

EDN: VDXOQI

УДК 537.86: 621.3.09

Assessment of the Electromagnetic Environment in Zones of Simultaneous Influence of Several Sources at Different Distances and Generation of Waves in One Measurement Plane

Evgeny V. Titov^a,
Alexander S. Solovskoy^{*a} and Elena B. Osmushkina^b

*^aPolzunov Altai State Technical University
Barnaul, Russian Federation*

*^bLimited Liability Company “Intek”
Novosibirsk, Russian Federation*

Received 12.01.2024, received in revised form 13.01.2024, accepted 24.02.2024

Abstract. The article deals with the issues of electromagnetic environment assessment in the zones of simultaneous influence of several sources at different distances from the control point, emitting electromagnetic waves in one plane, taking into account the superposition of electric, magnetic and electromagnetic fields in a wide frequency range from 3 Hz to 300 GHz. The analysis of generally accepted approaches to the superposition of electromagnetic waves is presented. The technique of determining the sum of harmonic waves and the resulting amplitude of superimposed frequency components of electric, magnetic and electromagnetic fields under specific conditions of influence is considered. Expressions are given for calculating the sum of harmonic waves and the resulting amplitude of electromagnetic field components in a wide range from decamegametre to millimetre waves in areas of simultaneous influence of two sources emitting waves in the same plane. The step-by-step process of superposition of harmonic electromagnetic waves is described. The algorithm of superposition of electromagnetic fields in the frequency range up to 300 GHz is presented. The results of experimental measurements of the electric field strength of the highest intensity in the frequency range 10–160 kHz from the microclimate control system and the electric panel located in the production room are presented. The picture of the superposition of the frequency components of the electric field obtained at the first stage of the calculation using the developed software is given.

Keywords: electromagnetic wave, superposition of waves, resultant amplitude, sum of harmonic waves, overlay technique, overlay pattern, electromagnetic environment.

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

* Corresponding author E-mail address: solovskoyas@mail.ru



Оценка электромагнитной обстановки в зонах одновременного влияния нескольких разноудаленных и излучающих в одной контролируемой плоскости источников

Е. В. Титов^а, А. С. Соловской^а, Е. Б. Осьмушкина^б

^а*Алтайский государственный технический университет
имени И. И. Ползунова*

Российская Федерация, Барнаул

^б*Общество с ограниченной ответственностью «Интэк»
Российская Федерация, Новосибирск*

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы оценки электромагнитной обстановки в зонах одновременного влияния нескольких разноудаленных от точки контроля и излучающих электромагнитные волны в пределах одной плоскости источников с учетом наложения электрического, магнитного и электромагнитного полей в широком частотном диапазоне от 3 Гц до 300 ГГц. Представлен анализ общепринятых подходов к наложению электромагнитных волн. Рассмотрена методика определения суммы гармонических волн и результирующей амплитуды наложенных частотных составляющих электрического, магнитного и электромагнитного полей в рассматриваемых условиях влияния. Приведены выражения для расчета суммы гармонических волн и результирующей амплитуды составляющих электромагнитного поля в широком диапазоне от декаметровых до миллиметровых волн в зонах одновременного влияния двух источников, излучающих волны в пределах одной плоскости. Описан поэтапный процесс наложения гармонических электромагнитных волн. Показан алгоритм наложения электромагнитных полей в диапазоне частот до 300 ГГц. Представлены результаты экспериментальных измерений напряженности электрического поля наибольшей интенсивности в частотном диапазоне 10–160 кГц от системы управления микроклиматом и электрической панели, расположенных в производственном помещении. Приведена картина наложения частотных составляющих электрического поля, полученных на первом этапе расчета с использованием разработанного программного обеспечения.

Ключевые слова: электромагнитная волна, наложение волн, результирующая амплитуда, сумма гармонических волн, методика наложения, картина наложения, электромагнитная обстановка.

