



## ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ЛИНЕЙНО НАГРУЖЕННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ, ОБРАЗОВАННОЙ ПЛОСКОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНОЙ

Галеев Л.М.

Казанский Национальный Исследовательский  
Технический Университет им. А. Н. Туполева - КАИ,  
г. Казань, Россия  
galeev.linar93@gmail.com

**Резюме:** Статья посвящена комплексному исследованию влияния электромагнитного поля, образованного плоской волной, определенной функцией времени, направлением падения и поляризации, с линейно нагруженной электрической сетью, состоящей из трех проводников различной длины, соединённых в центре. Линейная нагрузка представляет собой резисторы номиналом 50 Ом, подключенные ко всем концам электрической сети. Сеть моделируется на ЭВМ и экспериментально исследуется в гигагерцовой поперечной электромагнитной GTEM камере, позволяющей создать электромагнитное поле известного направления. Наведенное напряжение в электрической сети исследуется в частотной и временной областях.

Для проведения эксперимента в частотной области как для создания электромагнитного поля внутри GTEM камеры, так и для измерения наведенного напряжения на концах электрической сети, использовался векторный анализатор электрических цепей VNA. Для проведения эксперимента во временной области при создании электромагнитного поля использовался высоковольтный генератор напряжения, а при измерении наведенных напряжений стробирующий осциллограф.

Моделирование выполнено в программных комплексах LTspice – инструменте для расчётов электрических и электронных цепей, и Matlab. Оно также проверено на соответствие с результатами эксперимента.

На основе полученных результатов автору удалось выделить основные аспекты, которые могут быть полезны при моделировании и прогнозировании электромагнитных процессов возникающих в проводниках и системах электропитания и/или передачи данных, нагруженных на линейную нагрузку.

**Ключевые слова:** электрическая сеть, плоская электромагнитная волна, наведённое напряжение, моделирование, эксперимент.

**Для цитирования:** Галеев Л.М. Исследование напряжения в линейно нагруженной электрической сети, образованной плоской электромагнитной волной // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 4 С. 54-63. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-4-54-63.

## INVESTIGATION OF THE PLANE WAVE COUPLING TO A LINEARLY LOADED TRANSMISSION LINE NETWORK

LM. Galeev

Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI,  
Kazan, Russia  
galeev.linar93@gmail.com

**Abstract:** The article is concerned with a complex investigation of the influence of the plane wave coupling with a certain function of time, incident direction and polarization to a linearly loaded transmission line network comprised of three single-wire conductors with different lengths connected in the center. Line load is represented as 50  $\Omega$  resistors connected to all terminations of the transmission line network. The exemplary network was modeled on a computer and experimentally investigated in a gigahertz transverse electromagnetic GTEM cell,

which allows creating an electromagnetic field of a certain direction. The coupled voltage at the terminals of the network was investigated in the frequency and time domains.

To conduct an experiment in the frequency domain, both to create an electromagnetic field inside the GTEM camera and to measure the induced voltage at the terminations of the network, a vector network analyzer VNA was used. To conduct an experiment in the time domain for the sake of creating an electromagnetic field, a high-voltage voltage generator was used, whereas a strobing oscilloscope was used to measure the induced voltages.

The simulation was performed in the LTspice software - a tool for calculating electrical and electronic circuits, and Matlab. It is also examined to show the compliance with the experimental results.

On the basis of obtained results, the author was able to identify the main aspects that may be useful in modeling and predicting the electromagnetic processes occurring in linearly loaded conductors, power supply and / or data transmission systems.

**Key words:** transmission line network, plane wave, coupled voltage, modelling, experiment.

**For citation:** Galeev LM. Investigation of the plane wave coupling to a linearly loaded transmission line network. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(4):54-63. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-4-54-63.

### Введение

Системы электроснабжения, сети передачи данных и соединительные кабели часто являются важными путями связи для нежелательных электромагнитных полей и помех в устройствах, системах и подвижных объектах. Множество методов существует для расчета одиночных проводников [1-3]. На практике проводники, могут быть соединены вместе, образуя, например, как электрические сети промышленного предприятия, так и информационные сети самолета, подверженные воздействию внешних электромагнитных полей, образованных от мощных электронных устройств, грозовых разрядов или мощных преднамеренных электромагнитных воздействий [4]. Моделирование процессов описывающих влияние электромагнитных полей с электрическими сетями сложны, но были описаны в [5, 6] для линейных нагрузок в частотной области и в [7-9] во временной области.

На первом этапе в данной работе исследуется единичное воздействие плоской электромагнитной волны, возникающей в ячейке GTEM, на электрическую сеть и наведенные токи и напряжения. Далее, результаты на основе математической модели, созданной в комплексе LTspice [10,11] сравниваются с результатами математической модели, построенной в программном комплексе Matlab и основанной на уравнениях Baum-Liu-Tesche (BLT) в частотном диапазоне [8]. Этот способ широко используется для моделирования и анализа электрических сетей, позволяющий точно оценить переходные процессы, возникающие в них. Кроме того, результаты моделирования сравниваются с уже проведенными измерениями в GTEM камере.

