



УДК 537.86:631.17

Е.В. Титов, А.А. Сошников, В.Ю. Васильев, А.С. Соловской

DOI: 10.53083/1996-4277-2022-209-3-102-108

E.V. Titov, A.A. Soshnikov, V.Yu. Vasilev, A.S. Solovskoy

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАЛОЖЕННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН ОТ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

### COMPUTER SIMULATION OF SUPERIMPOSED ELECTROMAGNETIC WAVES FROM ELECTROMAGNETIC FIELD SOURCES IN A WIDE FREQUENCY RANGE

**Ключевые слова:** наложенные электромагнитные волны, компьютерное моделирование, научная визуализация, промежуточные частоты, результирующая амплитуда, широкий диапазон частот, гармонические колебания, электромагнитная обстановка, усиление электромагнитного поля.

Электромагнитная обстановка в контролируемом пространстве формируется совокупностью электромагнитных полей и излучений с различными частотами. Возникающее явление наложения электромагнитных волн вызывает существенное ухудшение электромагнитной обстановки. Исследования в данной области весьма ограничены в силу несовершенства методов оценки степени усиления наложенных электромагнитных волн. В статье определение степени усиления наложенных волн проводилось с помощью компьютерного моделирования с использованием разработанного программного обеспечения. Результаты моделирования в некоторых случаях показали существенное различие амплитуды и частоты наложенной электромагнитной волны по сравнению с аналогичными характеристиками накладываемых волн. При наложении когерентных электромагнитных волн с фазовым сдвигом накладываемых волн на  $90^\circ$  и их одинаковой амплитуде формируется электромагнитная волна с частотой, соответствующей частоте накладываемых волн, и увеличенной амплитудой. При увеличении фазового сдвига одной из накладываемых волн до  $180^\circ$  в условиях одинаковой интенсивности колебаний наблюдается явление взаимной нейтрализации электромагнитных волн. При увеличении частоты одной из некогерентных волн в 2-3 раза при одинаковых амплитудных значениях и фазовом сдвиге формируется волна, амплитуда которой повышается в несколько раз. Дальнейшее увеличение разницы между частотами накладываемых некогерентных колебаний приводит к возникновению

результатирующей волны с увеличенной амплитудой и частотой, уменьшенной по сравнению с волной более высокой частоты. Компьютерное моделирование когерентных и некогерентных волн показывает возможность формирования электромагнитных полей с новым промежуточным значением частоты и амплитудой, повышенной по сравнению с каждой исходной составляющей. Оценка степени усиления результирующего действия электромагнитных полей и излучений в широком частотном диапазоне может проводиться с использованием предложенной методики и разработанного программного обеспечения для расчета характеристик и визуализации наложенных электромагнитных волн.

**Keywords:** superimposed electromagnetic waves, computer simulation, scientific visualization, intermediate frequency value, resulting amplitude, wide frequency range, harmonic oscillations, electromagnetic environment, electromagnetic field amplification.

The electromagnetic environment in the controlled space is formed by a combination of electromagnetic fields and radiation with different frequencies. The emerging phenomenon of superposition of electromagnetic waves causes a significant deterioration of the electromagnetic environment. The research in this area is quite limited due to the imperfection of the methods for evaluating the degree of amplification of superimposed electromagnetic waves. The degree of amplification of superimposed waves was determined by computer simulation using the developed software. The simulation results in some cases showed a significant difference in the amplitude and frequency of the superimposed electromagnetic wave as compared to similar characteristics of the superimposed waves. When coherent electromagnetic waves are superimposed with a phase shift of the superimposed waves by  $90^\circ$  and their equal amplitude, an electromagnetic wave is

