

3. Lekanov, S.V. Tekhnika i tekhnologii posleuborochnoi obrabotki zerna i semian: rekomendatsii / S.V. Lekanov, N.I. Strikunov. – Barnaul: Izd-vo Alt. IPK APK, 2019. – 74 s.

4. Lekanov, S.V. Zernoochistitelnye mashiny: uchebnoe posobie / S.V. Lekanov, N.I. Strikunov, B.T. Tarasov. – Barnaul: Izd-vo AGAU, 2010. – 88 s.

5. Strikunov, N.I. Klassifikatsiia aspiratsionnykh sistem tsentrobezhno-reshetnykh separatorov s vertikalnoi osiu vrashcheniia / N.I. Strikunov, S.V.

Lekanov // Molodoi uchenyi. – 2016. – No. 26. – S. 90-93.

6. Tishchenko L.N. Modelirovanie protsessov zernovykh separatorov. monogr. / L.N. Tishchenko, D.A. Mazorenko, M.V. Piven, S.A. Kharchenko, V.V. Bredikhin, A.V. Mandyrka; KhNTUSG im. P. Vasilenko. – Kharkov: Miskdruk, 2010. – 359 s.

7. Sychugov N.P. Ustanovki pnevmaticheskogo transporta / Uchebnoe posobie po kursu selskokhoziaistvennykh mashin. – Moskva, 1970. – 66 s.



УДК 621.37

DOI: 10.53083/1996-4277-2022-213-7-102-107

Е.В. Титов, П.В. Иванов, В.И. Мозоль

E.V. Titov, P.V. Ivanov, V.I. Mozol

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ЧАСТОТНОМ ДИАПАЗОНЕ 30 МГц – 30 ГГц

IMPROVEMENT OF THE ELECTROMAGNETIC FIELD METER IN THE FREQUENCY RANGE OF 30 MHZ – 30 GHZ

Ключевые слова: электромагнитное поле, технические ограничения измерителей, частотный диапазон 30 МГц – 30 ГГц, технические решения, измерительное устройство, патентный поиск, электромагнитный мониторинг, электромагнитная совместимость.

Энергия электромагнитного поля очень высоких, ультравысоких и сверхвысоких частот в последнее время нашла широкое применение практически во всех сферах человеческой деятельности. Подтверждена необходимость контроля электромагнитного поля в частотном диапазоне 30 МГц – 30 ГГц и обоснована целесообразность детального анализа технических ограничений известных измерителей в этом диапазоне. Рассмотрена техническая проблема избирательного контроля электромагнитных излучений на отдельных частотах в широком диапазоне 30 МГц – 30 ГГц с выводом результатов измерения на портативный персональный компьютер. По результатам патентного поиска измерительных инструментов выявлены технические ограничения известных устройств контроля высокочастотных составляющих электромагнитного поля: недостаточная проработанность конечного устройства вывода/индикации, отсутствие промежуточных фильтров в измерительных и питающих цепях, использование термопреобразователей электромагнитной энергии в качестве детектирующего элемента, отсутствие

активных усилительных элементов, цепей выделения промежуточной частоты в исследуемом сигнале, микропроцессорного вычислительного блока, экранирования корпуса. Предложены технические решения по устранению выявленных ограничений посредством объединения в разработанном и защищенном патентом селективном измерительном инструменте широкополосной антенны, высокочастотного разъема и размещенных в экранирующем корпусе электромеханического блока коммутации, микроконтроллера, преобразователя частоты, аттенюатора, усилителя, генератора опорной частоты, логарифмического детектора, полосового фильтра, аналого-цифрового преобразователя, источника опорного напряжения, жидкокристаллического дисплея, COM-порта микроконтроллера и блока питания. Приведено описание разработанного устройства для контроля электромагнитного поля, учитывающего предлагаемые технические решения. Обоснована возможность избирательного контроля электромагнитных излучений на отдельных частотах. Представлены схема объединения элементов разработанного устройства и результаты моделирования входного спектра электромагнитного сигнала частотой 433 МГц и выходного спектра частотой 19 МГц, подтверждающие возможность избирательного контроля в заявленном частотном диапазоне и вывода результатов исследования на компьютер для обработки по универсальному алгоритму и представления в формализованной структуре.

