



УДК 537.8:631.17

Е.В. Титов, А.А. Сошников, А.В. Пинчук
Ye.V. Titov, A.A. Soshnikov, A.V. Pinchuk

**ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ
В УСЛОВИЯХ КОМПЛЕКСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ**

**APPLICATION OF INFORMATION MODELING TECHNOLOGY FOR VISUALIZATION
OF THE DANGER OF ELECTROMAGNETIC ENVIRONMENT UNDER THE CONDITIONS
OF COMPLEX EXPOSURE TO ELECTROMAGNETIC RADIATION**

Ключевые слова: электромагнитные излучения, интеллектуализированная система, автоматизированный контроль, визуализация электромагнитной обстановки, совокупное воздействие электромагнитного поля, компьютерное моделирование, комбинированные картины опасности ЭМИ, электромагнитная совместимость.

Рассматриваются вопросы визуализации электромагнитной обстановки на объектах с источниками электромагнитного излучения (ЭМИ) широкого диапазона частот. Для исследования распространения электромагнитных волн и обеспечения электромагнитной совместимости в различных сферах производства и в быту в условиях неопределенности частотных диапазонов и характера распределения в пространстве электромагнитного поля (ЭМП) предложен подход, основанный на формировании электромагнитных портретов (в виде распределения в пространстве контролируемых составляющих электромагнитного поля) и картин опасности электромагнитных излучений (в форме карт допустимого времени пребывания). Электромагнитные портреты и картины опасности электромагнитных излучений получают по результатам ограниченного числа измерений и моделирования электромагнитного поля с учётом возможности одновременного влияния и

усиления результирующего действия нескольких источников электромагнитного излучения. Представлены структура и техническая характеристика базовой модификации интеллектуализированной системы. Приведены алгоритмы обработки и управления электромагнитными сигналами, а также пространственная модель помещения с источниками ЭМИ. Рассмотрены принципы функционирования интеллектуализированной системы. Описан новый способ по формированию комбинированных картин опасности электромагнитных излучений, основанный на принципах преобразования картин распределения контролируемых составляющих электромагнитного поля в различных зонах исследуемого пространства. Сформулирован вывод о возможности использования разработанной интеллектуализированной системы для контроля и визуализации опасности электромагнитной обстановки на объектах с источниками ЭМИ, в том числе в условиях комплексного воздействия нескольких составляющих ЭМП. Кроме этого моделируемые картины опасности с уточненными значениями допустимого времени пребывания в зонах комплексного воздействия ЭМИ предлагается использовать для обоснования защитных мероприятий с учетом частотного диапазона каждой из контролируемых составляющих электромагнитного поля.

Keywords: *electromagnetic radiation (EMR), intellectualized system, automated control, visualization of the electromagnetic environment, complex effects of electromagnetic fields, computer modeling, complex pictures of danger of EMR, electromagnetic compatibility.*

This paper discusses the issues of visualization of the electromagnetic environment on objects with sources of electromagnetic radiation of a wide range of frequencies. An approach based on the formation of electromagnetic portraits (in the form of distribution of the controlled components of the electromagnetic field in space) and pictures of the danger of electromagnetic radiations is proposed (in the form of valid stay cards) to study the propagation of electromagnetic waves and ensure electromagnetic compatibility in various areas of production and in everyday life under conditions of uncertainty of frequency ranges and the nature of distribution in the space of the electromagnetic field. Electromagnetic portraits and pictures of the danger of electromagnetic radiation are obtained from a limited number of measurements and modeling of the electromagnetic field, taking into account the possibility of simultaneous

influence and amplification of the resulting action of several sources of electromagnetic radiation. The structure and technical characteristics of the basic modification of the intellectualized system are presented. Algorithms for processing and controlling electromagnetic signals and a spatial model of a room with sources of electromagnetic radiation are presented. The principles of functioning of the intellectualized system are considered. A new method for forming combined pictures of the danger of electromagnetic radiation is described. It is based on the principles of transforming the distribution patterns of the controlled components of the electromagnetic field in different zones of the studied space. The conclusion is formulated about the possibility of using the developed intellectualized system for monitoring and visualization of the danger of the electromagnetic situation on objects with sources of electromagnetic radiation and under the conditions of complex influence of several components of the electromagnetic field. It is proposed to use simulated hazard pictures with specified values of the allowed time of stay in the zones of complex exposure to electromagnetic radiation to justify protective measures taking into account the frequency range of each of the controlled components of the electromagnetic field.

Титов Евгений Владимирович, к.т.н., доцент каф. «Электрификация производства и быта», Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. Тел.: (3852) 36-71-29. E-mail: 888tev888@mail.ru.

Сошников Александр Андреевич, д.т.н., проф., каф. «Электрификация производства и быта», Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. Тел.: (3852) 36-71-29. E-mail: aa@soshnikov.info.

Пинчук Антонина Владимировна, студент, энергетический факультет, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. E-mail: vodonog36@gmail.com.

Titov Yevgeniy Vladimirovich, Cand. Tech. Sci., Asst. Prof., Chair of Electrification of Production and Household, Altai State Technical University named after I.I. Polzunov. Ph.: (3852) 36-71-29. E-mail: 888tev888@mail.ru.