Статья построена следующим образом: для проверки имитационной модели несколько измерений выполняются в камере GTEM. В начале, описаны экспериментальная установка и процедуры измерений. Затем, описывается имитационная модель. И, наконец, представляются результаты для линейно нагруженной сети в частотном диапазоне.

Целью данной работы является исследование наведенного напряжения, образованного плоской электромагнитной волной, на конце линейно нагруженного проводника, входящего в состав электрической сети.

### Структура электрической сети

Исследуемый образец электрической сети представляет собой три однопроводные линии с площадью поперечного сечения  $4 \text{ мм}^2$ , соединенные в центре. Первый и второй проводники имеют длину  $l_1 = 0,3 \text{ м}$  и  $l_2 = 0,4 \text{ м}$  соответственно. Эти проводники перпендикулярны друг другу. В базовой конфигурации длина третьей линии равна  $l_3 = 0,5 \text{ м}$ , а угол относительно мнимого продолжения первой линии равен  $30^\circ$ . Схематичное изображение и фотография образца электрической сети внутри GTEM камеры представлены на рис. 1. Подключение измерительных коаксиальных кабелей к концу исследуемой линии производилось через отверстия в полу камеры.

Все проводники имеют радиус  $r = 1,128 \times 10^{-3} \text{ м}$ , а высота проводников над плоскостью земли  $h = 0,015 \text{ м}$ .

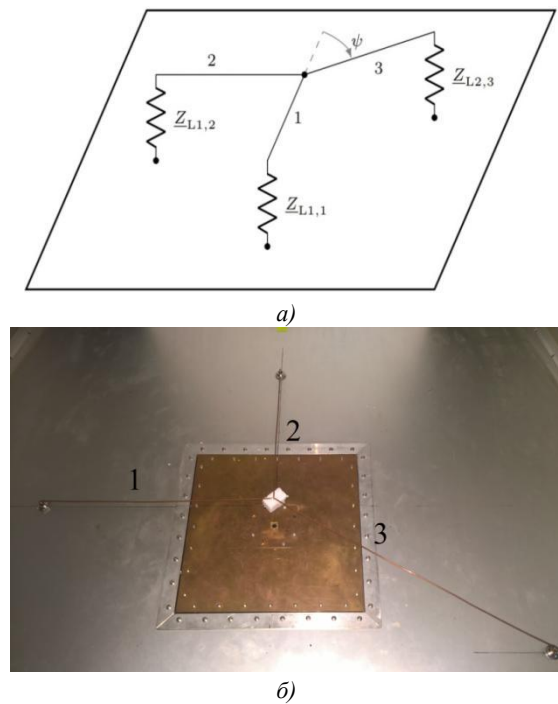


Рис. 1. Образец электрической сети:  
а – схема электрической сети; б – фото электрической сети внутри *GTEM* камеры  
1 – проводник  $l_1$ , 2 – проводник  $l_2$ , 3 – проводник  $l_3$

Данная сеть является примером произвольной электрической сети передачи данных, расположенной, например, над электропроводящим слоем в самолете с фюзеляжем из композиционного материала. Использование заземляющей поверхности оправдано тем, что в данных видах самолетов фюзеляж не может выступать в качестве «обратного проводника», и как следствие возможно нарушение электромагнитной обстановки на борту или сбой в работе оборудования.

#### Экспериментальная установка и процедура измерений

Экспериментальные установки представляют собой *GTEM* камеру с помещенной в неё испытательным образцом (рис.2). Структурно, *GTEM* камера представляет собой линию передачи 50 Ом. Входной порт линии передачи переходит во внутренний волновод треугольной формы, оканчивающийся электромагнитными поглотителями для испытаний на высоких частотах и нагрузкой 50 Ом для испытания на низких частотах. На входной порт *GTEM* камеры подается сигнал с генератора напряжения. Электрическая сеть закреплена на полу камеры и с помощью проходных коаксиальных разъемов подключалась к электронным устройствам для снятия сигнала.