Цитирование: Титов Е. В. Оценка электромагнитной обстановки в зонах одновременного влияния нескольких разноудаленных и излучающих в одной контролируемой плоскости источников / Е. В. Титов, А. С. Соловской, Е. Б. Осьмушкина // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2024, 17(2). С. 239–247. EDN: VDXOQI

Введение

Современное развитие электротехнологий и совместное использование источников, генерирующих широкополосные электромагнитные поля (ЭМП), на объектах электроэнергетики, в промышленности и сельском хозяйстве обуславливают необходимость оценки электромаг-

нитной обстановки в условиях одновременного влияния излучающих источников с различными амплитудными и частотными выходными характеристиками [1–2]. Однако известные подходы [3–5] не учитывают наложение частотных составляющих электромагнитного поля в широком спектре 3 Гц – 300 ГГц от нескольких излучающих источников [4–6]. Предложенный ранее подход к оценке электромагнитной обстановки, учитывающий наложение когерентных и некогерентных электромагнитных волн от одного источника поля [7–8], частично решает обозначенную проблему, не позволяя при этом определять результирующую амплитуду волн с учетом всего перечня накладываемых составляющих неионизирующего ЭМП (до 300 ГГц) в зонах одновременного влияния нескольких разноудаленных от точки контроля излучающих источников с различными амплитудами и частотами излучения, что обосновывает актуальность его развития.

Целью исследований является развитие подхода к оценке электромагнитной обстановки в зонах одновременного влияния нескольких разноудаленных от точки контроля излучающих источников, генерирующих электромагнитные волны в пределах одной плоскости с учетом наложения частотных составляющих электрического, магнитного и электромагнитного полей в широком частотном диапазоне от 3 Гц до 300 ГГц. Для достижения поставленной цели выявлена проблематика основанной на результатах инструментального контроля оценки электромагнитной обстановки, проведен анализ общепринятых подходов к наложению электромагнитных волн (ЭМВ), разработана методика определения суммы гармонических волн и результирующей амплитуды наложенных частотных составляющих электрического, магнитного и электромагнитного полей в зонах одновременного влияния нескольких разноудаленных от точки контроля и излучающих электромагнитные волны в пределах одной плоскости источников.

Материалы и методы

При наложении составляющих ЭМП от нескольких его источников, излучающих волны в пределах одной плоскости, результирующая амплитуда определяется по формуле (1) [5, 11] в соответствии с общепризнанным подходом, подробно рассмотренным в [7]. В зонах одновременного влияния гармонических электромагнитных волн с произвольными частотами формируется результирующая ЭМВ сложной формы, амплитудные и частотные выходные характеристики которой для упрощения вычислительных операций принято определять по уравнениям гармонических колебаний [3–6].

$$A_{\Sigma} = A_{\Sigma f_1} + A_{\Sigma f_2} + \dots + A_{\Sigma n}, \quad (1)$$

где $A_{\Sigma f_1}$ – результирующее значение амплитуды первой электромагнитной волны с частотой f_1 ; $A_{\Sigma f_2}$ – результирующее значение амплитуды второй волны с частотой f_2 ; $A_{\Sigma n}$ – результирующее значение амплитуды n -ой ЭМВ с частотой f_n .

Результирующая амплитуда частотных составляющих ЭМП, в частности формируемая при наложении первой электромагнитной волны из исследуемого спектра от двух разноудаленных от точки контроля излучающих источников, определяется с помощью формулы (2) [12, 13], учитывающей разность фаз накладываемых волн в широком спектре частот.

$$A_{\Sigma f_1} = A_{11f_1} \cos \omega_1 \left(t - \frac{l_{11}}{v} \right) + A_{12f_1} \cos \omega_1 \left(t - \frac{l_{12}}{v} \right), \quad (2)$$

где A_{11} – амплитудное значение волны от первого излучающего источника; A_{12} – амплитудное значение волны от второго источника; f_1 – частота электромагнитной волны, Гц; ω_1 – круговая частота, рад/с; t – время, с; v – скорость распространения волны, м/с; l_{11} – расстояние от первого излучающего источника до точки контроля, м; l_{12} – расстояние от второго источника до точки контроля, м.