Soshnikov Aleksandr Andreyevich, Dr. Tech. Sci., Prof., Chair of Electrification of Production and Household, Altai State Technical University named after I.I. Polzunov. Ph.: (3852) 36-71-29. E-mail: aa@soshnikov.info.

Pinchuk Antonina Vladimirovna, student, Altai State Technical University named after I.I. Polzunov. E-mail: vodonog36@gmail.com.

Введение

Интенсивное использование электромагнитной энергии в современном мире привело к глобальному электромагнитному загрязнению окружающей среды. Источники электромагнитных полей (ЭМП) получают всё более широкое распространение в различных сферах жизнедеятельности человека, включая производственные и коммунально-бытовые объекты. Усиливается воздействие на информационно-технологическое оборудование, в том числе постро-

енное на основе микропроцессорных устройств, а также на биологические объекты, что повышает актуальность обеспечения электромагнитной совместимости [1-18].

Известные способы инструментального контроля имеют узкую область применения в силу того, что основаны на измерении отдельных составляющих ЭМП, не учитывают воздействие ЭМИ от нескольких источников в широком частотном диапазоне (до 3 ТГц) [1-6]. Кроме этого проблематичным является формирование объективной компьютерной

модели электромагнитной обстановки с учетом комбинированного влияния электромагнитных излучений [7-13]. Существующие системы контроля имеют ограниченную область применения в силу того, что не позволяют проводить контроль составляющих ЭМП во всех нормируемых частотных диапазонах до 3 ТГц и формировать электромагнитные портреты (в виде картин распределения в пространстве составляющих электромагнитного поля) и картины опасности ЭМИ (в форме карт допустимого времени пребывания человека) в условиях комбинированного воздействия [14-18].

Целью выполненных научных исследований явилось решение проблемы контроля и визуализации электромагнитной обстановки в условиях влияния нескольких источников электромагнитного излучения (ЭМИ) для обоснованного выбора защитных мероприятий на основании реализации разработанных принципов многочастотного контроля параметров электромагнитного поля.

Объекты и методы

Для автоматизации результатов измерений параметров электромагнитного поля и построения картин опасности в зонах влияния нескольких источников ЭМИ на разных частотах предлагается использовать разработанную интеллектуализированную систему, представляющую собой аппаратно-программный комплекс и позволяющую в режиме реального времени фиксировать результаты измерения и оценивать электромагнитную обстановку в расширенном до 3 ТГц частотном диапазоне [19-22].

Интеллектуализированная система состоит из блока измерительных датчиков и приборов (например, со следующим вариантом комплектации измерителями ИПЭП-1, МТМ-01, ПЗ-50, ВЕ-метр АТ-004, ПЗ-41, ИПП-2 (для измерения соответственно напряженности электростатического, посто-

янного магнитного, переменных электрического и магнитного полей промышленной частоты, электрического и магнитного полей радиочастотного диапазона 30 кГц – 300 МГц, плотности потока энергии в диапазоне частот 300 МГц – 40 ГГц, 300 ГГц – 3 ТГц) и анализатора спектра электромагнитных излучений (АКС-1201), набора аппаратных адаптеров для подключения приборов к ЭВМ, со специально разработанным программным обеспечением. Схема подключения измерительных приборов (в базовой комплектации) к персональному компьютеру (ЭВМ) представлена на рисунке 1 [19, 20].

На рисунке 2 представлен вариант комплектации интеллектуализированной системы для проведения измерений напряженности электрического поля на частотах 50 Гц – 300 МГц (для этого в систему интегрируются приборы ВЕ-метр АТ-004, ПЗ-41 и АКС-1201).

Техническая характеристика разработанной системы приведена в таблице.

Данные, поступающие на персональный компьютер в период измерений, сохраняются в базу данных, которая формируется для каждого исследования. Схема записи поступающих экспериментальных данных в базу системы с указанием возможных источников данных представлена на рисунке 3.

Измерительные данные могут поступать либо с подключенного к ЭВМ оборудования, если в составе измерительного прибора имеется интерфейсный модуль для связи с ЭВМ, либо с клавиатуры ЭВМ, когда соответствующий интерфейсный модуль в составе измерительного прибора отсутствует. Кроме этого рассматривается возможность преобразования уже имеющихся массивов данных в форматы, совместимые с форматом интеллектуализированной системы.