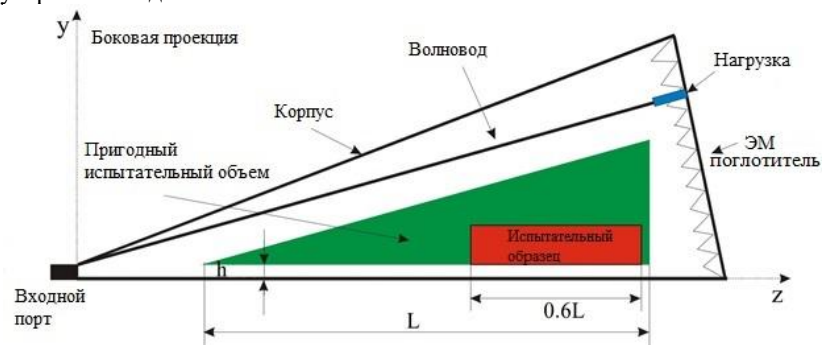


Рис. 2. Боковая проекция *GTEM* камеры [12]

Для измерений в частотном диапазоне использовался двухканальный векторный анализатор электрических цепей *VNA* [13] (рис. 3). Согласно [14] первый канал был подключен к входному порту *GTEM* камеры, когда как второй канал был подключен к 50 Ом коаксиальному разъёму на каждом из концов электрической сети поочередно.

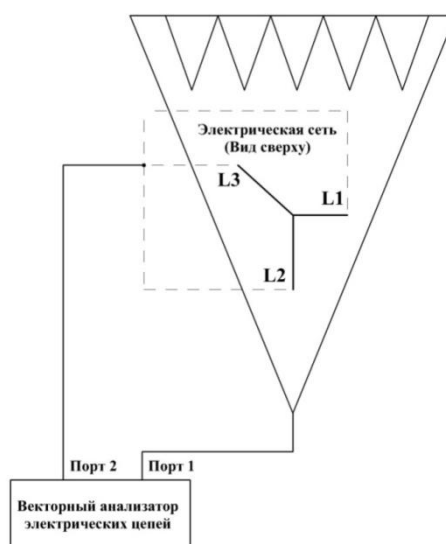


Рис. 3. Экспериментальная установка с использованием векторного анализатора электрических цепей

Для исследования электрической сети с нелинейными нагрузками при измерениях во временном диапазоне использовался осциллограф (рис. 4). Чтобы не повредить цифровой осциллограф, было использовано несколько аттенюаторов. Перед экспериментом импульс, подаваемый в *GTEM* камеру, должен быть исследован. Следовательно, выходной порт высоковольтного генератора напряжения был подключен непосредственно к осциллографу через аттенюатор 60 дБ. На рис. 5 видно, что первоначальный импульс является биполярным и довольно близок к форме синуса затухающей синусоиды.

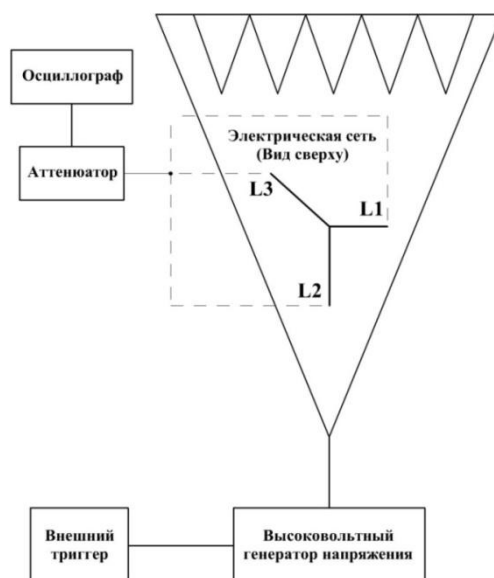


Рис. 4. Экспериментальная установка с использованием осциллографа

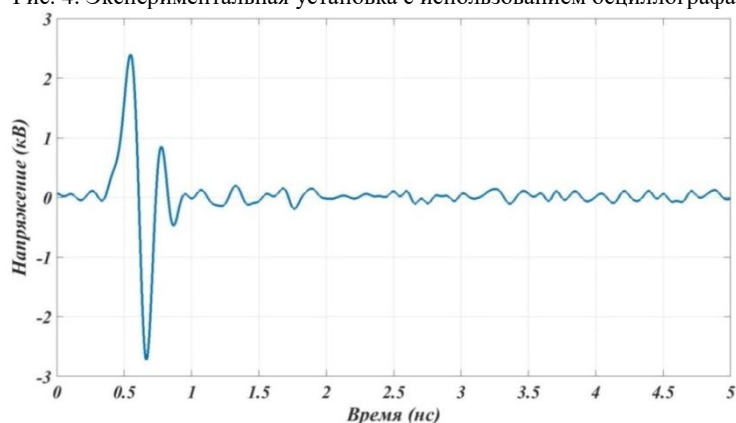


Рис. 5. Пусковой импульс высоковольтного генератора

### Имитационная модель электрической сети

Для проверки результатов экспериментов испытательный образец был смоделирован в *SPICE* программном обеспечении для построения электронных схем *LTspice* [15]. Принципиальная схема сети приведена на рис. 6. Здесь  $T_1$ ,  $T_2$  и  $T_3$  представлены в виде проводников с волновым сопротивлением.

$$z_c = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \ln\left(\frac{h}{r_0}\right) \quad (1)$$

На основе формулы (1) получаем значение равное 197 Ом. Где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость, а  $\mu$  – магнитная проницаемость. Проводники подключены к земле, поэтому общая длина проводников должна быть рассчитана с учетом длины вертикальных спусков и межслойных соединений ( $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ ) ~5 см.