Keywords: *electromagnetic field, technical limitations of meters, frequency range 30 MHz-30 GHz, technical solutions, measuring device, patent search, electromagnetic monitoring, electromagnetic compatibility.*

The energy of the electromagnetic field of very high, ultra-high and ultra-high frequencies has recently found wide application in almost all spheres of human activity. The necessity of monitoring the electromagnetic field in the frequency range from 30 MHz to 30 GHz is confirmed and the expediency of analyzing the technical limitations of known meters in this range is justified. The technical problem of selective control of electromagnetic radiation at individual frequencies in a wide range from 30 MHz to 30 GHz with the output of measurement results to a computer is considered. The technical limitations of the known devices for monitoring the high-frequency components of the electromagnetic field are revealed: insufficient elaboration of the final output/display device, the absence of intermediate filters in the measuring and supply circuits, the use of thermal converters of electromagnetic energy as a detecting element, the absence of active amplifying elements, intermediate frequency isolation circuits in the signal under

study, a microprocessor computing unit and housing shielding. Technical solutions are proposed to solve the considered limitations by combining a broadband antenna, a high-frequency connector, an electromechanical switching unit, a microcontroller, a frequency converter, an attenuator, an amplifier, a reference frequency generator, a logarithmic detector, a bandpass filter, an analog-to-digital converter, a reference voltage source, a liquid crystal display, a microcontroller COM port and a block power supply. The description of the developed device for monitoring the electromagnetic field which takes into account the proposed technical solutions is presented. The possibility of separate control of electromagnetic radiation at separate frequencies is substantiated. The scheme of combining the elements of the developed device and the results of modeling the input spectrum of the electromagnetic signal with a frequency of 433 MHz and the output spectrum with a frequency of 19 MHz are presented. This confirms the possibility of selective control in the specified frequency range and the output of the research results to a computer for processing according to a universal algorithm and presentation in a formalized structure.

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

Иванов Павел Владимирович, магистрант, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова», г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: james_bredly@mail.ru.

Мозоль Владимир Иванович, к.т.н., доцент, профессор, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова», г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: mozol.vladimir49@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.

Ivanov Pavel Vladimirovich, master's degree student, Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, Barnaul, Russian Federation, e-mail: james_bredly@mail.ru.

Mozol Vladimir Ivanovich, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, Barnaul, Russian Federation, e-mail: mozol.vladimir49@mail.ru.

Введение

В современном мире энергия электромагнитного поля (ЭМП) очень высоких СВЧ/VHF (30-300 МГц), ультравысоких УВЧ/UHF (0,3-3 ГГц) и сверхвысоких частот СВЧ/SHF (3-30 ГГц) [1] нашла широкое применение практически во всех сферах человеческой деятельности: от связи, обработки материалов и источников питания до вычислительной техники и радиоастрономических исследований [2].

Электромагнитные излучения (ЭМИ) указанного диапазона не являются ионизирующими [1], однако при определенных условиях они способны оказывать негативное воздействие на биологические объекты [3, 4] и технологическое оборудование, использующее электромагнитную энергию [5, 6], что подтверждает необходимость

контроля ЭМП в границах 30 МГц – 30 ГГц. Известные устройства для измерения электромагнитного поля в этом диапазоне частот имеют существенные ограничения, характеризующиеся узкими поддиапазонами исследуемых частот в границах диапазона 30 МГц – 30 ГГц [7]; неизбирательностью измерений в связи с отсутствием составляющих, позволяющих избирательно контролировать электромагнитное поле на отдельных частотах во всем рассматриваемом диапазоне [7-9]; отсутствием возможности вывода результатов измерений на портативный персональный компьютер [7-9]. Это обосновывает целесообразность детального анализа технических ограничений известных измерителей исследуемого диапазона для решения рассмотренной проблемы.

Целью исследования является решение технической проблемы избирательного контроля электромагнитных излучений на отдельных частотах в широком диапазоне 30 МГц – 30 ГГц с выводом результатов измерения на портативный персональный компьютер.

Объекты и методы

Для достижения поставленной цели проведен патентный поиск измерительных инструментов для исследования составляющих ЭМП очень высоких, ультравысоких и сверхвысоких частот [7-9], выявлены технические ограничения известных измерительных приборов, разработаны предложения по решению технической проблемы избирательного контроля электромагнитных излучений на отдельных частотах широкого диапазона, включающего ОВЧ,- УВЧ- и СВЧ-частотные составляющие, вывода результатов исследования на персональный компьютер и приведено описание разработанного устройства для контроля ЭМП [10, 11], учитывающего предлагаемые решения.