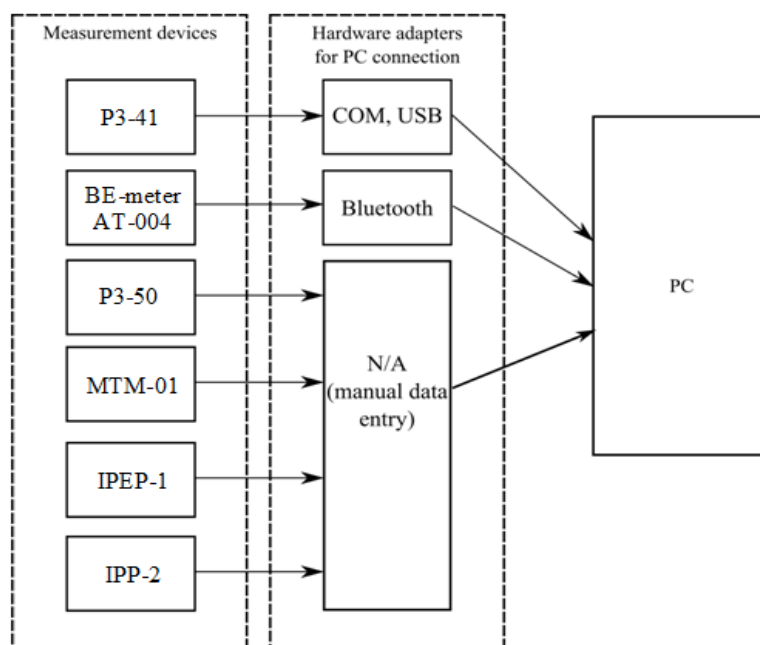


Рис. 1. Схема подключения измерительных приборов к ЭВМ (в базовой комплектации интеллектуализированной системы)

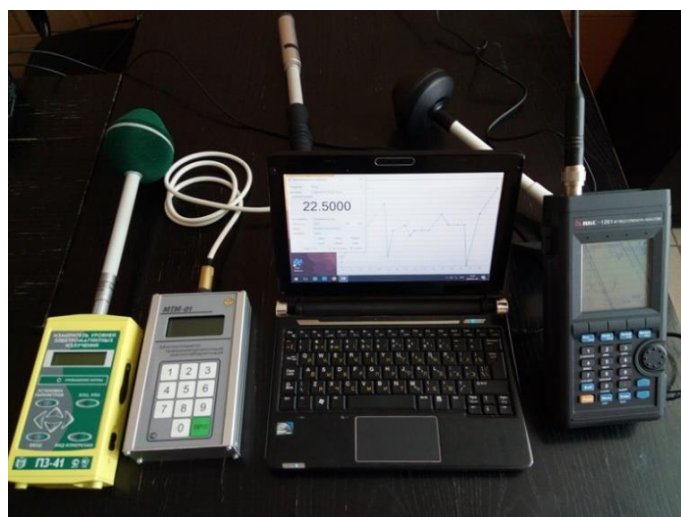


Рис. 2. Возможная модификация интеллектуализированной системы

Таблица

Техническая характеристика интеллектуализированной системы

Вид характеристики	Значение характеристики
Измерительное оборудование	ИПЭП-1, МТМ-01, ПЗ-50, ВЕ-метр АТ-004, ПЗ-41, ИПП-2, АКС-1201
Контролируемый диапазон частот электрического поля	0 Гц (электростатическое поле), 48-52 Гц, 10 кГц – 300 МГц
Контролируемый диапазон частот магнитного поля	0 Гц (постоянное магнитное поле), 48-52 Гц, 10 кГц – 50 МГц
Контролируемый диапазон частот плотности потока энергии	300 МГц – 40 ГГц, 300 ГГц – 3 ТГц
Электрическое питание	Встроенные аккумуляторы ноутбука и оборудования, возможно питание от бытовой электросети
Время автономной работы	20 ч

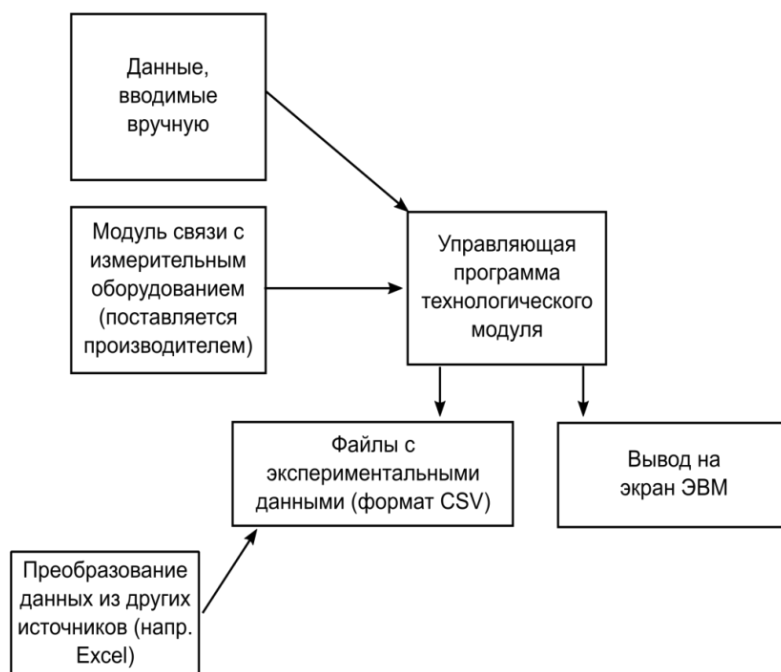


Рис. 3. Схема записи экспериментальных данных

В дальнейшем (после завершения этапа измерений) экспериментальные данные обрабатываются аналитическим программным обеспечением, также входящим в состав интеллектуализированной системы. На рисунке 4 представлена схема обработки экспериментальных данных [20, 21].