Воздействующая плоская электромагнитная волна в программном комплексе *LTspice* представлена как кусочно-линейная функция измеренного сигнала с генератора импульсов высокого напряжения (рис. 5). Независимые источники напряжения  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  представляют собой источники напряжения, образованные плоской электромагнитной волной.

### Результаты исследования напряжения в электрической сети в частотной области

Вначале параметры рассеяния до частоты 1 ГГц были измерены и сопоставлены друг с другом (рис. 7). На рис. 7 представлен выходной коэффициент отражения  $S_{22}$ . Следует отметить, что первый резонанс возникает на частоте около 180 МГц.

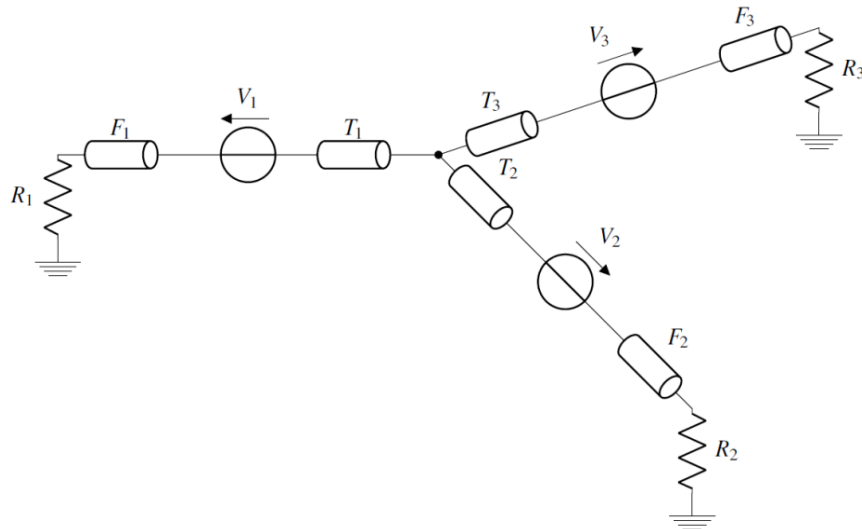


Рис. 6. Принципиальная электрическая схема сети с линейной нагрузкой на концах

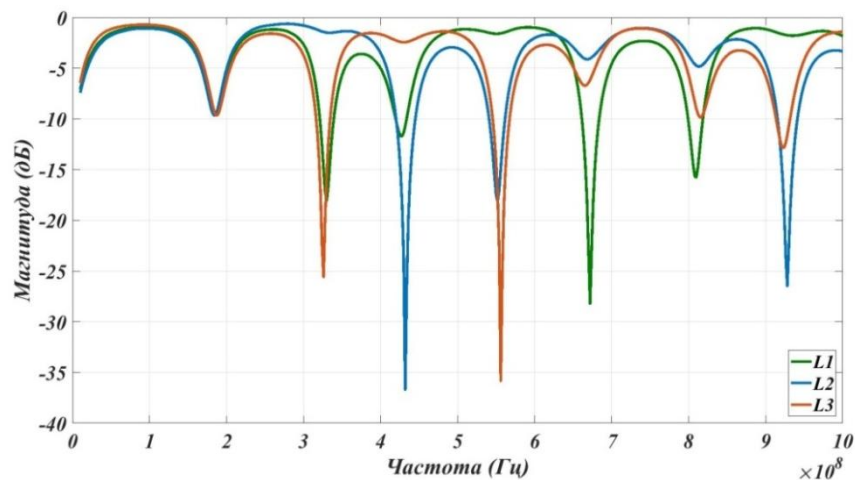


Рис. 7. Выходной коэффициент отражения  $S_{22}$  для трех линий:  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$

Для преобразования измеренных параметров рассеяния в наведенное напряжение используется формула из [16]:

$$\frac{U}{E} = \frac{|S_{21(12)}| \cdot h}{1 - |S_{11}|^2}$$

Здесь  $E$  – напряженность электрического поля,  $U$  – наведенное напряжение,  $S_{21}$  и  $S_{11}$  – абсолютные значения коэффициента прямой передачи и коэффициента отражения на входе, а  $h$  – высота сети над проводящей заземляющей плоскостью.

На рис. 8 представлено наведенное напряжение в электрической сети на всех трех концах линий.