formed with a frequency corresponding to the frequency of the superimposed waves and increased amplitude. When the phase shift of one of the superimposed waves increases to  $180^\circ$ , the phenomenon of mutual neutralization of electromagnetic waves is observed under conditions of the same intensity of oscillations. With increased frequency of one of the incoherent waves 2-3 times with the same amplitude values and phase shift, a wave is formed, its amplitude increases several times. A further increase of the difference between the frequencies of the superimposed incoherent oscillations leads to the appearance of the re-

sulting wave with increased amplitude and a frequency reduced in comparison with the wave of a higher frequency. Computer modeling of coherent and incoherent waves shows the possibility of forming electromagnetic fields with a new intermediate frequency value and the amplitude increased compared to each initial component. The evaluation of the degree of amplification of the resulting effect of electromagnetic fields and radiation in a wide frequency range may be carried out using the proposed methodology and developed software for calculating the characteristics and visualization of superimposed electromagnetic waves.

**Титов Евгений Владимирович**, д.т.н., доцент, вед. научный сотрудник, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова», г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: 888tev888@mail.ru.

**Сошников Александр Андреевич**, д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова», г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: aa@soshnikov.info.

**Васильев Валерий Юрьевич**, ассистент, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова», г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: vasilievvalerij@mail.ru.

**Соловской Александр Сергеевич**, ассистент, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова», г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: solovskoyas@mail.ru.

**Titov Evgeniy Vladimirovich**, Dr. Tech. Sci., Assoc. Prof., Leading Researcher, Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, Barnaul, Russian Federation, e-mail: 888tev888@mail.ru.

**Soshnikov Aleksandr Andreevich**, Dr. Tech. Sci., Prof., Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, Barnaul, Russian Federation, e-mail: aa@soshnikov.info.

**Vasilev Valeriy Yurevich**, Asst., Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, Barnaul, Russian Federation, e-mail: vasilievvalerij@mail.ru.

**Solovskoy Aleksandr Sergeevich**, Asst., Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, Barnaul, Russian Federation, e-mail: solovskoyas@mail.ru.

## Введение

Электромагнитная обстановка в контролируемом пространстве формируется совокупностью электромагнитных полей (ЭМП) и излучений, создаваемых не только различными источниками с фиксированными частотами, но и в ряде случаев – одним источником, генерирующим ЭМП на различных частотах. При этом возникает явление наложения электромагнитных волн (ЭМВ), описываемое с использованием преобразования Фурье [1, 2]. Возникновение наложенных волн может привести к существенному ухудшению электромагнитной обстановки.

Однако исследования в данной области весьма ограничены в силу того, что не изучается наложение электромагнитных волн в расширенном до 3 ТГц диапазоне частот, а известные подходы к оценке электромагнитной обстановки не учитывают возможность возникновения максимальных уровней ЭМП при комбинированном влиянии нескольких составляющих электромагнитного поля в широком частотном диапазоне [3-6]. При этом разработанный ранее подход, основанный на использовании математических

выражений для определения допустимого времени пребывания и подробно изложенный в [7], не в полной мере отражает механизм наложения электромагнитных полей и излучений, что обосновывает проведение более глубоких исследований в этом направлении.

**Целью** исследований является определение степени усиления наложенных волн посредством компьютерного моделирования.

## Объекты и методы

Для уточнения степени усиления комбинированных волн разработано программное обеспечение [8] для их моделирования. На основании проведенных исследований представлена методика расчета параметров наложенных волн в широком частотном диапазоне, алгоритм которой подробно рассмотрен в [9].

Как показывают результаты моделирования, при наложении когерентных электромагнитных волн (от источников ЭМП, генерирующих излучения с одинаковой основной частотой), совпадающих по фазе, амплитуда результирующей волны соответствует сумме амплитуд накладываемых волн.

