

УДК 537.8:631.17

Е.В. Титов, А.А. Сошников, И.Е. Мигалёв
Ye.V. Titov, A.A. Soshnikov, I.Ye. Migalev

АВТОМАТИЗАЦИЯ ВЫБОРА ЗАЩИТНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

THE AUTOMATION OF SELECTION OF PROTECTIVE MEASURES TO ENSURE ELECTROMAGNETIC SAFETY

Ключевые слова: электромагнитные излучения, электромагнитная безопасность, интеллектуализированная система, компьютерное моделирование, визуализация электромагнитной обстановки, картины опасности ЭМИ, автоматизированный выбор защиты, защитное экранирование.

Рассматриваются вопросы обеспечения электромагнитной безопасности в современных условиях интенсивного использования электромагнитной энергии, загрязняющей электромагнитный фон окружающей среды. Учитывая, что источники электромагнитных полей получают всё более широкое распространение в различных сферах жизнедеятельности человека, включая производственные и коммунально-бытовые объекты, усиливается воздействие на все биологические объекты, что повышает актуальность нормализации электромагнитной обстановки. Для обеспечения электромагнитной безопасности в различных сферах производства и в быту при неопределённости частотных диапазонов и характера распределения в пространстве электромагнитного поля предложено использование интеллектуализированной системы, позволяющей по результатам оценки опасности электромагнитных излучений обосновать мероприятия по защите временем и расстоянием, а также с помощью пакета специализированных программ производить автоматизированный выбор защитных мероприятий. При этом используется принципиально новый подход, учитывающий возможность одновременного влияния и усиление

результатирующего действия нескольких источников электромагнитных излучений. Рассмотрены принципы контроля и нормализации электромагнитной обстановки. Представлены результаты экспериментальных измерений напряжённости электрического поля на частоте 30 кГц и плотности потока энергии на частоте 2450 МГц вблизи опытной СВЧ-установки для предпосевной обработки семян. Приведены компьютерные модели электромагнитной обстановки в виде картин распределения напряжённости электрического поля на частоте 30 кГц и плотности потока энергии на частоте 2450 МГц. Представлены цилиндрические картины опасности электромагнитных излучений (в форме карт допустимого времени пребывания) на частотах 30 кГц и 2450 МГц до экранирования установки и после внедрения системы экранирования. Произведена оценка эффективности выбранной системы защитного экранирования.

Keywords: electromagnetic radiation, electromagnetic safety, intellectualized system, computer modeling, electromagnetic environment visualization, danger pictures of electromagnetic radiation, automated protection selection, protective shielding.

This paper discusses the issues of ensuring electromagnetic safety under modern conditions of intensive use of electromagnetic energy that pollutes the electromagnetic background of the environment. Normalization of the electromagnetic environment is relevant since the sources of electromagnetic fields are becoming more

widespread in various spheres of human life (for example, industrial and municipal facilities) and the impact on all biological objects is increasing. The use of an intellectualized system of the electromagnetic environment is proposed to ensure electromagnetic safety in various areas of production and in everyday life with uncertainty of frequency ranges and the nature of distribution in the space of the electromagnetic field. This allows justifying the protection measures by time and distance based on the results of the assessment of the danger of electromagnetic radiation. It will be possible to use a package of specialized software to make an automated selection of protective measures. A fundamentally new approach is used which takes into account the simultaneous influence and amplification of the resulting action from several sources of electromagnetic radiation. The principles

of control and normalization of the electromagnetic environment are considered. The results of experimental measurements of the electric field strength at a frequency of 30 kHz and the energy flux density at a frequency of 2450 MHz near the experimental microwave installation for pre-sowing seed treatment are presented. Computer models of the electromagnetic environment are presented in the form of pictures of the distribution of the electric field intensity at a frequency of 30 kHz and the energy flux density at a frequency of 2450 MHz. Cylindrical pictures of the danger of electromagnetic radiation (in the form of maps of the allowed stay time) at the frequencies of 30 kHz and 2450 MHz before the shielding of the installation and after the introduction of the shielding system are presented. The efficiency of the selected protective shielding system was evaluated.

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

Мигалёв Иван Евгеньевич, к.т.н., вед. программист, ООО «Энтерра», г. Новосибирск. Тел.: (383) 328-44-09. E-mail: i.migalev@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.