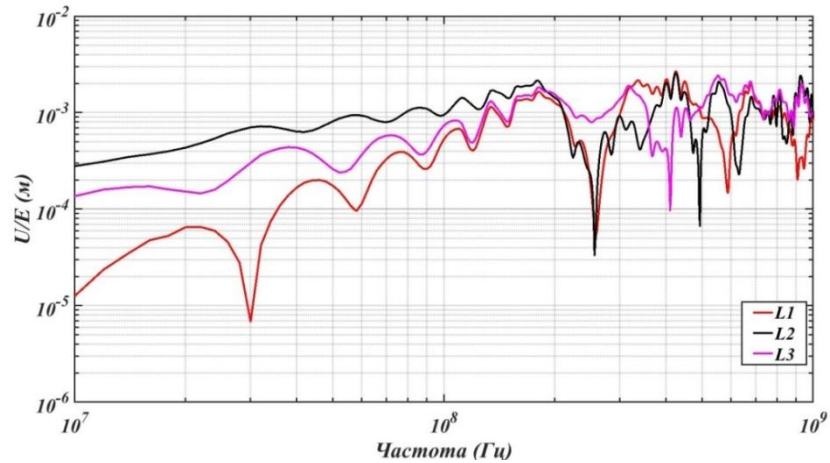


Рис. 8. Наведенное напряжение на концах проводников электрической сети:  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$

Для оценки адекватности результатов, значения наведенных напряжений из временной области, полученные для математической модели электрической сети описанной в разделе «Имитационная модель электрической сети», были преобразованы в частотную область с помощью быстрого преобразования Фурье. Полученные значения были сопоставлены между собой.

На рис. 9 представлены сравнительные результаты измеренных и смоделированных наведенных напряжений на конце второго проводника электрической сети. Видно, что общая форма кривых практически идентична. Основные резонансы зависят от длины проводников в электрической сети, различны только амплитуды резонансов. Это объясняется пренебрежением возможными потерями в электрической сети при моделировании. При частотах ниже 200 МГц количество резонансов в экспериментальной части значительно больше. Можно отметить, что резонансы появляются на частотах около 190 МГц, 330 МГц, 440 МГц, 570 МГц, 690 МГц, 820 МГц и 950 МГц (рис. 9). Эти резонансы соответствуют симметрично несогласованной электрической сети, где они возникают для длин линий, кратных  $\lambda/2$ .

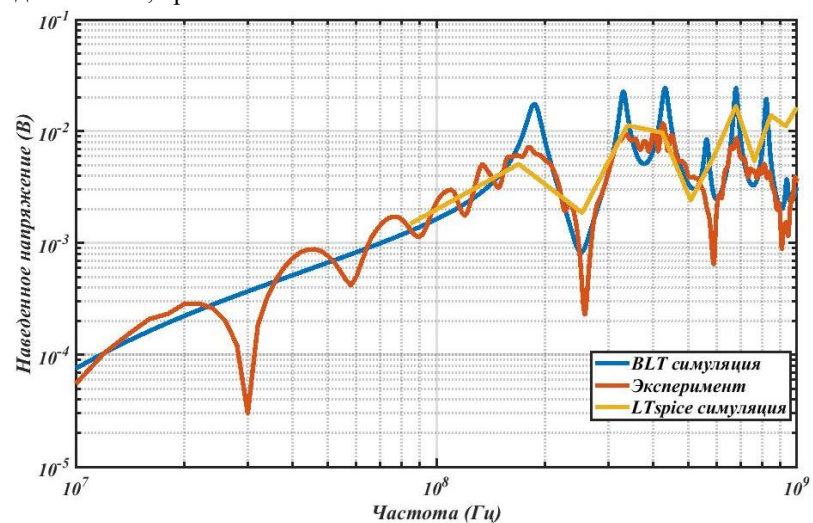


Рис. 9. Сравнение между измеренными и рассчитанными значениями наведенного напряжения в частотной области на конце второго проводника, подключенного к нагрузке в 50 Ом



Таким образом, исходя из хорошего согласования результатов моделирования в различных программных комплексах и эксперимента, программное обеспечение *LTspice* может быть использовано для вариантов с линейной нагрузкой во временной области.

#### Результаты исследования напряжения в электрической сети во временной области

В этом разделе рассматриваются результаты, исследования электрической сети, полученные во временной области. На рис. 10 представлены наведенные напряжения на конце линий линейно нагруженной электрической сети. По осциллограммам можно наблюдать задержку, между возникновением наведенного напряжения в различных проводниках электрической сети, возникающую из-за различных расстояний между источником электромагнитных импульсов и проводниками. Задержка распространения сигнала в проводниках определяется как

$$T_d = \frac{l_i}{c} \quad (2)$$

где  $l_i$  – длина  $i$ -й линии сети, а  $c$  – скорость света.

Линия 2 находится ближе всего к источнику, поэтому напряжение на ней наводится в первую очередь. Согласно формуле (2) через время 1 нс возникает напряжение на линии 1. Это время соответствует длине проводника равного 30 см. Линия 3 находится дальше всего, и напряжение здесь возникает в последнюю очередь.