### Результаты исследований и их обсуждение

При наложении когерентных электромагнитных волн с различными фазовыми сдвигами амплитуду результирующей волны можно определить по формуле (1) [10]. При этом наибольшее амплитудное значение соответствует варианту наложения когерентных электромагнитных волн, совпадающих по фазе. Частота результирующей волны в данном случае совпадает с частотой накладываемых гармонических колебаний:

$$A_{\Sigma} = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\Delta\omega t)}, \quad (1)$$

где  $A_1$  – амплитудное значение первой частотной составляющей электромагнитного поля;

$A_2$  – амплитудное значение второй частотной составляющей ЭМП;

$\Delta\omega$  – разность между циклическими частотами первого и второго накладываемых электромагнитных колебаний, рад/с;

$t$  – длительность колебания, с.

Наложение некогерентных электромагнитных волн основано на следующем.

При увеличении частоты одной из накладываемых волн результирующая амплитуда так же, как и для когерентных волн, определяется по формуле (1) [10]. При отличии частот накладываемых колебаний менее чем в 3 раза частоту результирующей волны можно рассчитать по формуле [5, 6]:

$$f_{\Sigma} = \bar{f} + \frac{1}{2} \cdot \frac{A_2 - A_1}{A_1 + A_2} \cdot \Delta f, \quad (2)$$

где  $\bar{f}$  – среднее арифметическое значение частоты накладываемых электромагнитных колебаний, Гц;

$\Delta f$  – разность между частотами первого и второго накладываемых ЭВМ, Гц.

Выявлено, что при фазовом сдвиге накладываемых волн на  $90^\circ$  и их одинаковой амплитуде формируется электромагнитная волна с частотой, соответствующей частоте накладываемых волн, и увеличенной практически в 1,5 раза амплитудой. При увеличении фазового сдвига одной из накладываемых волн до  $180^\circ$  в условиях одинаковой интенсивности колебаний наблюдается явление взаимной нейтрализации электромагнитных волн.

Компьютерное моделирование показывает (рис. 1), что при увеличении частоты одной из волн в 2 раза при одинаковых амплитудных значениях и фазовом сдвиге формируется волна, амплитуда которой повышается в  $\sqrt{3}$  раз. Однако повышение частоты в 3 раза приводит к увеличению амплитуды сформированной волны только в 1,5 раза. Эта закономерность полностью подтверждается не только графической визуализацией накладываемых колебаний [11], но и результатами расчетов, полученными с использованием разработанного программного обеспечения [8].

При фазовом сдвиге накладываемых волн с одинаковой амплитудой в  $90^\circ$  и удвоенной частоте одной из волн формируется волна с амплитудой, увеличенной практически в 1,5 раза. При утроенной частоте одной из волн эта амплитуда повышается в 2 раза (рис. 2).

При тех же условиях увеличение фазового сдвига накладываемых волн до  $180^\circ$  приводит к увеличению результирующей амплитуды в  $\sqrt{3}$  раз для удвоенной частоты одной из волн и до 2 раз для утроенной частоты (рис. 3).

