' d = Ald$ , где $d$ – количество витков на единицу длины	$H'_K = \frac{1}{6} Id$
Производная от напряженности магнитного поля	$\frac{dH'}{dt'} = \frac{h}{T} \frac{dH}{dt}$	$\frac{dH'}{dt'} = \frac{2}{1} \frac{dH}{dt}$
Напряжение помехи на контуре при влиянии магнитного поля $U_H(t)$	$U'_H(t') = \mu_0 a' b' \frac{dH'}{dt'} =$ $= \mu_0 n^2 ab \frac{h}{T} \frac{dH}{dt}$ , где $a, b$ – размеры контура	$U_{H'}(t') = \frac{1}{72} U_H(t)$

2. Расчет значения реальных, расчетных масштабных и экспериментальных параметров источника тока (табл. 2).

Таблица 2. Значение параметров источника тока

Параметры источника тока	Ток I (максимальный в импульсе), кА	Время фронта на уровне 10-90% $t_\phi$ , мкс	Время спада на уровне 50% $t_{50\%}$ , мкс
Реальный [4]	1,25	80	200
Масштабный расчетный	0,21	6,6	16,6
Экспериментальный	0,21	6,4	16

3. Разработка масштабного физического макета макрообъекта, в данном случае здания с системой отопления, который должен учитывать следующие его особенности: материалы элементов металлоконструкции; конфигурацию металлоконструкций; материал стен; точку и способ подключения источника

тока к системе отопления. В качестве примера разработан масштабный макет здания с размерами 10,8x10,8x14,4 м, со стенами с армирующей сеткой (железобетонные стены). Размеры ячеек армирующей сетки стен здания – 0,25x0,25 м (рис. 1). Источник тока подключается параллельно между подающим и обратным трубопроводами системы водяного отопления [8,9].



Рис. 1. Экспериментальный стенд

4. Измерение магнитных полей внутри масштабного макета здания с помощью рамочной антенны (рис. 2а).

5. Физическое моделирование электромагнитной обстановки (напряженности магнитного поля) внутри реального здания при воздействии генератора тока на систему отопления здания (рис. 2б).

Таким образом, как показывают результаты физического моделирования: напряженность магнитного поля внутри здания при воздействии источника тока на систему отопления здания (при рассмотренных исходных данных) составляет от 28,9 до 424,3 А/м; вектор напряженности магнитного поля имеет произвольное направление; наибольший уровень напряженности магнитного поля наблюдается поблизости от точки подключения источника.

6. Физическое моделирование электромагнитных помех в линиях связи внутри здания. В данном случае, в центре масштабного макета здания реализуются линии связи, которые образуют три контура (площадь каждого

примерно  $0,008 \text{ м}^2$ , плоскость контуров перпендикулярно осям «X», «Y», «Z»). На рис. 3а представлена измеренная в «X» контуре электромагнитная помеха. Моделируемая электромагнитная помеха, рассчитанная на основе предложенных ранее математических моделей (табл. 1), выглядит следующим образом (рис. 3б).

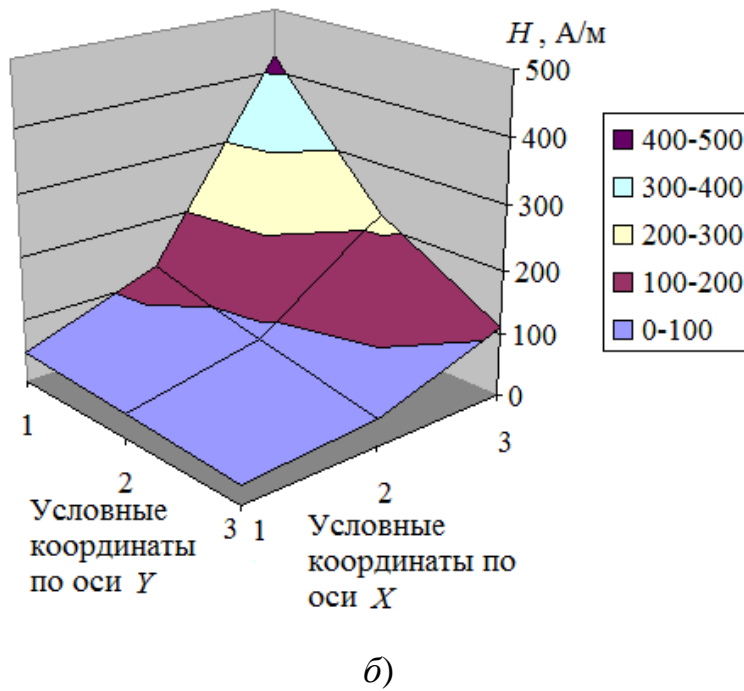
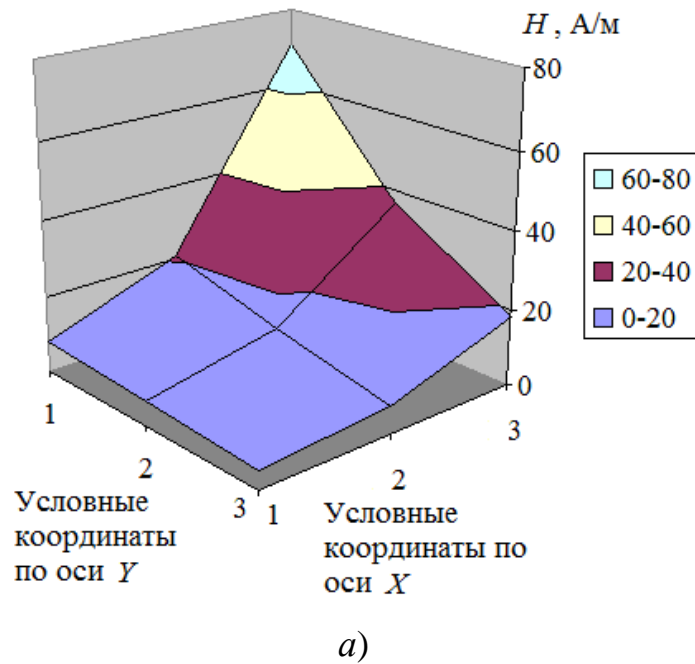