При более детальном рассмотрении формы наведенного напряжения на линии 2 видно, что вначале оно имеет небольшие колебания. Пики возникают каждые 0,1 нс. Это значение соответствует времени, в течение которого волна напряжения (или тока) должна распространиться вдоль вертикального спуска в начале линии 2 и обратно (0,03м).

Значение времени распространения, при котором волна напряжения (или тока) должна достичь противоположных концов линий электрической сети и вернуться обратно после отражения согласно (2), суммированы и представлены ниже для: 60 см: 2 нс; 140 см: 4,67 нс; 160 см: 5,34 нс.

Пики наведенного напряжения в указанных точках совпадают со значениями, представленными на рис. 10.

На рис. 11 представлено сравнение результатов моделирования и измеренных значений наведенного напряжения на линии 2. Первый пик хорошо сочетается с математическим моделированием. Наблюдается отклонение только по амплитуде, различие которой может быть вызвано пренебрежением потерями в проводниках в математической модели. В таком случае тенденция изменения форм обоих наведенных напряжений аналогична. Примерно через время в 4нс между результатами моделирования и измерений возникают значительные различия. Здесь запланированы дальнейшие исследования имитационной модели электрической сети.

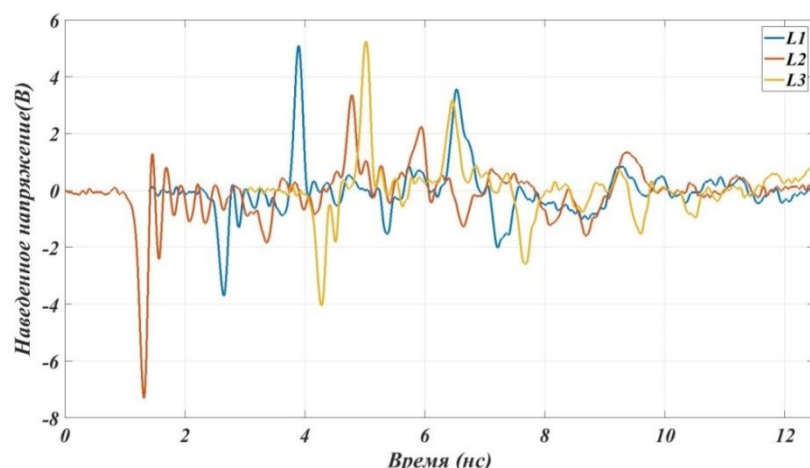


Рис. 10. Наведенные напряжения на концах линейно нагруженной электрической сети во временной области

Сравнение результатов во временной области, полученных в программном комплексе *LTspice*, с экспериментом показало, что амплитуды первых пиков совпадают по времени и величине, но затем отклонения становятся все более различны, что требует дальнейшей проработки математической модели.

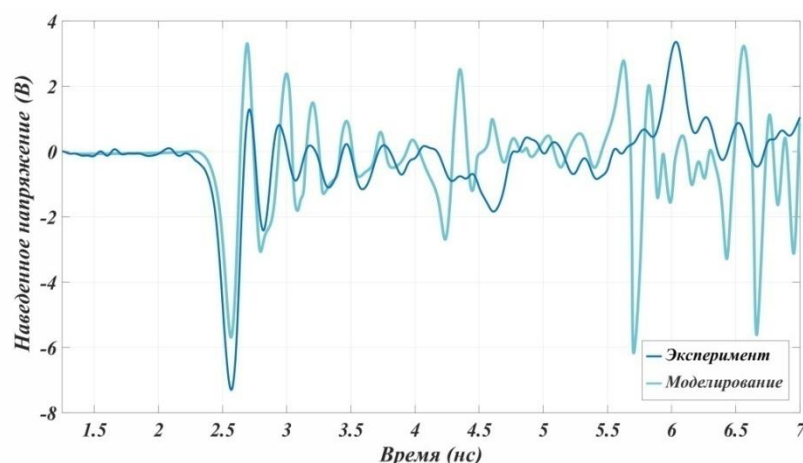


Рис. 11. Наведенное напряжение на конце второго проводника при линейно нагруженной электрической сети

### Обсуждение результатов исследования

С помощью программного комплекса *MATLAB* измеренное наведенное напряжение во временном диапазоне было конвертировано посредством быстрого преобразования Фурье (БПФ) в частотный диапазон. Полученные результаты были сопоставлены с результатами эксперимента в частотном диапазоне. На рис. 12. представлено сравнение результатов для второго проводника.

Видно, что основные резонансы имеют, примерно, одинаковые значения. Имеются различия только по уровням напряжения. В табл. 1 представлено сравнение уровней напряжений (дБ) в точках резонансов.