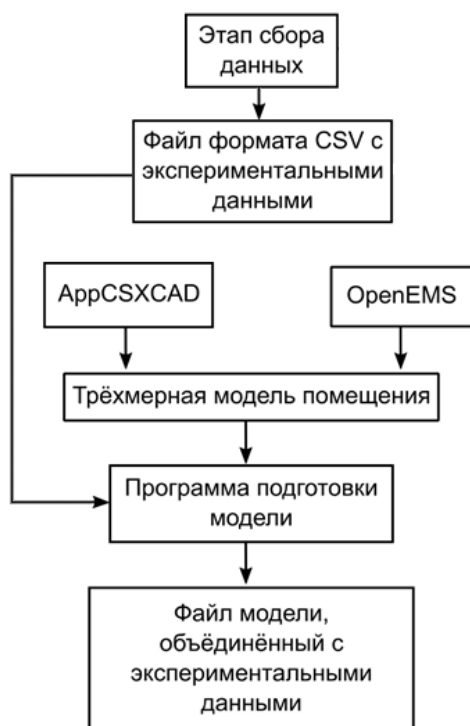


Рис. 4. Схема обработки экспериментальных данных

Экспериментальная часть

В основу функционирования интеллектуализированной системы положены следующие принципы.

По результатам измерения геометрической формы помещения либо требуемой области исследования контролируемого пространства, линейных размеров и взаимного расположения источников ЭМИ строится компьютерная трёхмерная модель исследуемого пространства с учетом всех источников излучения [19], пример которой показан на рисунке 5. При этом каждый объект представляется в форме параллелепипеда, а все размеры на трёхмерной модели отмечаются с точностью в соответствии с шагом пространственной сетки: 5 см.

Используемая для создания трёхмерных моделей программа AppCSXCAD [23] позволяет указывать электромагнитные свойства размещаемых на плане объектов.

По результатам спектральной диагностики электромагнитной обстановки выявляются измеренные параметры, значения которых превышают либо соответствуют предельно допустимым уровням.

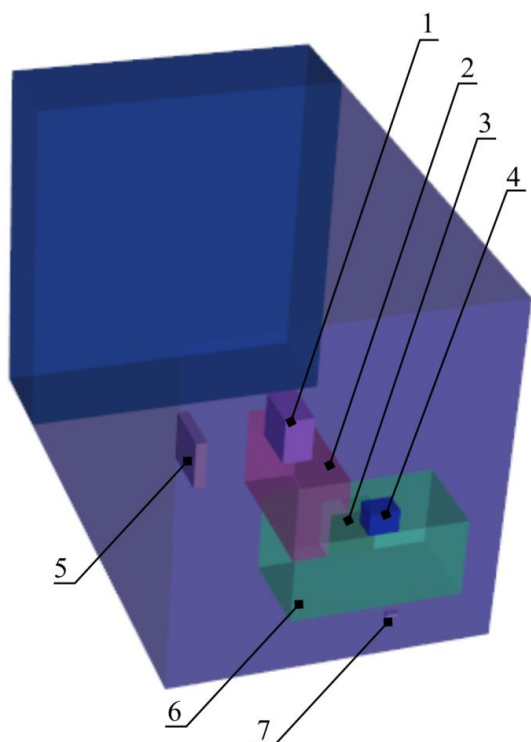


Рис. 5. Пространственная модель помещения с источниками ЭМИ:
1 – LCD-монитор; 2 – стол;
3 – системный блок ЭВМ; 4 – ноутбук;
5 – обогреватель; 6 – стол;
7 – зарядное устройство ноутбука

Проводится измерение значений основных контролируемых параметров ЭМП (напряжённостей электрического и магнитного полей, плотности потока энергии) в выбранных нормируемых частотных диапазонах (от постоянных полей до переменных, включая промышленную частоту, частотные диапазоны 10-30 кГц, 30 кГц – 3 МГц, 3 МГц – 30 МГц, 30 МГц – 50 МГц, 50 МГц – 300 МГц, 300 МГц – 300 ГГц, 300 ГГц – 3 ТГц) на нормируемых в соответствии с действующими нормативно-правовыми документами расстояниях от центральной части каждой грани источника ЭМИ. При этом измерения проводят и вблизи вторичных источников и наиболее опасных точечных зон, выбираемых по результатам первичного тепловизионного обследования.

По каждому из выбранных значений измеренных параметров ЭМП для соответ-

ствующих частотных диапазонов осуществляют компьютерное моделирование [19-21], в результате которого получают набор электромагнитных портретов (в виде распределения в пространстве контролируемых составляющих электромагнитного поля) (рис. 6).