При определении расстояния от излучающих источников до точки контроля вычисления можно проводить в декартовой системе координат (рис. 1). В данном случае расчет расстояния от первого источника осуществляется с использованием известного выражения (3) [14, 15].

$$l_{11} = \sqrt{(x_1 - x_{И1})^2 + (y_1 - y_{И1})^2}, \quad (3)$$

где x_1 – координата точки контроля по оси x ; $x_{И1}$ – координата излучающего источника по оси x ; y_1 – координата точки контроля по оси y ; $y_{И1}$ – координата излучающего источника по оси y .

Аналогично с помощью формулы (3) [14, 15] рассчитывается расстояние от второго источника до точки контроля.

При отличии менее чем в 3 раза частоты накладываемых ЭМВ с амплитудами много больших периода каждой волны сумму гармонических электромагнитных волн принято определять в соответствии с выражением (4) [9].

$$f_{\Sigma} = f_{cp.} + \frac{1}{2} \times \frac{A_2 - A_1}{A_1 + A_2} \times \Delta f_{1-2}, \quad (4)$$

где $f_{cp.}$ – средняя арифметическая частота электромагнитных волн, Гц; Δf_{1-2} – разность между частотами двух ближайших ЭМВ, Гц.

При значительной разнице между частотами накладываемых электромагнитных волн (более чем в 3 раза) при их амплитудах незначительно больших периода каждой волны разность

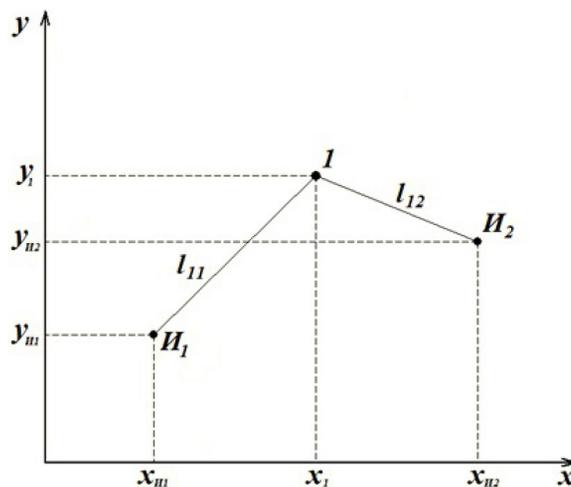


Рис. 1. Схема расположения точки контроля и излучающих источников: 1 – точка контроля ЭМП; И1 – первый источник излучения; И2 – второй источник излучения

Fig. 1. Location scheme of the control point and radiation sources: 1 – EMF control point; И1 – first source; И2 – second source

частот не является бесконечно малой величиной [11]. Для расчета дополнительной фазы ЭМВ недостаточно использование подхода, заключающегося в разложении одного члена фазы, как в выражении (4) [9]. Поэтому разложение описывающей тригонометрической функции в ряд до второго порядка малости позволяет уточнить сумму частотных составляющих двух гармонических волн. В этом случае, согласно [9], при определении данной функции с учетом длительности электромагнитных волн используют формулу (5) [11].

$$f_{рез.} = f_{cp.} + \frac{\Delta f_{1-2}}{2} \times \frac{A_2 - A_1}{A_1 + A_2} \times \left(1 + \frac{1}{12} \times (\Delta f_{1-2} t)^2\right). \quad (5)$$

Результаты и их обсуждение

Используя известный подход к оценке суммы гармонических волн с учетом гармонической функции средней частоты [9–11], для определения накладываемых составляющих ЭМП в расширенном до 300 ГГц диапазоне в зонах одновременного влияния нескольких разноудаленных от точки контроля излучающих источников с различными амплитудами и частотами излучения, отличающимися менее чем в 3 раза, предлагается использовать выражение (6), а при значительной разнице между частотами электромагнитных волн (более чем в 3 раза) – формулу (7) соответственно.