Результаты исследований и их обсуждение

Результаты анализа основных технических ограничений известных измерительных инструментов для контроля электромагнитного поля в частотном диапазоне 30 МГц – 30 ГГц с указанием предлагаемых технических решений по устранению выявленных ограничений представлены в таблице. По результатам проведенного анализа с учетом рассмотренных технических особенностей устройств для исследования электромагнитного поля в этом диапазоне [7-9] разработано и защищено патентом устройство контроля электромагнитных излучений [10, 11], описание которого рассмотрено ниже.

Устройство для измерения частотных составляющих электромагнитного поля в диапазоне 30 МГц – 30 ГГц [10, 11] содержит экранированный корпус, плоскую печатную самокомплементарную антенну, высокочастотный антенный разъем, электромеханический блок коммутации, аттенюатор, усилитель, балансный модулятор, кварцевый генератор, активный трехполосный фильтр, логарифмический детектор широкого частотного диапазона, источник питания постоянного тока, микроконтроллер, встроенный в микроконтроллер аналого-цифровой преобразователь, источник опорного напряжения, встроенный в микроконтроллер

цифро-аналоговой преобразователь, сглаживающий фильтр, жидкокристаллический TFT-дисплей, СОМ-порт микроконтроллера.

Вывод результатов измерений на портативный персональный компьютер осуществляется в результате преобразования аналогового сигнала с логарифмического детектора в цифровой сигнал посредством встроенного в микроконтроллер аналого-цифрового преобразователя, дальнейшей обработки собственными вычислительными мощностями микроконтроллера и передачи на портативный персональный компьютер для последующей обработки через встроенный интерфейс: Universal Asynchronous Receiver/Transmitter RS-232 через СОМ-порт портативного персонального компьютера.

Возможность избирательного контроля электромагнитных излучений на отдельных частотах обусловлена объединением в предложенном измерителе гетеродинной цепи, состоящей из кварцевого генератора, управляемого напряжением, подаваемым с цифро-аналогового преобразователя, встроенного в микроконтроллер, через сглаживающий фильтр, балансного модулятора и трехполосного фильтра, что в совокупности обеспечивает измерение задаваемых составляющих электромагнитного поля в необходимом частотном поддиапазоне. Схема соединения элементов, введение которых позволяет осуществлять избирательный контроль составляющих электромагнитного поля в заявленном диапазоне, представлена на рисунке 1.

Для проверки возможности избирательного контроля ЭМП в частотном диапазоне 30 МГц – 30 ГГц разработана упрощенная компьютерная модель основных электрических цепей с использованием стороннего программного обеспечения NI Multisim [12]. Ниже представлены результаты моделирования входного спектра электромагнитного сигнала частотой 433 МГц (рис. 2) и выходного спектра частотой 19 МГц (рис. 3).

По результатам компьютерного моделирования в выходном спектре (рис. 3) можно выделить электромагнитный сигнал частотой 19 МГц, характеризующийся высокой интенсивностью с амплитудой -19,571 дБм (уровень мощности, выражаемый в децибелах применительно к одному милливатту). По горизонтальной оси избирательно выбирается частота сигнала, а по вертикальной оси определяется амплитуда колебания.

Анализ технических ограничений группы измерителей ЭМП в частотном диапазоне 30 МГц – 30 ГГц

Техническое ограничение	Характеристика технического ограничения	Предлагаемое техническое решение
Отсутствие информативного средства визуального представления результатов контроля	Малая информативность измерений электромагнитного поля и, как следствие, ухудшение визуального представления результатов исследования электромагнитной обстановки	Использование жидкокристаллического дисплея с встроенным графическим процессором
Отсутствие промежуточных фильтров в измерительных и питающих цепях	Возрастание степени влияния паразитных процессов и явлений отдельных элементов схемы на исследуемый сигнал	Введение фильтров в цепи, подверженные влиянию высокочастотных помех
Отсутствие активных усилительных элементов	Отсутствие возможности исследовать составляющие электромагнитного поля малой интенсивности	Применение усилительных каскадов на СВЧ-транзисторах
Отсутствие цепей выделения промежуточной частоты в исследуемом сигнале	Отсутствие возможности избирательного измерения на отдельных частотах в границах диапазона 30 МГц – 30 ГГц	Использование цепи гетеродина – схемы, имеющей в своем составе генератор промежуточной частоты, преобразователь частоты и фильтр промежуточной частоты
Отсутствие микропроцессорного вычислительного блока	Отсутствие возможности хранения информации о результатах контроля, математической обработки и вывода результатов измерений в автоматическом режиме на персональный компьютер для дальнейшей обработки	Использование микропроцессорного устройства – микроконтроллера, программного обеспечения и интерфейсов взаимодействия с персональным компьютером