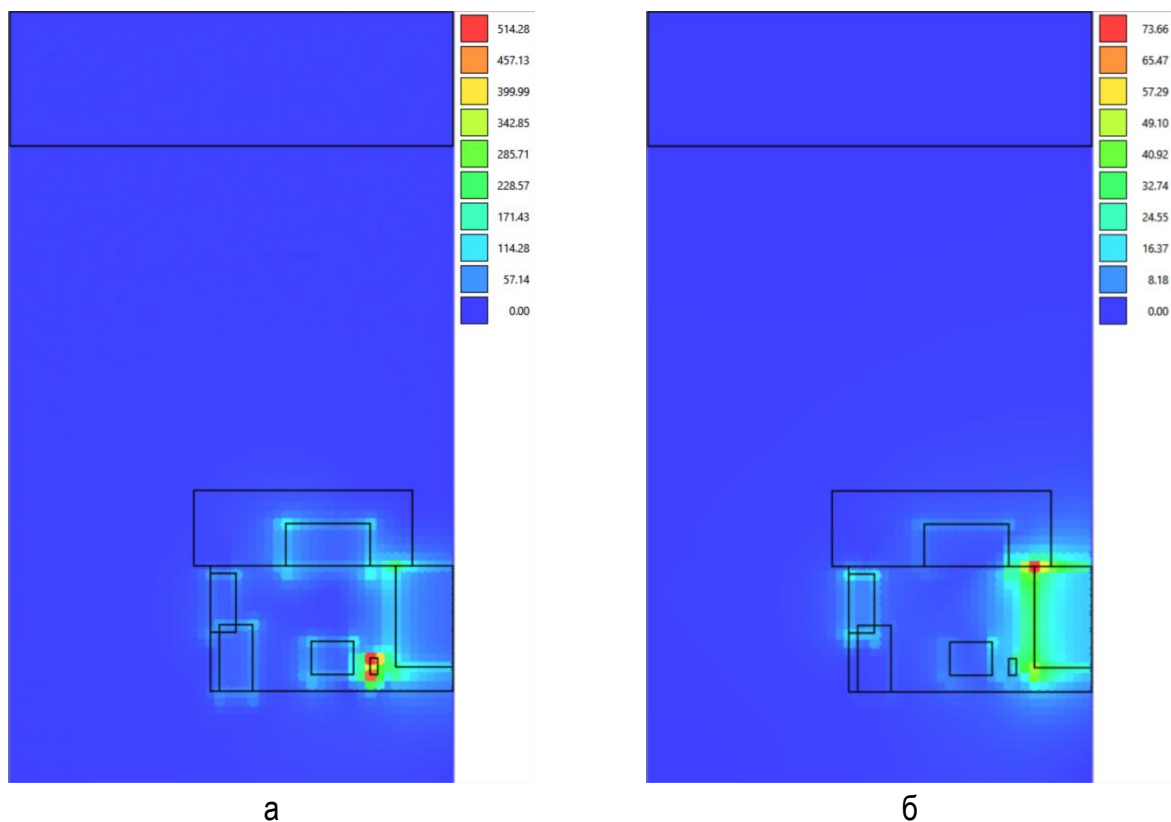
Для оценки состояния электромагнитной обстановки производится моделирование ЭМП в контролируемом пространстве методом конечных разностей во временной области (FDTD метод) [7-15, 19-22]. Сущность FDTD метода заключается в разбиении моделируемого пространства на участки правильной формы (как правило, кубическую сетку) и выполнении моделирования с учётом распространения электромагнитного излучения от источников в соседние ячейки в соответствии с уравнениями Максвелла в конечно-разностной форме [13].

Для выполнения моделирования интеллектуализированная система использует открытую библиотеку программного кода OpenEMS [24], которая предоставляет эффективные алгоритмы исполнения на современных процессорах, что позволяет существенно сократить временные затраты.

Библиотека OpenEMS реализована на языке программирования C++, а интеграция с этой библиотекой возможна с помощью математических платформ MATLAB или GNU Octave. Для запуска процесса моделирования в OpenEMS нами разработана программа, написанная на языке GNU Octave.

Входными данными для OpenEMS являются:

- трёхмерная модель контролируемого пространства;
- расположение и типы источников ЭМИ (по критерию нормирования);
- частота моделируемого параметра ЭМП;
- виды используемых граничных условий [21].



**Рис. 6. Точечные картины электрического поля (В/м):
а – на частоте 30 кГц; б – на частоте 3 МГц**

Результаты и их обсуждение

Каждый из полученных электромагнитных портретов используется для формирования картин опасности ЭМИ путем преобразования узловых значений шкал напряженности электрического, магнитного полей или плотности потока энергии в узловые значения допустимого времени пребывания в опасных зонах.

На основании анализа картин опасности выявляются области исследуемого пространства с наложенными зонами опасности, создаваемыми контролируруемыми составляющими ЭМП.

В случае совокупного (комбинированного) воздействия ЭМИ формирование картины опасности, называемой далее наложенной картиной, является весьма сложной задачей, которая может иметь неоднозначные решения.

Одним из способов получения объективной картины опасности, учитывающей усиление результирующего действия ЭМИ при комплексном воздействии, является предложенный нами способ построения наложенной картины опасности, основанный на выделении области пересечения накладываемых зон, как показано на рисунке 7.