$$f_{рез.} = f_{cp.} + \frac{1}{2} \left(\frac{A_2 - A_1}{A_1 + A_2} |\Delta f_{1-2}| + \dots + \frac{A_n - A_{n-1}}{A_{n-1} + A_n} |\Delta f_{(n-1)-n}| \right) \quad (6)$$

$$f_{рез.} = f_{cp.} + \left(\frac{\Delta f_{1-2}}{2} \times \frac{A_2 - A_1}{A_1 + A_2} \times \left(1 + \frac{1}{12} \times (\Delta f_{1-2} t)^2\right) + \dots + \frac{\Delta f_{(n-1)-n}}{2} \times \frac{A_n - A_{n-1}}{A_{n-1} + A_n} \times \left(1 + \frac{1}{12} \times (\Delta f_{(n-1)-1} t)^2\right) \right), \quad (7)$$

где $\Delta f_{(n-1)-1}$ – разность между частотами $(n-1)$ и n накладываемых электромагнитных волн, Гц.

Подставляя формулу (2) в (3), можно получить выражение (8), позволяющее определять результирующее значение амплитуды накладываемых частотных составляющих электромагнитного поля в зоне влияния двух источников, излучающих волны в одной плоскости на различных расстояниях от точки контроля:

$$A_{\Sigma f_1} = A_{1f_1} \cos \omega_1 \left(t - \frac{\sqrt{(x_1 - x_{H1})^2 + (y_1 - y_{H1})^2}}{v} \right) + A_{12f_1} \cos \omega_1 \left(t - \frac{\sqrt{(x_1 - x_{H2})^2 + (y_1 - y_{H2})^2}}{v} \right). \quad (8)$$

С учетом полученных выражений (6)–(8) разработана методика определения суммы гармонических волн и результирующей амплитуды наложенных частотных составляющих электрического, магнитного и электромагнитного полей (далее методика наложения ЭМП) в зонах одновременного влияния нескольких разноудаленных от точки контроля и излучающих электромагнитные волны в пределах одной плоскости источников широкого частотного диапазо-

на, алгоритм которой представлен на рис. 2. Практическая реализация предложенной методики рассмотрена на примере производственного помещения тепличного хозяйства с системой управления микроклиматом и электрической панелью в зоне их одновременного влияния. При исследовании использовались анализатор спектра АКС-1201, устройство для измерения радиочастотных ЭМП (30 МГц – 30 ГГц), прибор ПЗ-41 и разработанное программное обеспечение [8, 10].

Инструментальный контроль электромагнитной обстановки проводился на высоте 1 м от уровня пола в средней точке между контролируемыми объектами (1,52 м), результаты которого для электрического поля частотного диапазона 10–160 кГц сведены в табл. 1. Промежуточные и конечные результаты определения суммы гармонических волн и результирующей