Migalev Ivan Yevgenyevich, Cand. Tech. Sci., Leading Software Programmer, ООО "Enterra", Novosibirsk. Ph.: (383) 328-44-09. E-mail: i.migalev@gmail.com.

Введение

Российские и международные нормативно-правовые документы в области электромагнитной безопасности регламентируют проведение защитных мероприятий от влияния электромагнитных полей (ЭМП), которые в большинстве случаев предусматривают защиту временем и расстоянием, а также экранирование [1-6]. Однако известные технологии [7-15] проблематично использовать в условиях одновременного воздействия различных составляющих ЭМП с различными частотными диапазонами. Это связано с необходимостью обоснования и реализации совокупности мероприятий, учитывающих параметры действующих составляющих ЭМП и электрические и магнитные свойства материалов экранов, их конструктивные и геометрические параметры и т.п. [5, 6].

Решение выявленных проблем считается достаточно трудоёмким. Поэтому **целью** исследований явилась автоматизация контроля электромагнитной обстановки и процесса выбора соответствующей защиты, в частности, эффективного экранирования, с помощью разработанной с участием авторов интеллектуализированной системы [16-18], использование которой позволяет существенно упростить технологию внедрения защитных мероприятий.

Объекты и методы

При обеспечении электромагнитной безопасности следует руководствоваться принципами выбора мер защиты в отношении людей, профессионально не связанных с эксплуатацией и обслуживанием источников

электромагнитных излучений (ЭМИ) и, производственного персонала [6].

В отношении населения проводятся мероприятия по защите временем, заключающиеся в определении допустимого времени с учетом влияния температуры и влажности воздуха, в течение которого возможно длительное пребывание в выявленных опасных зонах контролируемого пространства. Дополнительно выполняется перемещение источников излучения на максимально возможное расстояние от зон длительного пребывания.

Для производственных условий кроме выбора комбинированных мероприятий по защите временем и расстоянием, как и для населения, дополнительно могут использоваться различные системы экранирования [7-15, 18].

Разработанная интеллектуализированная система позволяет оценивать опасность ЭМИ [16-18], а с помощью разработанного программного обеспечения (более 30 специализированных программ) выбирать пара-

метры эффективных экранирующих устройств в зонах влияния переменных электрических и/или магнитных, и/или электромагнитных полей в условиях их комбинированного воздействия.

Технология оценки опасности ЭМИ схематично представлена на рисунке 1 [17-19]. При этом точечную картину опасности удобно использовать при оценке электромагнитной обстановки в непромышленных условиях, а для производственных объектов предлагается цилиндрическая картина опасности [19], представляющая пространственную совокупность цилиндрических зон помещения с заранее заданным радиусом.

Полученные с помощью разработанной системы картины опасности ЭМИ используются для обоснования мероприятий по защите временем и расстоянием, а разработанный пакет специализированных программ позволяет проводить автоматизированный выбор эффективного экранирования, схема которого представлена на рисунке 2.