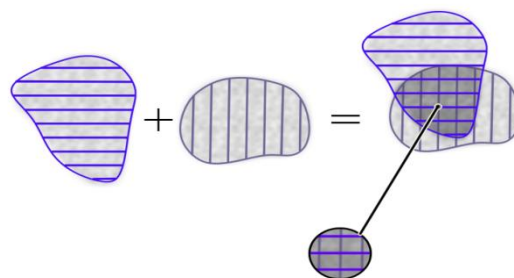


Рис. 7. Принцип выделения области пересечения накладываемых зон опасности

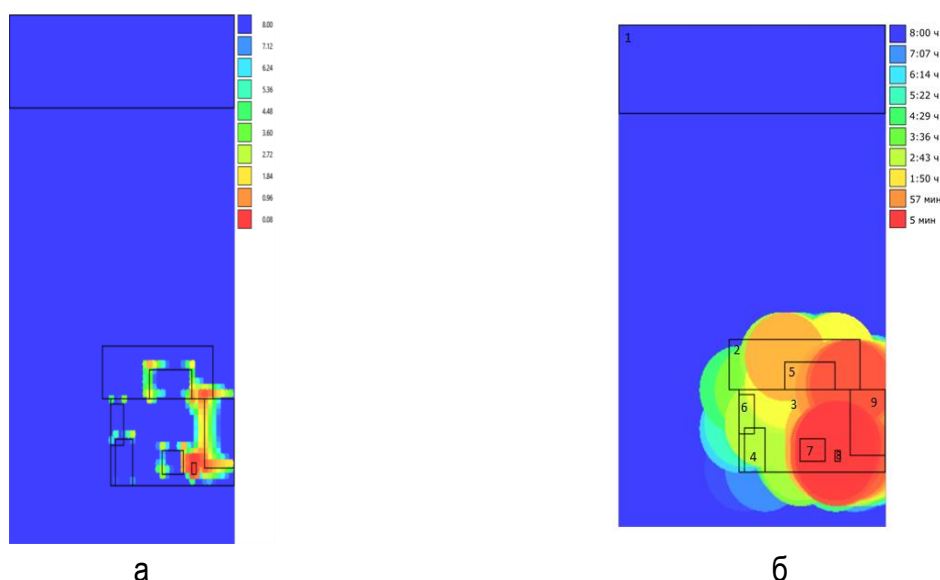


Рис. 8. Комбинированные точечная (а) и цилиндрическая (б) картины опасности электромагнитного поля (ч)

При этом комбинированная точечная картина опасности (рис. 8 а) представляет собой изображение в виде цветных областей, окрашенных в различные тона в зависимости от числового значения допустимого времени. Справа от картины указывается шкала допустимого времени пребывания человека в различных зонах контролируемого пространства, с помощью которой можно визуально определить потенциально опасные зоны в зависимости от цветового оттенка изображения в любой области моделируемого пространства.

Если необходимо учесть возможные диапазоны рабочего пространства людей на контролируемых объектах (чаще всего производственных) и исключить различные значения допустимого времени пребывания для различных точек одной области рабочего пространства, то формируется комбинированная цилиндрическая картина опасности, представляющая пространственную совокупность цилиндрических зон контролируемого пространства с заранее заданным радиусом, каждая из которых характеризуется

одним значением допустимого времени пребывания человека (рис. 8 б).

Заключение

Таким образом, разработанная интеллектуализированная система позволяет контролировать и визуализировать степень опасности электромагнитной обстановки на объектах с источниками ЭМИ, в том числе в условиях комплексного воздействия нескольких составляющих электромагнитного поля.

Для областей исследуемого пространства в условиях отсутствия наложения опасных временных зон, полученные картины можно использовать для обоснования защитных мероприятий по обеспечению электромагнитной безопасности в широком частотном диапазоне исследуемых составляющих ЭМП.

Для контроля объектов с наложением зон опасности предлагается формировать картины опасности в областях пересечения этих зон, учитывающие усиление результирующего действия ЭМИ в условиях комплексного воздействия. Полученные карти-

ны опасности с уточненными значениями допустимого времени пребывания в зонах комплексного воздействия ЭМИ можно применять для обоснования защитных мероприятий по обеспечению электромагнитной безопасности.

Библиографический список

1. Lin H., Takahashi M., Saito K., Ito K. (2013). Characteristics of Electric Field and Radiation Pattern on Different Locations of the Human Body for In-Body Wireless Communication. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 61 (10): 5350-5354, <https://doi.org/10.1109/TAP.2013.2272672>.
2. Jinyu Z., Yifan Z. (2018). Combined Exposure Ratio Evaluation for Micro-Power Devices. *IEEE Access*. 6: 19175-19181. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2812795>.
3. Guo J., Rachidi F., Tkachenko S.V., Xie Y. (2019). Calculation of High-Frequency Electromagnetic Field Coupling to Overhead Transmission Line Above a Lossy Ground and Terminated With a Nonlinear Load. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 67 (6): 4119-4132. <https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2902743>.
4. Beura C.P., Beltle M., Tenbohlen S. (2019). Positioning of UHF PD Sensors on Power Transformers Based on the Attenuation of UHF Signals. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 34 (4): 1520-1529. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2019.2909588>.
5. Trincherо D., et al. (2009). Field Probes Performance for the Measurement of Spread-Spectrum Radio Signals. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 8: 494-497. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2009.2020309>.
6. Okrainskaya I.S., Gladyshev S.P., Sidorov A.I. (2015). Investigation of the magnetic field intensity near the equipment of the 500 kV power substation. *IEEE International Conference on Electro/Information Technology (EIT)*, Dekalb, IL, 2015, pp. 184-187. <https://doi.org/10.1109/EIT.2015.7293338>.
7. Choi H., Baek J., Jung K. Comprehensive Study on Numerical Aspects of Modified Lorentz Model Based Dispersive FDTD Formulations. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. <https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2934779>
8. Dowd B.W., Diaz R.E. (2018). FDTD Simulation of Very Large Domains Applied to Radar Propagation Over the Ocean. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 66 (10): 5333-5348. <https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2852141>.
9. Zhu D., Chen H., Yang J., Yi Y., Chen B. (2019). A Novel Efficient WLP-Based BOR FDTD Method with Explicit Treating Ideology. *IEEE Access*. 7: 16858-16869. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2894788>.
10. Lup A., Ciuprina G., Ioan D., et al. (2018). Parametric macromodels for the RF behaviour of capacitive switches. *2018 International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE)*, Bucharest, Romania. 1-6. <https://doi.org/10.1109/ISFEE.2018.8742418>.
11. Zhang F., Sun Q., Zhu J., Joines W.T., Liu Q.H. (2018). An Accurate 3-D CFS-PML Based Crank–Nicolson FDTD Method and Its Applications in Low-Frequency Subsurface Sensing. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 66 (6): 2967-2975. <https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2816788>.
12. Bao H.G., Ding D.Z., Chen R.S. (2017). A Hybrid Spectral-Element Finite-Difference Time-Domain Method for Electromagnetic Simulation. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 16: 2244-2248. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2017.2711001>.
13. Ralchenko M., Roper M., Samson C., Svilans M. (2018). Near-Field VLF Electromag-