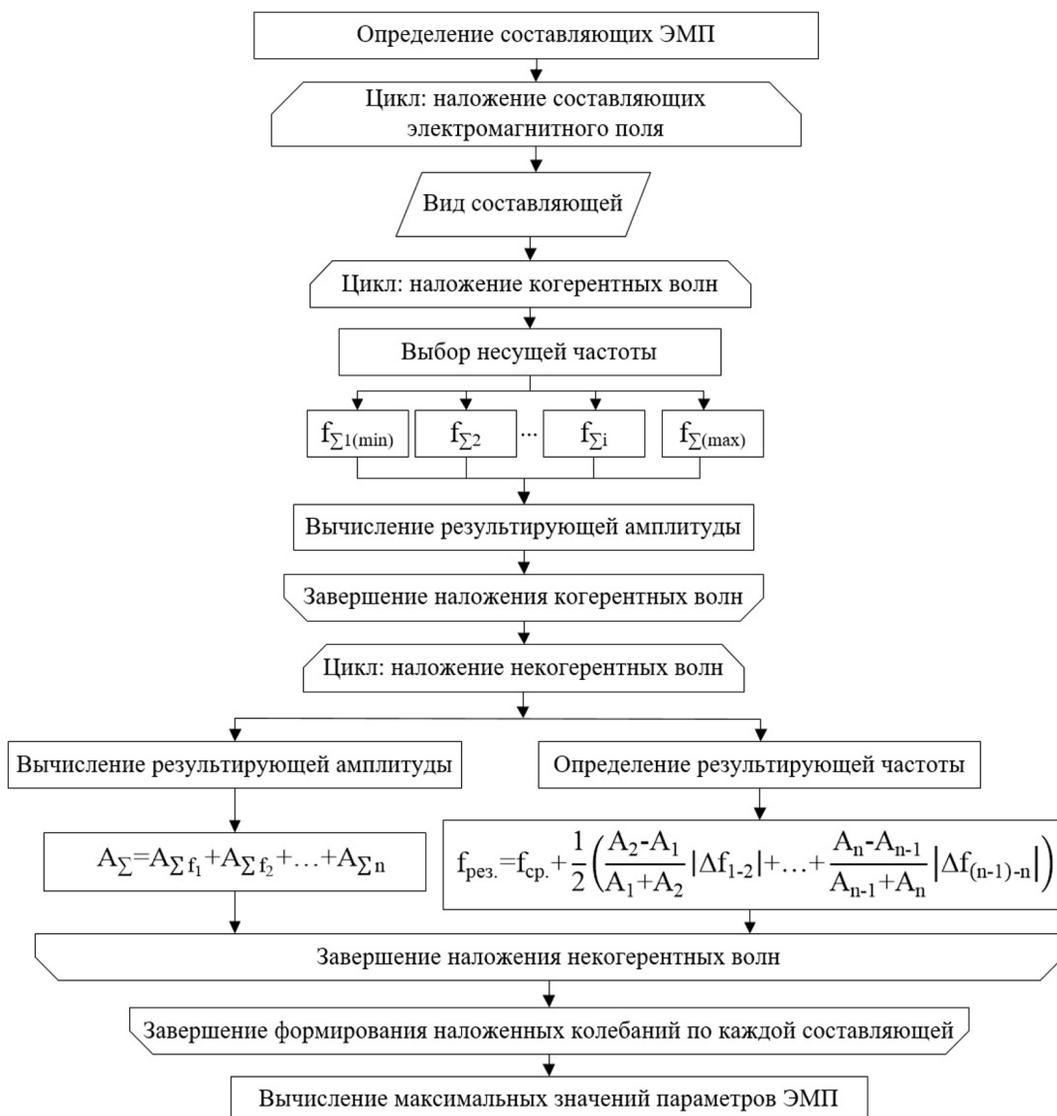


Рис. 2. Алгоритм наложения ЭМП в диапазоне частот до 300 ГГц

Fig. 2. EMF superposition algorithm in the frequency range up to 300 GHz

Табл. 1. Результаты определения наложенного электрического поля в диапазоне частот 10–160 кГц

Табл. 1. Результаты определения наложенного электрического поля в диапазоне частот 10–160 кГц

Результаты измерения		Результаты наложения частотных составляющих электрического поля			
		1 этап		2 этап	
Частота, кГц	E, В/м	Сумма гармонических волн, кГц	Промежуточная амплитуда, В/м	Сумма гармонических волн, кГц	Результирующая амплитуда, В/м
10	2,27	29,76	4,12	71,35	5,96
50	1,85				
70	1,06	114,087	1,84		
160	0,78				

амплитуды получены в соответствии с предложенной методикой наложения электрического, магнитного и электромагнитного полей в условиях одновременного влияния нескольких излучающих источников (рис. 2) и также сведены в табл. 1. На рис. 3 представлена картина наложения частотных составляющих электрического поля, полученных на первом этапе расчета с использованием разработанного программного обеспечения [8, 10].