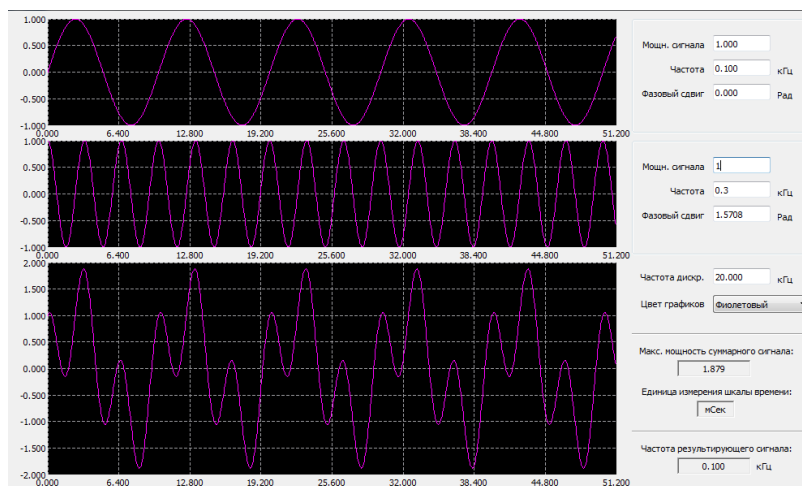
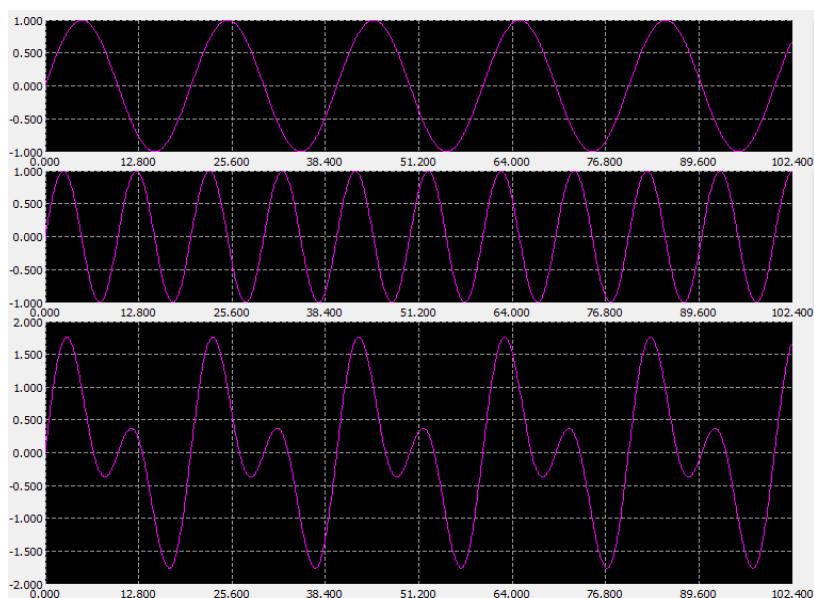
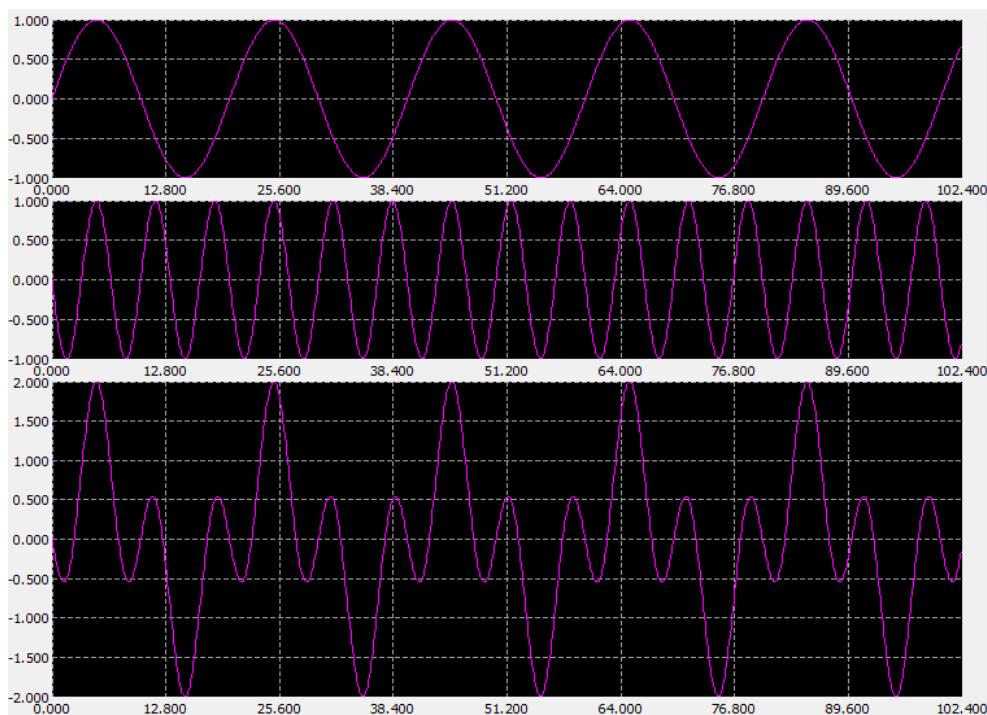