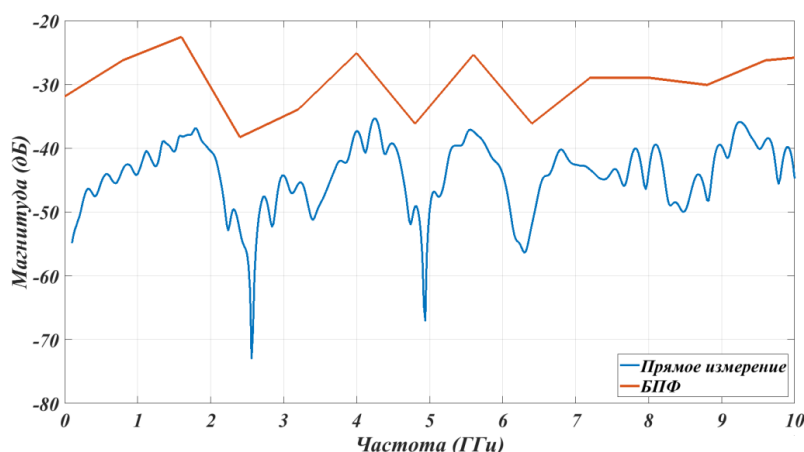


Рис. 12. Сравнение между измеренной АЧХ и АЧХ полученной с помощью БПФ на конце второго проводника

Таблица 1

Сравнение уровней напряжения в точках резонанса для второго проводника

Частота (МГц)	Уровни напряжений (дБ) при прямом измерении	Уровень напряжения (дБ) при БПФ
180	-38	-22
420	-38	-25
560	-38	-25

Разница в уровнях напряжений объясняется различным оборудованием, которое использовалось в экспериментах в частотном и временном диапазонах.

### Заключение

1. Связь «электромагнитное поле – электрическая сеть» играет важную роль в прогнозировании характеристик электромагнитной совместимости технических систем.

2. Результаты данной статьи могут быть использованы при моделировании и прогнозировании электромагнитных процессов возникающих в проводниках и системах электропитания и / или передачи данных, нагруженных на линейную нагрузку.



3. В данной работе электромагнитные помехи в электрической сети, обусловленные плоской электромагнитной волной, были исследованы экспериментально в *GTEM* камере в частотной и временной областях, а также с помощью математического моделирования.

4. На первом этапе электрическая сеть была исследована в частотном диапазоне, и для проверки модели *LTspice*, результаты были сопоставлены с уже существующей имитационной моделью, основанной на уравнениях *BLT* и построенной в программном комплексе *Matlab*. Сравнение полученных результатов продемонстрировало хорошее согласование в частотном диапазоне.

5. Исходя из хорошего согласования результатов моделирования в различных программных комплексах и эксперимента, программное обеспечение *LTspice* может быть использовано для вариантов с линейной нагрузкой во временной области.

6. Практическое применение подхода изложенного в данной статье может быть полезно при разработке конкретных методик по прогнозированию электромагнитной совместимости технических систем (электроснабжения, передачи данных и т.д.) на различных объектах (промышленных предприятиях, летательных аппаратов и т.д.) при воздействии внешних электромагнитных полей.

### Литература

1. Perez R., Ed. Handbook of Electromagnetic Compatibility // 1st ed. London: Academic Press, Jan. 1995.
2. King R. W. P. Transmission-Line Theory // New York: McGraw-Hill Book Company, 1955.
3. Warne S.L.K. Campione, Coasts R.S. Plane Wave Coupling to a Transmission Line Above Ground with Terminating Loads. Advanced Electromagnetics. 2019. V. 8(1). pp. 82-90.
4. Гайнутдинов Р.Р., Чермошенцев С.Ф. Электромагнитная совместимость перспективных авиационных комплексов // Технологии ЭМС. 2018. № 2(65). С. 62-78.
5. Гизатуллин З.М., Гизатуллин Р.М., Зиятдинов И.Н., и др. Моделирование электромагнитных полей линий электропередач на основе теории масштабного эксперимента // Современные инновации в науке и технике: сб. науч. труд. Междунар. науч.-практ. конф. Курск: ЗАО «Университетская книга», 2014. С. 269-272.
6. Гизатуллин З.М., Гизатуллин Р.М., Нуриев М.Г. Математические модели для физического моделирования задач электромагнитной совместимости // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2015. № 1-2. С. 115-122.
7. Гизатуллин Р.М. Сквозное прогнозирование помехоустойчивости вычислительной техники внутри зданий при кондуктивных электромагнитных воздействиях по сети питания // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2012. №5-6. С. 45-53.
8. Paul C.R., Analysis of Multiconductor Transmission Lines // 2nd ed., ser.IEEE Press. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2008.
9. Agrawal A.K., Price H.J and Gurbaxani S.H. Transient response of multiconductor transmission lines excited by a nonuniform electromagnetic field. // IEEETrans. Electromagn. Compat.V. 22. № 2. pp. 119-129.
10. Engelhardt M., LTspice XVII, Analog Devices // Norwood, MA, USA, 2019, <https://www.analog.com/en/design-center/designtools-and-calculators/ltspice-simulator.html>.
11. Xie H., Wang J., Fan R., et al. Application of a SPICE model for multiconductor transmission lines in electromagnetic topology // Progress In Electromagnetics Research Symposium, PIERS, vol. 20, Cambridge, USA, Jul. 2008, pp. 237-241.
12. Kotwal P., Verma G., Katti P.K. Modelling and Analysis of Gigahertz Transverse Electromagnetic Mode (GTEM) Cell // 2019 International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES), July 2019.
13. Test Equity. Rohde and Schwarz ZNLE3, ZNLE6 Vector Network Analyzers // 13 August 2018. <https://www.testequity.com/products/34631/>.
14. Лютаев С. Методы испытаний кабельных жгутов на электромагнитную совместимость // СВЧ-электроника. 2017. №2. С. 64-67
15. Wuytsand D I., De Zutter. Circuit model for plane-wave incidence for multiconductor transmission lines // IEEE Trans. Electromagn. Compat. V. 36. № 3. pp. 206-212.
16. Microwaves 101. S-parameters, 28 June 2017 <https://www.microwaves101.com/encyclopedias/s-parameters>.