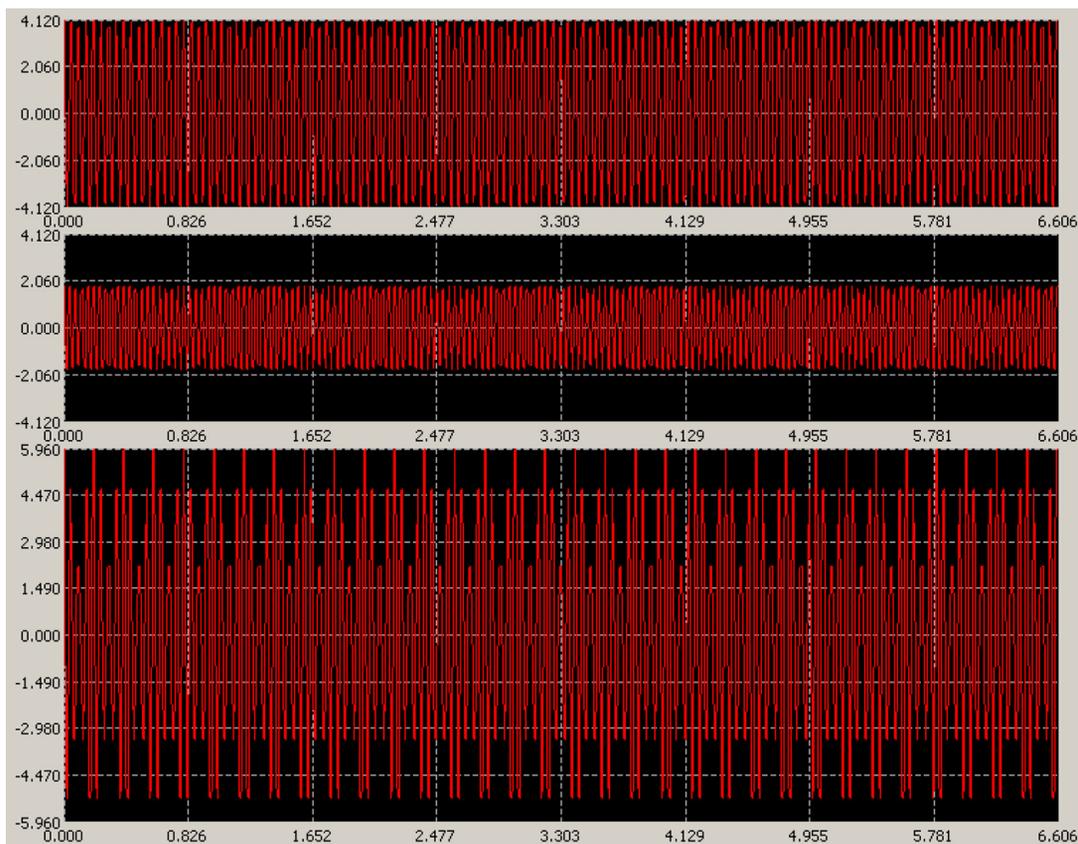


Рис. 3. Результат наложения результирующей составляющей электрического поля

Fig. 3. Result of superposition of resultant electric field components

Разработанную методику определения суммы гармонических волн и результирующей амплитуды наложенных электромагнитных волн предлагается использовать для оценки электромагнитной обстановки в зонах одновременного влияния нескольких разноудаленных и излучающих в пределах одной плоскости источников с учетом наложения частотных составляющих электрического, магнитного и электромагнитного полей в широком частотном диапазоне от 3 Гц до 300 ГГц. Процесс наложения гармонических электромагнитных волн условно можно разбить на два цикла: наложение когерентных и некогерентных волн. При наложении когерентных волн выбирается несущая частота и определяется результирующая амплитуда (выражение (8)). В условиях влияния некогерентных излучающих источников предлагается определять не только результирующую амплитуду, но и сумму гармонических волн (выражения (6)-(7)) с учетом математических функций, одна из которых является гармонической функцией средней частоты.

Заключение

Таким образом, при оценке электромагнитной обстановки в зонах одновременного влияния нескольких разноудаленных и расположенных в пределах одной плоскости излучающих широкополосные электромагнитные поля источников необходимо учитывать сумму гармонических волн и результирующую амплитуду частотных составляющих электрического, магнитного и электромагнитного полей в широком диапазоне от декаметровых до миллиметровых волн. Сумму гармонических волн и результирующую амплитуду наложенных электромагнитных волн можно определить с использованием предложенной методики наложения ЭМП и разработанного программного обеспечения.