Рис. 1. Наложение электромагнитных волн с одинаковыми амплитудами и сдвигом по фазе при удвоенной разности частот



**Рис. 2. Наложение электромагнитных волн с одинаковыми амплитудами при утроенной разности частот и фазовом сдвиге  $90^\circ$**



**Рис. 3. Наложение электромагнитных волн с одинаковыми амплитудами при утроенной разности частот и фазовом сдвиге  $180^\circ$**

Полученные с помощью компьютерного моделирования комбинированные электромагнитные волны при более высокой амплитуде волны с более высокой частотой (рис. 4а) и с более низкой (рис. 4б) показывают, что в обоих случаях результирующая амплитуда возрастает, что подтверждает справедливость выражения (1) [10].

Дальнейшее увеличение разницы между частотами накладываемых колебаний (более чем в 3 раза) приводит к возникновению результи-

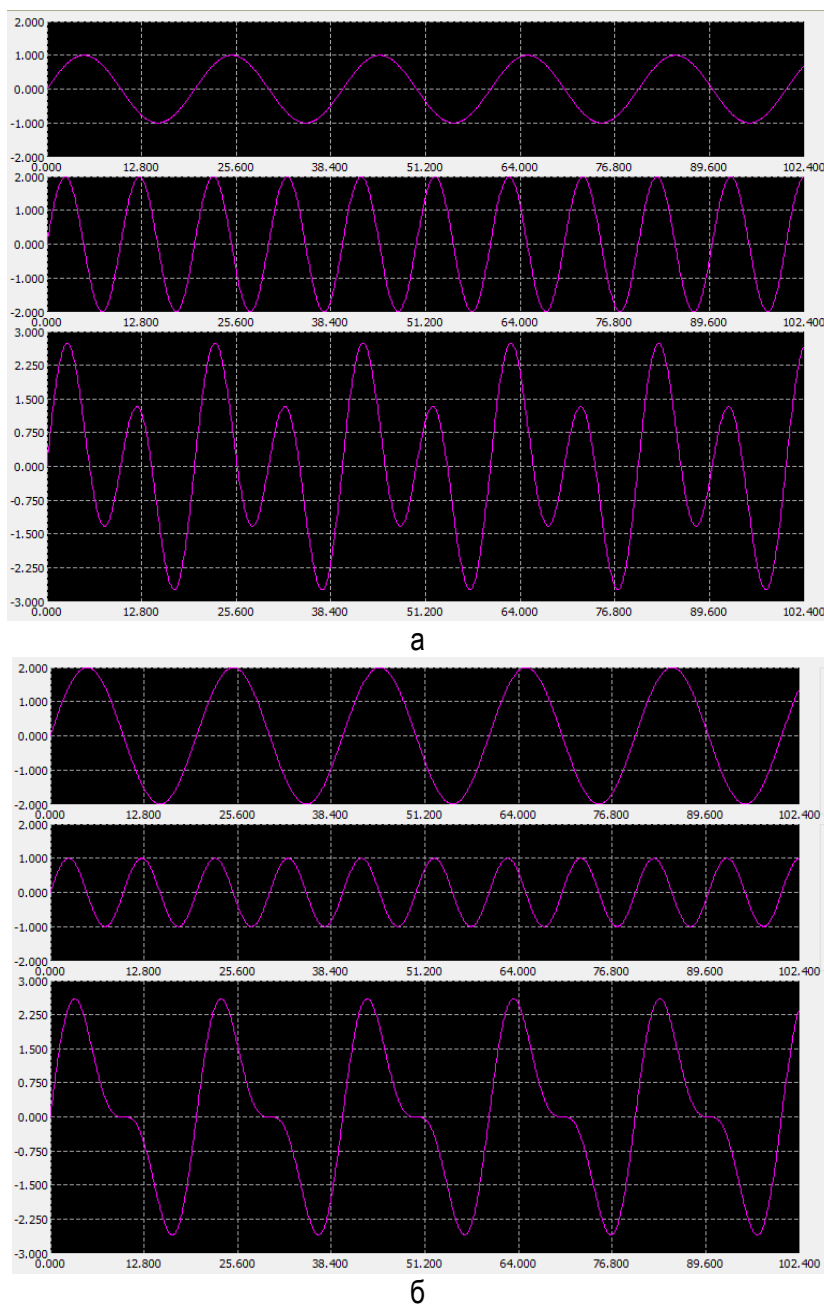
рующей волны, амплитуда которой увеличивается более чем в 2 раза, а частота уменьшается по сравнению с волной более высокой частоты.