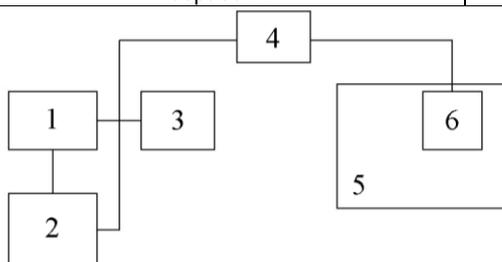


Рис. 1. Схема объединения элементов для избирательного контроля электромагнитных излучений: 1 – балансный модулятор; 2 – кварцевый генератор; 3 – трехполосный фильтр; 4 – сглаживающий фильтр; 5 – микроконтроллер; 6 – цифро-аналоговый преобразователь

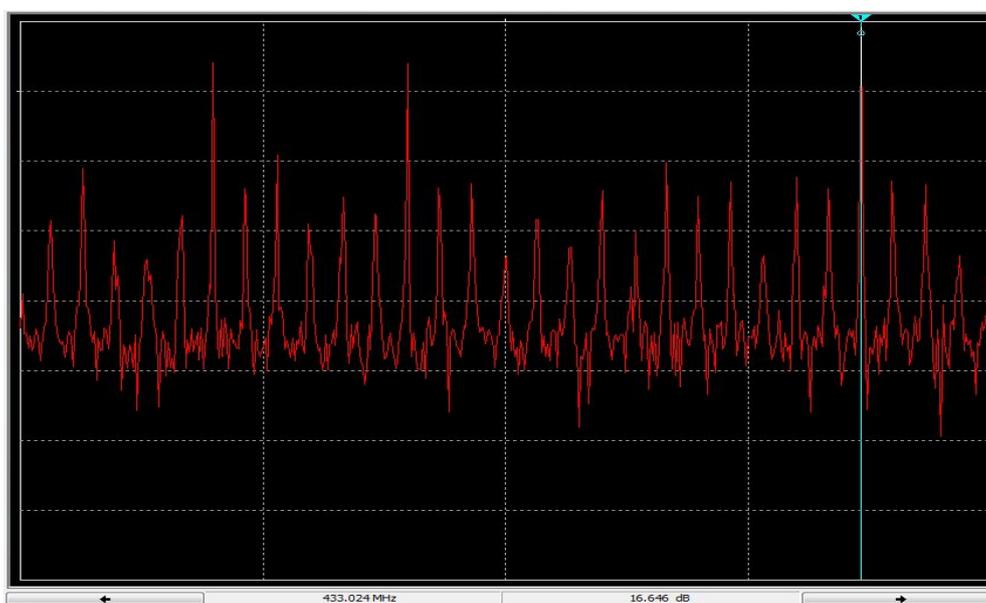


Рис. 2. График входного спектра с выделенной частотой 433 МГц

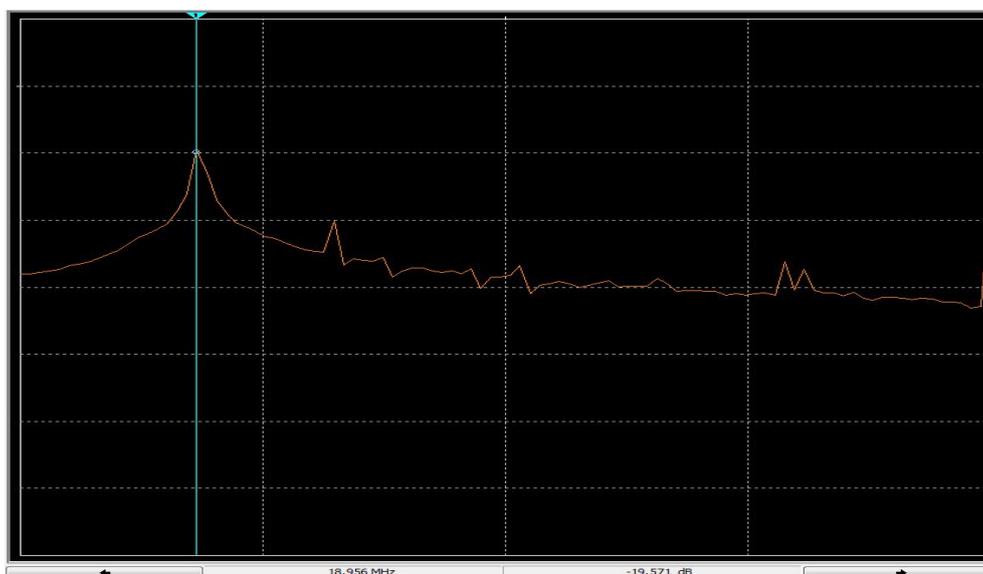


Рис. 3. График выходного спектра электромагнитного сигнала

Выводы

По результатам проведенного анализа основных технических ограничений известных измерительных инструментов для контроля составляющих электромагнитного поля очень высоких, ультравысоких и сверхвысоких частот предложены технические решения по устранению выявленных недостатков, в том числе за счет введения дополнительных элементов, объединение которых предоставляет возможность избирательного контроля составляющих электромагнитного поля на отдельных частотах диапазона 30 МГц – 30 ГГц. Результаты компьютерного моделирования спектральных характеристик электромагнитного сигнала подтверждают возможность избирательного контроля в заявленном частотном диапазоне и вывода результатов исследования на компьютер для обработки по универсальному алгоритму и представления в формализованной структуре.

Библиографический список

1. Рекомендация МСЭ-R V.431-8. Номенклатура диапазонов частот и длин волн, используемых в электросвязи / Международный союз электросвязи. – 2015. – 5 с. – Текст: непосредственный.
2. Titov, E.V., Soshnikov, A.A., Drobyazko, O.N. A Low-Frequency Electromagnetic Radiation Analyzer to Determine the Risk-Contributing Factors of an Electromagnetic Situation. *Russ. Electr. Engin.* 89, 714–716 (2018). <https://doi.org/10.3103/S1068371218120106>.