Список литературы / References

- [1] Lai H. Genetic effects of non-ionizing electromagnetic fields, *Electromagnetic Biology and Medicine*, 2021, 40(2), 264–273
- [2] Маслов М. Ю., Сподобаев Ю. М., Сподобаев М. Ю. Обоснование предметной области электромагнитной безопасности, *Электросвязь*, 2018, 11, 63–67 [Maslov M. Yu., Spodobaev Yu. M., Spodobaev M. Yu. Substantiation of the subject area of electromagnetic safety, *Telecommunication*, 2018, 11, 63–67 (in Rus.)]
- [3] Ziegelberger G., Croft R., Feychting. M and et. al. Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz), *Health Physics*, 2020, 118, 5, 483–524
- [4] Gultekin D. H., Siegel P. H. Absorption of 5G Radiation in Brain Tissue as a Function of Frequency, Power and Time, *IEEE Access*, 2020, 8, 115593–115612
- [5] Pan D., Jiang Z., Maldague X., Gui W. Research on the Influence of Multiple Interference Factors on Infrared Temperature Measurement, *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21, 9, 10546–10555
- [6] Barnes F., Greenebaum B. Setting Guidelines for Electromagnetic Exposures and Research Needs, *Bioelectromagnetics*, 2020, 41, 5, 392–397
- [7] Малышев Л. Г., Повзнер А. А. *Избранные главы курса физики. Колебания и волны*. Урал. ун-т, 2017, 200 [Malyshev L. G., Povzner A. A. *Selected chapters of the physics course. Fluctuations and waves: Study guide*, Ural. Unct, 2017, 200 (In Rus.)]
- [8] Titov E. V., Soshnikov A. A., Drobyazko O. N. Experimental research of electromagnetic environment in domestic environment with computer visualization of electromagnetic pollution,

Proceedings – 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2020, Sochi. Sochi: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020, 9112010

[9] Ревинская О.Г., Кравченко Н.С. *Сложение колебаний. Биения*, Томский политехнический университет, 2022. 21 [Revinskaya O.G., Kravchenko N.S. *Addition of vibrations*, Tomsk Polytechnic University, 2022. 21 (In Rus.)].

[10] Titov E. V., Soshnikov A. A., Migalev I. E. Computer Imaging of Electromagnetic Environment in Air Space with Industrial Electromagnetic Field Sources in Conditions of Combined Influence of EM Radiation, *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, 2022, 22, 1, 34–40.

[11] Yang M., Xie S., Zhang S., Yang Y. Space-Frequency Domain Non-blind Method For Wideband Electromagnetic Imaging Restoration *International Applied Computational Electromagnetics Society (ACES-China) Symposium*, 2021, 1–2.

[12] Rylander T., Pär I., Bondeson A. *Computational Electromagnetics: In Texts in Applied Mathematics*. New York: Springer-Verlag, 2013. 222

[13] Круг К. А. *Основы электротехники. Учебник для вузов. Том 2*. Москва: Госэнергоиздат, 1946. 637 [Krug K. A. *Fundamentals of Electrical Engineering. Textbook for universities. Volume 2*, Moscow: Gosenergoizdat, 1946, 637 (In Rus.)].

[14.] Санникова Г.И. Применение метода координат при решении задач, *Старт в науке*, 2020, 6 (209), 102–108. [Sannikova G.I. Application of the coordinate method in problem solving. *Start in science*, 2020, 6(209), 102–108 (In Rus.)].

[15] Байрамкулова А.Х. Использование метода координат при решении задач на построение, *Проблемы современного педагогического образования*, 2019, 62–3, 19–23 [Bayramkulova A. H. Use of the method of coordinates in solving problems on construction. *Problems of modern pedagogical education*. 2019, 62–3, 19–23. (In Rus.)].