### Заключение

Компьютерное моделирование наложенных когерентных и некогерентных волн показывает возможность формирования электромагнитных полей с новым промежуточным значением частоты и амплитудой, повышенной по сравнению с каждой исходной составляющей. Оценка сте-

пени усиления результирующего действия электромагнитных полей и излучений в широком частотном диапазоне может проводиться с использованием предложенной методики и разра-

ботанного программного обеспечения для расчета характеристик и визуализации наложенных электромагнитных волн.



**Рис. 4. Наложение электромагнитных волн с одинаковым сдвигом по фазе при удвоенной разности частот:**

**а – более высокая амплитуда у волны с более высокой частотой;**

**б – более высокая амплитуда у волны с более низкой частотой**

#### Библиографический список

1. Зотов, К. Н. Применение генераторов белого шума для систем управления дронами в канале Wi-fi / К. Н. Зотов, Р. Р. Жданов, П. Е. Филатов. – Текст: непосредственный // Инфокоммуникационные технологии. – 2021. –

Т. 19, № 2. – С. 232-238. – DOI 10.18469/ikt.2021.19.2.12.

2. Компактный мультдиапазонный радар с синтезированной апертурой / А. Л. Переверзев, К. С. Лялин, Ю. М. Мелешин [и др.]. – Текст: электронный // Наноиндустрия, 2020. – Т. 13, № S4 (99). – С. 154-156. – URL:



<https://doi.org/10.22184/1993-8578.2020.13.4s.154.156> (дата обращения: 15.01.2022). – Режим доступа: для зарегистрированных пользователей.

3. Fanti, A., Schirru, L., Casu, S., et al. (2020). Improvement and Testing of Models for Field Level Evaluation in Urban Environment. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 28. 4038-4047. DOI: 10.1109/TAP.2020.2969712. (дата обращения: 14.01.2022). – Режим доступа: для зарегистрированных пользователей.

4. Григорьев, О. А. Обобщенный подход к энергетическому методу оценки эффективности использования неионизирующих излучений в специальных средствах нелетального действия / О.А. Григорьев, А.Г. Прохоркин. – Текст: электронный // Стратегическая стабильность. – 2019. – № 3 (88). – С. 71-73. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39147254> (дата обращения: 15.01.2022). – Режим доступа: для зарегистрированных пользователей.

5. Amineh, R.K., Ravan, M., Sharma, R. (2020). Non-Destructive Testing of Non-Metallic Pipes Using Wideband Microwave Measurements. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. DOI: 10.1109/TMTT.2020.2969382 (дата обращения: 14.01.2022). – Режим доступа: для зарегистрированных пользователей.

6. Maslov, O.N. (2018). Electromagnetic Safety of Workstations Equipped with Active Systems for Data Protection. *J. Commun. Technol. Electron.* 63, 163-172. DOI: 10.1134/S1064226918020067 (дата обращения: 14.01.2022). – Режим доступа: для зарегистрированных пользователей.