Рис. 2. Пример физического моделирования напряженности магнитного поля внутри здания (а – результат измерения, А/м; б – результат моделирования, А/м)

Таким образом, как показывают результаты физического моделирования при рассмотренных исходных данных: максимальное напряжение электромагнитной помехи в «X» контуре составляет 2,5 В; в «Y» контуре – 5,4 В; в «Z» контуре – 0,72 В. Длительность колебаний электромагнитных помех достигает 600 мкс.

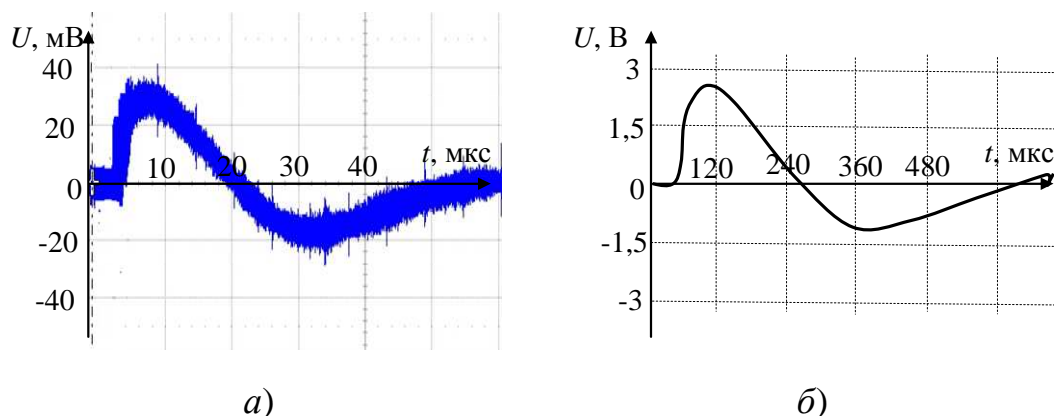


Рис. 3. Пример физического моделирования электромагнитной помехи  
(а - результат измерения; б - результат моделирования)

## Выводы

1. В условиях возникновения трудностей с изготовлением макетов и имитаторов электромагнитного поля в реальном масштабе для решения определенных задач анализа электромагнитной совместимости возможно применение метода физического моделирования.

2. Приведенный пример, физическое моделирование магнитных полей и электромагнитных помех в линиях связи внутри здания при воздействии генератора тока на систему отопления, показывает возможность применения и достаточную эффективность данного подхода. Данная задача является частью проблемы защиты информации в электронных средствах при преднамеренных силовых электромагнитных воздействиях по металлоконструкциям.

3. Анализ методики и схемы эксперимента позволяют утверждать, что расхождение результатов физического моделирования составляет не более 20% из-за следующих составляющих: нестабильность выходных параметров генератора тока – до 10%; расхождение между масштабными расчетными и экспериментальными значениями параметров – до 5 %; точность



измерительного прибора в данном диапазоне частот – до 5 %.

### **Литература**

1. Стреттон Дж.А. Основы электромагнетизма / Под. ред. С.М Рытова. – М.: Гостехиздат, 1948. – 541 с.
2. 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.
3. ГОСТ Р 51275-2007. Защита информации. Объект информатизации. Факторы, воздействующие на информацию. Общие положения. – М.: Стандартинформ, 2007. – 11 с.
4. ГОСТ Р 52863-2007 Защита информации. Автоматизированные системы в защищенном исполнении. Испытания на устойчивость к преднамеренным силовым электромагнитным воздействиям. Общие требования. –М.: Изд-во стандартов, 2008. – 33 с.
5. Schumacher C.R. Electrodynamic similitude and physical scale modeling of nondispersive targets // Journal of Applied Physics. – 1987. – Vol. 62, No. 7. – pp. 2616–2625.
6. Johnson H., Graham M. High Speed Signal Propagation. Advanced Black Magic. – New Jersey: Prentice Hall, 2003. – 766 p.
7. Гизатуллин З.М., Нуриев М.Г., Гизатуллин Р.М. Математические модели для физического моделирования задач электромагнитной совместимости // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2015. - №1-2. – С. 116-123.
8. Гизатуллин З.М., Гизатуллин Р.М. Моделирование электромагнитной обстановки на основе теории масштабного эксперимента для задач электромагнитной совместимости и защиты информации // Информационные технологии. – 2013. – №4. – С. 19–22.
9. СНиП. 41-01-2003. Отопление, вентиляция и кондиционирование / Госстрой России. - М.: ФГУП ЦПП, 2004. – 35 с.