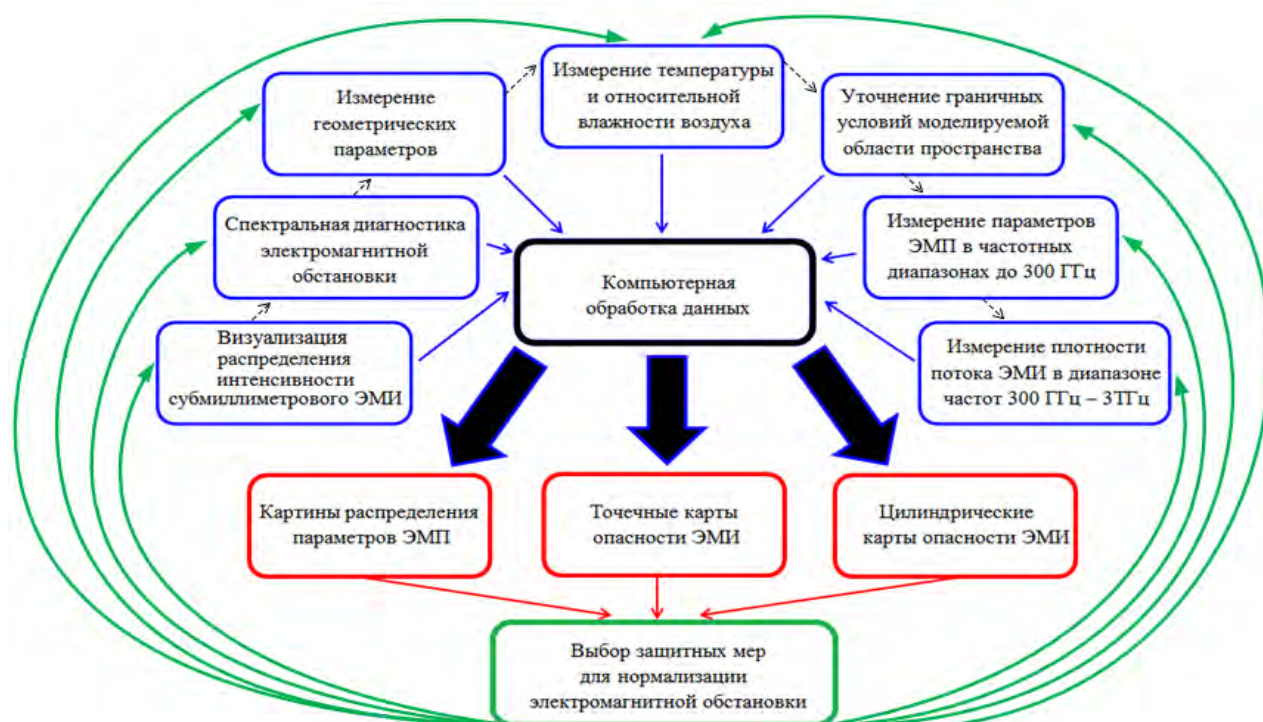


Рис. 1. Принципы обеспечения электромагнитной безопасности



Рис. 2. Схема выбора эффективного экранирования

Экспериментальная часть

Ниже представлены результаты практического применения разработанной системы для выбора защиты от ЭМИ на примере экспериментальной установки для предпосевной обработки семян (рис. 3), разработанной в Красноярском государственном аграрном университете [20].



Рис. 3. Экспериментальная установка:
1 – блок подачи зерна; 2 – рабочая камера;
3 – выходной блок

По результатам анализа спектрального состава ЭМИ выявлены две наиболее опасные частотные составляющие электромагнитного поля: 30 кГц и 2450 МГц. В результате измерений параметров ЭМП на этих частотах вблизи каждого из блоков экспериментальной установки зафиксирован высокий уровень опасности (табл.), поэтому требуется проведение инженерно-технических мероприятий для обеспечения электромагнитной безопасности.

Результаты и их обсуждение

Результаты компьютерного моделирования представлены в виде картин распределения параметров ЭМП, называемых электромагнитными портретами (рис. 4, 5), а также картин опасности ЭМИ в виде цилиндрических карт допустимого времени пребывания (рис. 6, 7) [19].

С учётом выявленных опасных излучений произведен автоматизированный выбор экранирующего материала: алюминиевой сетки с шагом 5 мм. После установки экрана выполнены повторные исследования электромагнитной обстановки и ее компьютерное моделирование.

На рисунке 8 показана карта допустимого времени пребывания в электрическом поле частотой 30 кГц после экранирования [19]. Время допустимого пребывания в течение рабочей смены, которое возле блока 1 до экранирования составляло 30 мин., увеличилось до 2 ч, а возле блока 3 – с 2 ч до 6 ч.

С учётом выявленных опасных излучений произведен автоматизированный выбор экранирующего материала: алюминиевой сетки с шагом 5 мм. После установки экрана выполнены повторные исследования электромагнитной обстановки и ее компьютерное моделирование.

Результаты измерения уровней излучения установки

Исследуемый объект	Область контроля	Напряженность электрического поля (частота 30 кГц), В/м	Плотность потока энергии (частота 2450 МГц), мкВт/см ²
		данные измерений при $t_{\text{факт}}=+24^{\circ}\text{C}$, факт $\Phi_{\text{факт}} = 43\%$	данные измерений при $t_{\text{факт}}=+24^{\circ}\text{C}$, $\Phi_{\text{факт}} = 43\%$
Блок подачи зерна	Центральная верхняя	54,62	548,97
	Центральная нижняя	96,65	9,25
	Западная	66,18	3,69
	Восточная	57,73	3,98
	Южная	141,78	376,87
Рабочая камера	Центральная верхняя	47,84	1,37
	Центральная нижняя	133,86	3,82
	Западная	153,17	2,91
	Восточная	46,44	431,05
Выходной блок	Центральная верхняя	40,87	1,3
	Центральная нижняя	144,12	1,42
	Западная	119,15	3,06
	Восточная	129,49	2,43
	Северная	67,98	380,79
Предельно допустимый уровень [5, 6]		50	25

Примечание. Предельно допустимый уровень приведен для 8-часового рабочего дня; красным цветом выделены значения, превышающие ПДУ.