7. Мигалев, И. Е. Автоматизированный контроль электромагнитных излучений в технологиях АПК: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.20.02 / Мигалев Иван Евгеньевич. – Барнаул, 2018. – 126 с. – Текст: непосредственный.

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2020619211. Наложение электромагнитных колебаний в широком частотном диапазоне / Е. В. Титов, А. А. Сошников, Н. С. Журавский; заявитель и патентообладатель: АлтГТУ. – № 2020618242; заявл. 24.07.2020; зарег. 13.08.2020. – Текст: непосредственный.

9. Титов, Е. В. Методология комплексного контроля и визуализации электромагнитной обстановки в АПК: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.20.02 /

Титов Евгений Владимирович. – Барнаул, 2021. – 345 с. – Текст: непосредственный.

10. Крюков, А. В. Определение электромагнитных влияний высоковольтных ЛЭП и тяговых сетей на трубопроводы / А. В. Крюков, А. В. Черепанов, А. Е. Крюков. – Текст: непосредственный // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2020. – № 9. – С. 62-72.

11. Звездина, М. Ю. Визуализация электромагнитной обстановки вблизи антенны цифровой системы передачи / М. Ю. Звездина, Ю. А. Шокова, Х. Т. Ал-Али. – Текст: непосредственный // Электросвязь. – 2018. – № 6. – С. 68-72.

### References

1. Zotov, K.N. Primenenie generatorov belogo shuma dlia sistem upravleniia dronami v kanale Wi-fi / K.N. Zotov, R.R. Zhdanov, P.E. Filatov // Infokommunikatsionnye tekhnologii, 2021. – Т. 19. – No. 2. – S. 232-238. – DOI 10.18469/ikt.2021.19.2.12.

2. Kompaktnyi multidiapazonnyi radar s sintezirovannoi aperturoi / A.L. Pereverzev, K.S. Lialin, Iu.M. Meleshin [i dr.] // Nanoindustriia, 2020. – Т. 13. – No. S4 (99). – S. 154-156. – DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2020.13.4s.154.156> (дата обращения: 15.01.2022). – Режим доступа: для зарегистрированных пользователей.

3. Fanti, A., Schirru, L., Casu, S., et al. (2020). Improvement and Testing of Models for Field Level Evaluation in Urban Environment. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 28. 4038-4047. DOI: 10.1109/TAP.2020.2969712. (дата обращения: 14.01.2022). – Режим доступа: для зарегистрированных пользователей.

4. Grigorev, O.A. Obobshchennyi podkhod k energeticheskomu metodu otsenki effektivnosti ispolzovaniia neioniziruiushchikh izlucheni v spetsialnykh sredstvakh neletalnogo deistviia / O.A. Grigorev, A.G. Prokhorkin // Strategicheskaiia stabilnost, 2019. – No. 3 (88). – S. 71-73. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39147254> (дата обращения: 15.01.2022). – Режим доступа: для зарегистрированных пользователей.

5. Amineh, R.K., Ravan, M., Sharma, R. (2020). Non-Destructive Testing of Non-Metallic Pipes Using Wideband Microwave Measurements. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. DOI: 10.1109/TMTT.2020.2969382 (дата обращения: 14.01.2022). – Режим доступа: для зарегистрированных пользователей.

6. Maslov, O.N. (2018). Electromagnetic Safety of Workstations Equipped with Active Systems for Data Protection. *J. Commun. Technol. Electron.* 63, 163-172. DOI: 10.1134/S1064226918020067 (data obrashcheniia: 14.01.2022). – Rezhim dostupa: dlia zaregistrovannykh polzovatelei.

7. Migalev, I.E. Avtomatizirovannyi kontrol elektromagnitnykh izlucheniï v tekhnologiiakh APK: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.20.02 / Migalev Ivan Evgenevich. – Barnaul, 2018. – 126 s.