### Автор публикации

**Галеев Линар Маратович** – аспирант, Казанского национального исследовательского технического университета им. А. Н. Туполева – КАИ. E-mail: [galeev.linar93@gmail.com](mailto:galeev.linar93@gmail.com)

## References

1. Perez R, Ed. *Handbook of Electromagnetic Compatibility*. 1st ed. London: Academic Press, Jan. 1995.
2. King RWP. *Transmission-Line Theory*. New York: McGraw-Hill Book Company, 1955.
3. Warne SLK, Campione, Coasts R.S. Plane Wave Coupling to a Transmission Line Above Ground with Terminating Loads. *Advanced Electromagnetics*. 2019;8(1):82-90.
4. Gaynutdinov RR, Chermoshentsev SF. Electromagnetic compatibility of perspective aviation complexes. *Technologies of electromagnetic compatibility*. 2018;2(65):62-78.
5. Gizatullin ZM, Gizatullin RM, Ziatdinov IN, et al. *Modeling of electromagnetic fields of transmission lines based on the theory of a large-scale experiment*. Modern Innovations in Science and Technology Symposium. Kursk. 2014. pp. 269-272.
6. Gizatullin ZM, Gizatullin RM, Nuriev MG. Mathematical models for physical modeling problems of electromagnetic compatibility. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2015;(1-2):115-122. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2015-0-1-2-115-122>.
7. Gizatullin RM. End-to-end prediction of noise immunity of computer equipment inside buildings with conductive electromagnetic effects on the power supply network. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2012. pp.45-53.
8. Paul CR., *Analysis of Multiconductor Transmission Lines*, 2nd ed., ser. IEEE Press. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2008.
9. Agrawal AK, Price HJ and Gurbaxani SH. *Transient response of multiconductor transmission lines excited by a nonuniform electromagnetic field*. IEEE Trans. Electromagn. Compat. 1980;22(2):119–129.
10. Engelhardt M, LTspice. XVII. *Analog Devices*. Norwood, MA, USA, 2019, <https://www.analog.com/en/design-center/designtools-and-calculators/ltspice-simulator.html>.
11. Xie H, Wang J, Fan R, et al. *Application of a SPICE model for multiconductor transmission lines in electromagnetic topology*. In Progress In Electromagnetics Research Symposium, PIERS. Cambridge, USA, Jul. 2008;20:237–241.
12. Kotwal P, Verma G, Katti PK. *Modelling and Analysis of Gigahertz Transverse Electromagnetic Mode (GTEM) Cell*. 2019 International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES), July 2019.
13. *Test Equity*. Rohde and Schwarz ZNLE3, ZNLE6 Vector Network Analyzers, 13 August 2018. <https://www.testequity.com/products/34631/>.
14. Lytaev S. EMC cable harness test methods. *Microwave electronics*. 2017; 2:64-67.
15. Wuyts I and Zutter DDe. Circuit model for plane-wave incidence formulticonductor transmission lines. IEEE Trans. *Electromagn. Compat.* 1994;36(3):206–212.
16. *Microwaves 101. S-parameters*, 28 June 2017. <https://www.microwaves101.com/encyclopedias/s-parameters>.

## Authors of the publication

**Linar M. Galeev** – Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia. E-mail: [galeev.linar93@gmail.com](mailto:galeev.linar93@gmail.com).

*Поступила в редакцию*

*05 июня 2020 г.*