netic Signal Propagation in Multistory Buildings. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 66 (2): 848-856. <https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2783321>.

14. Jianxuan L., Zhihua Z., Xiangming Z., et al. (2018). Real-time Measurement and Evaluation System of Electromagnetic Field Emission with Short-time Frequency Conversion Based on Virtual Instrument Technology. 2018 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (CSQRWC), Xuzhou, 2018, pp. 1-3. <https://doi.org/10.1109/CSQRWC.2018.8455680>.

15. Djuric N., Kavecic N., Mitic M., Radosavljevic N. (2019). The EMF RATEL Service for Monitoring and Public Informing on EMF Exposure," *IEEE INFOCOM 2019 - IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, Paris, France, 2019, pp. 909-910. <https://doi.org/10.1109/INFOCOMW.2019.8845229>.

16. Wang H., et al. (2018). A Millimeter-Wave Broadband in situ Alignment and Monitor System Based on Interferometric Direction-Finding Antenna. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 46 (6): 1990-1994. <https://doi.org/10.1109/TPS.2018.2829904>.

17. Guo X., Zhang Y., Chen Z., et al. (2018). Distributed Electromagnetic Spectrum Detection System Based on Self-organizing Network. 2018 12th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE), Hangzhou, China, 2018, pp. 1-5. <https://doi.org/10.1109/ISAPE.2018.8634175>.

18. Botero-Valencia J., Castano-Londono L., Marquez-Viloria D., Rico-Garcia M. (2019). Data Reduction in a Low-Cost Environmental Monitoring System Based on LoRa for WSN. *IEEE Internet of Things Journal*. 6 (2): 3024-3030. <https://doi.org/10.1109/IJOT.2018.2878528>.

19. Titov E., Migalyov I. (2017). The technology of electromagnetic radiation danger estimation using the hardware-software module. *MATEC Web of Conferences*, 102. 01035, DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201710201035>.

20. Soshnikov A.A., Migalev I.E., Titov E.V. *Russian Electrical Engineering* (2018) 89: 685. <https://doi.org/10.3103/S106837121812009X>.

21. Soshnikov A.A., Titov E.V., Migalev I.E. Using Multiparametric Control System to Choose Electromagnetic Radiation Protection Measures. 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russia, 2019, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2019.8743041>.

22. Migalev I.E., Soshnikov A.A., Titov E.V. Technology of Electromagnetic Radiation Danger Presentation. 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (Ural-Con), Chelyabinsk, Russia, 2019, pp. 169-173. <https://doi.org/10.1109/URALCON.2019.8877609>.

23. Liebig T. AppCSXCAD - Minimal GUI Application using the QCSXCAD library: <https://github.com/thliebig/AppCSXCAD>.

24. Liebig T. OpenEMS – open electromagnetic field solver. General; Theoretical Electrical Engineering (ATE), University of Duisburg-Essen: <http://openEMS.de>.

References

1. Lin H., Takahashi M., Saito K., Ito K. (2013). Characteristics of Electric Field and Radiation Pattern on Different Locations of the Human Body for In-Body Wireless Communication. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 61 (10): 5350-5354, <https://doi.org/10.1109/TAP.2013.2272672>.

2. Jinyu Z., Yifan Z. (2018). Combined Exposure Ratio Evaluation for Micro-Power De-

vices. *IEEE Access*. 6: 19175-19181. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2812795>.

3. Guo J., Rachidi F., Tkachenko S.V., Xie Y. (2019). Calculation of High-Frequency Electromagnetic Field Coupling to Overhead Transmission Line Above a Lossy Ground and Terminated With a Nonlinear Load. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 67 (6): 4119-4132. <https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2902743>.