3. Черных, С. В. Анализ влияния микроволнового излучения сотовой связи на человека / С.В. Черных. – Текст: электронный // НБИ-технологии. – 2018. – Т. 12, № 3. – С. 37-46. – URL: <https://doi.org/10.15688/NBIT.jvolsu.2018.3.6> (дата обращения: 08.04.2022). – Режим доступа: свободный.

4. Hirata, A., Diao, Y., Onishi, T., et al. (2021). Assessment of human exposure to electromagnetic fields : review and future directions. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 63 (5), 1619–1630. DOI: <https://doi.org/10.1109/TEMC.2021.3109249>.

5. Ramdani, M., Sicard, E., Boyer, A., et al. (2009). The Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits - Past, Present, and Future. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 51. 78-100. DOI: 10.1109/TEMC.2008.2008907.

6. 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: электронный // Информационные технологии. – 2021. – Т. 19, № 2. – С. 232-238. – URL: <https://doi.org/10.18469/ikt.2021.19.2.12> (дата обращения: 24.03.2022). – Режим доступа: свободный.

7. Патент № 2298801. Российская Федерация МПК G01R 21/04. Измеритель мощности СВЧ / Зюзенков В. П. – № 2005135371; заявл. 14.11.2005; опубл. 10.05.2007. – Текст: непосредственный.

8. Патент № 2098837. Российская Федерация МПК G01R 29/08. Индикатор интенсивности

электромагнитного излучения / Шестун А. Н., Шур В. Н., Чадаев В. И. – № 95111565; заявл. 11.07.1995; опубл. 10.12.1997. – Текст: непосредственный.

9. Патент № 2337370. Российская Федерация МПК G01R 29/08. Способ и устройство для измерения напряженности электромагнитного поля / Рыбников Ю. С., Александров В. Б. – № 2007114143; заявл. 16.04.2007; опубл. 27.10.2008. – Текст: непосредственный.