8. Svid. o gos. reg. progr. dlia EVM 2020619211. Nalozhenie elektromagnitnykh kolebanii v shirokom chastotnom diapazone / E.V. Titov, A.A. Soshnikov, N.S. Zhuravskii; zaiavitel i patentoobladatel: AltGTU. – No. 2020618242; zaiavl. 24.07.2020; zareg. 13.08.2020.

9. Titov, E.V. Metodologiya kompleksnogo kontrolya i vizualizatsii elektromagnitnoi obstanovki v APK: dis. ... dokt. tekhn. nauk: 05.20.02 / Titov Evgenii Vladimirovich. – Barnaul, 2021. – 345 s.

10. Kriukov, A.V. Opredelenie elektromagnitnykh vliianii vysokovoltnykh LEP i tiagovykh setei na truboprovody / A.V. Kriukov, A.V. Cherepanov, A.E. Kriukov // Elektrooborudovanie: ekspluatatsiia i remont. – 2020. – No. 9. – S. 62-72.

11. Zvezdina, M.Iu. Vizualizatsiia elektromagnitnoi obstanovki vblizi anteny tsifrovoy sistemy peredachi / M.Iu. Zvezdina, Iu.A. Shokova, Kh.T. Al-Ali // Elektrosviaz. – 2018. – No. 6. – S. 68-72.



УДК 621.365:691

DOI: 10.53083/1996-4277-2022-209-3-108-115

**Т.М. Халина, М.В. Халин, А.В. Ведманкин,  
Е.И. Востриков, А.Б. Дорош**  
T.M. Khalina, M.V. Khalin, A.V. Vedmankin,  
E.I. Vostrikov, A.B. Dorosh

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИЦИОННЫХ ЭЛЕКТРООБОГРЕВАТЕЛЕЙ ДЛЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

### DETERMINATION OF THE STABILITY OF OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF COMPOSITE ELECTRIC HEATERS FOR THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX

**Ключевые слова:** однородность композиционного материала, многоэлектродный композиционный электрообогреватель, информационно-энтропийный интервал, электронная микроскопия, тепловизионные исследования, локальный обогрев.

Рассматриваются эффективный низкотемпературный поверхностный обогрев и технические средства, на основе многоэлектродных композиционных электрообогревателей (МКЭ) различных форм и типоразмеров для агропромышленного производства. Электрообогреватели МКЭ обладают следующими характеристиками: защита от поражения электрическим током – 0; степень защиты от доступа к опасным частям, попадания твердых предметов, воды – IP57, продолжительным режимам работы без надзора. Сдерживающим фактором широкого использования электрообогревателей МКЭ является недостаточная стабильность их эксплуатационных характеристик. В статье предлагается решение задачи определения стабильности эксплуатационных параметров МКЭ на основе анализа структурно-ориентированной модели распределения технического углерода в бутилкаучуковой матрице информационно-энтропийным методом. Экспериментальные

исследования структуры композиционных материалов проводятся комплексными методами электронной микроскопии. Получены качественные и количественные характеристики структурно-ориентированной модели для формирования регулярной сетчатой структуры электропроводящего наполнителя в полимерной матрице, обеспечивающей стабильность эксплуатационных характеристик. Степень однородности КМ, отражающая колебания концентраций ТУ в различных микрообъемах полимерной матрицы для исследуемых образцов составила от 75 до 86%. Приводятся результаты тепловизионных исследований электрообогревателей МКЭ, которые показали равномерность распределения тепловых полей, что подтверждает эффективность использования информационно-энтропийного метода для определения однородности композиционного материала (КМ). Анализ полученных термограмм при выходе электрообогревателя на рабочий режим через 45 мин. после его включения показал, что превышение температуры на поверхности МКЭ-1/5 составило 15...20°C при температуре окружающей среды T = 17°C. Этот показатель соответствует зоотехническим нормам содержания молодняка животных. Использование тепловизионной диагностики позволяет