4. Beura C.P., Beltle M., Tenbohlen S. (2019). Positioning of UHF PD Sensors on Power Transformers Based on the Attenuation of UHF Signals. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 34 (4): 1520-1529. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2019.2909588>.

5. Trincherо D., et al. (2009). Field Probes Performance for the Measurement of Spread-Spectrum Radio Signals. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 8: 494-497. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2009.2020309>.

6. Okrainskaya I.S., Gladyshev S.P., Sidorov A.I. (2015). Investigation of the magnetic field intensity near the equipment of the 500 kV power substation. *IEEE International Conference on Electro/Information Technology (EIT)*, Dekalb, IL, 2015, pp. 184-187. <https://doi.org/10.1109/EIT.2015.7293338>.

7. Choi H., Baek J., Jung K. Comprehensive Study on Numerical Aspects of Modified Lorentz Model Based Dispersive FDTD Formulations. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. <https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2934779>

8. Dowd B.W., Diaz R.E. (2018). FDTD Simulation of Very Large Domains Applied to Radar Propagation Over the Ocean. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 66 (10): 5333-5348. <https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2852141>.

9. Zhu D., Chen H., Yang J., Yi Y., Chen B. (2019). A Novel Efficient WLP-Based BOR

FDTD Method with Explicit Treating Ideology. *IEEE Access*. 7: 16858-16869. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2894788>.

10. Lup A., Ciuprina G., Ioan D., et al. (2018). Parametric macromodels for the RF behaviour of capacitive switches. *2018 International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE)*, Bucharest, Romania. 1-6. <https://doi.org/10.1109/ISFEE.2018.8742418>.

11. Zhang F., Sun Q., Zhu J., Joines W.T., Liu Q.H. (2018). An Accurate 3-D CFS-PML Based Crank–Nicolson FDTD Method and Its Applications in Low-Frequency Subsurface Sensing. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 66 (6): 2967-2975. <https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2816788>.

12. Bao H.G., Ding D.Z., Chen R.S. (2017). A Hybrid Spectral-Element Finite-Difference Time-Domain Method for Electromagnetic Simulation. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 16: 2244-2248. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2017.2711001>.

13. Ralchenko M., Roper M., Samson C., Svilans M. (2018). Near-Field VLF Electromagnetic Signal Propagation in Multistory Buildings. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 66 (2): 848-856. <https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2783321>.

14. Jianxuan L., Zhihua Z., Xiangming Z., et al. (2018). Real-time Measurement and Evaluation System of Electromagnetic Field Emission with Short-time Frequency Conversion Based on Virtual Instrument Technology. *2018 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (CSQRWC)*, Xuzhou, 2018, pp. 1-3. <https://doi.org/10.1109/CSQRWC.2018.8455680>.

15. Djuric N., Kavecан N., Mitic M., Radosavljevic N. (2019). The EMF RATEL Service for Monitoring and Public Informing on EMF Exposure," *IEEE INFOCOM 2019 - IEEE Conference*

on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), Paris, France, 2019, pp. 909-910. <https://doi.org/10.1109/INFOCOMW.2019.8845229>.

16. Wang H., et al. (2018). A Millimeter-Wave Broadband in situ Alignment and Monitor System Based on Interferometric Direction-Finding Antenna. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 46 (6): 1990-1994. <https://doi.org/10.1109/TPS.2018.2829904>.

17. Guo X., Zhang Y., Chen Z., et al. (2018). Distributed Electromagnetic Spectrum Detection System Based on Self-organizing Network. 2018 12th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE), Hangzhou, China, 2018, pp. 1-5. <https://doi.org/10.1109/ISAPE.2018.8634175>.

18. Botero-Valencia J., Castano-Londono L., Marquez-Viloria D., Rico-Garcia M. (2019). Data Reduction in a Low-Cost Environmental Monitoring System Based on LoRa for WSN. *IEEE Internet of Things Journal*. 6 (2): 3024-3030. <https://doi.org/10.1109/IJOT.2018.2878528>.

19. Titov E., Migalyov I. (2017). The technology of electromagnetic radiation danger estimation using the hardware-software module. *MATEC Web of Conferences*, 102. 01035, DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201710201035>.

20. Soshnikov A.A., Migalev I.E., Titov E.V. *Russian Electrical Engineering* (2018) 89: 685. <https://doi.org/10.3103/S106837121812009X>.

21. Soshnikov A.A., Titov E.V., Migalev I.E. Using Multiparametric Control System to Choose Electromagnetic Radiation Protection Measures. 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russia, 2019, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2019.8743041>.

22. Migalev I.E., Soshnikov A.A., Titov E.V. Technology of Electromagnetic Radiation Danger Presentation. 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (Ural-Con), Chelyabinsk, Russia, 2019, pp. 169-173. <https://doi.org/10.1109/URALCON.2019.8877609>.

23. Liebig T. AppCSXCAD - Minimal GUI Application using the QCSXCAD library: <https://github.com/thliebig/AppCSXCAD>.

24. Liebig T. OpenEMS – open electromagnetic field solver. General; Theoretical Electrical Engineering (ATE), University of Duisburg-Essen: <http://openEMS.de>.

Работа выполнена в Алтайском государственном техническом университете им. И.И. Ползунова при поддержке Российского научного фонда (грант 20-19-00091).