10. Titov E.V., Soshnikov A.A., Migalev I.E. (2022). 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*. 22 (1): 34-40, ID No. 20210317-036J. – DOI: <https://doi.org/10.26866/jees.2022.1.r.58> (data obrashcheniia: 15.03.2022).

11. Патент № 2744090. Российская Федерация МПК H01L 31/00, G01R 29/08. Устройство контроля электромагнитных излучений в тройном диапазоне частот / Титов Е. В., Сошников А. А., Иванов П. В., Казакеев А. Г. – № 2020121510; заявл. 25.06.2020; опубл. 02.03.2021. – Текст: непосредственный.

12. Multisim. NI Community. – URL: <https://www.ni.com/ru-ru/support/downloads/software-products/download.multisim.html#312060> (дата обращения: 04.05.2022). – Режим доступа: свободный.

References

1. Rek. MSE-R V.431-8. Nomenklatura dia-pazonov chastot i dlin voln, ispolzuemykh v elektrosviazi. – Mezhdunarodnyi soiuz elektrosviazi, 2015. – 5 s.

2. Titov, E.V., Soshnikov, A.A., Droblyazko, O.N. A Low-Frequency Electromagnetic Radiation Analyzer to Determine the Risk-Contributing Factors of an Electromagnetic Situation. *Russ. Electr. Engin.* 89, 714–716 (2018). <https://doi.org/10.3103/S1068371218120106>.

3. Chernykh, S. V. Analiz vliianiia mikrovolnovogo izlucheniia sotovoi sviazi na cheloveka / S.V. Chernykh // NBI-tehnologii. – 2018. – Т. 12, No. 3. – С. 37-46. DOI: <https://doi.org/10.15688/NBIT.jvolsu.2018.3.6> (data obrashcheniia: 08.04.2022).

4. Hirata, A., Diao, Y., Onishi, T., et al. (2021). Assessment of human exposure to electromagnetic fields : review and future directions. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 63 (5),

1619–1630. DOI: <https://doi.org/10.1109/TEMC.2021.3109249>.

5. Ramdani, M., Sicard, E., Boyer, A., et al. (2009). The Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits - Past, Present, and Future. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 51. 78-100. DOI: 10.1109/TEMC.2008.2008907.

6. 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: <https://doi.org/10.18469/ikt.2021.19.2.12> (data obrashcheniia: 24.03.2022).

7. Pat. na izobretenie No. 2298801. Rossiiskaia Federatsiia MPK G01R 21/04. Izmeritel moshchnosti SVCh / V.P. Ziuzenkov. – No. 2005135371; zaiavl. 14.11.2005; opubl. 10.05.2007.

8. Pat. na izobretenie No. 2098837. Rossiiskaia Federatsiia MPK G01R 29/08. Indikator intensivnosti elektromagnitnogo izlucheniia / A.N. Shestun, V.N. Shur, V.I. Chadaev. – No. 95111565; zaiavl. 11.07.1995; opubl. 10.12.1997.

9. Pat. na izobretenie No. 2337370. Rossiiskaia Federatsiia MPK G01R 29/08. Sposob i ustroistvo dlia izmereniia napriazhennosti elektromagnitnogo polia / Iu.S. Rybnikov, V.B. Aleksandrov. – No. 2007114143; zaiavl. 16.04.2007; opubl. 27.10.2008.

10. Titov E.V., Soshnikov A.A., Migalev I.E. (2022). 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*. 22 (1): 34-40, ID No. 20210317-036J. – DOI: <https://doi.org/10.26866/jees.2022.1.r.58> (data obrashcheniia: 15.03.2022).

11. Pat. na izobretenie No. 2744090. Rossiiskaia Federatsiia MPK H01L 31/00, G01R 29/08. Ustroistvo kontroliia elektromagnitnykh izlucheniia v troinom diapazone chastot / E.V. Titov, A.A. Soshnikov, P.V. Ivanov, A.G. Kazakeev. – No. 2020121510; zaiavl. 25.06.2020; opubl. 02.03.2021.

12. Multisim. NI Community. – URL: <https://www.ni.com/ru-ru/support/downloads/software-products/download.multisim.html#312060> (data obrashcheniia: 04.05.2022).