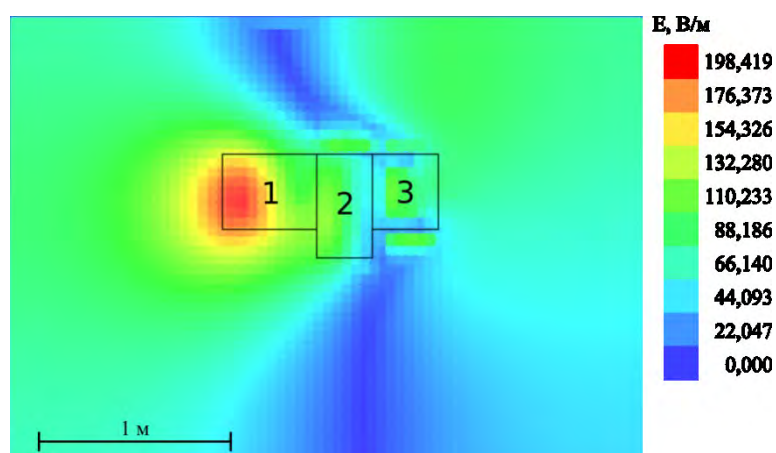


Рис. 4. Электромагнитный портрет электрического поля для частоты 30 кГц

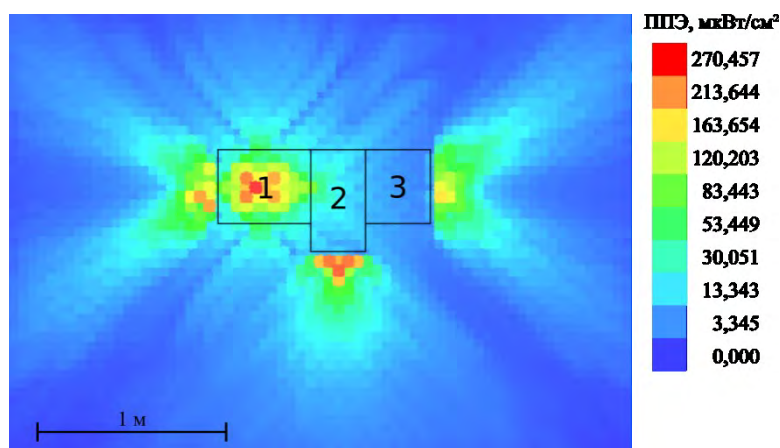


Рис. 5. Электромагнитный портрет ЭМП для частоты 2450 МГц

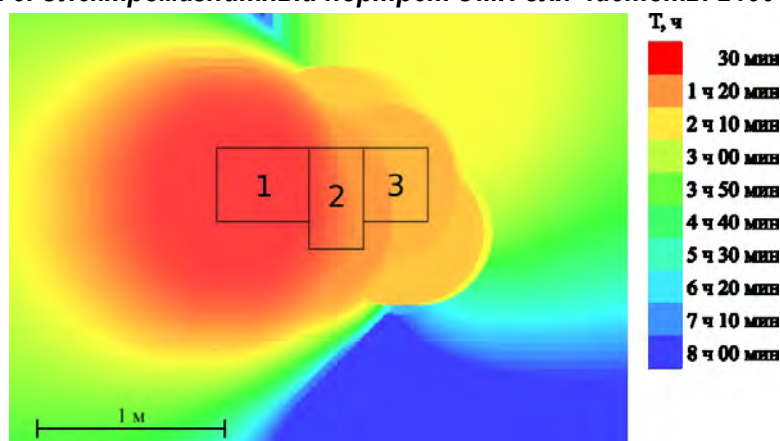


Рис. 6. Карта допустимого времени пребывания в электрическом поле частотой 30 кГц

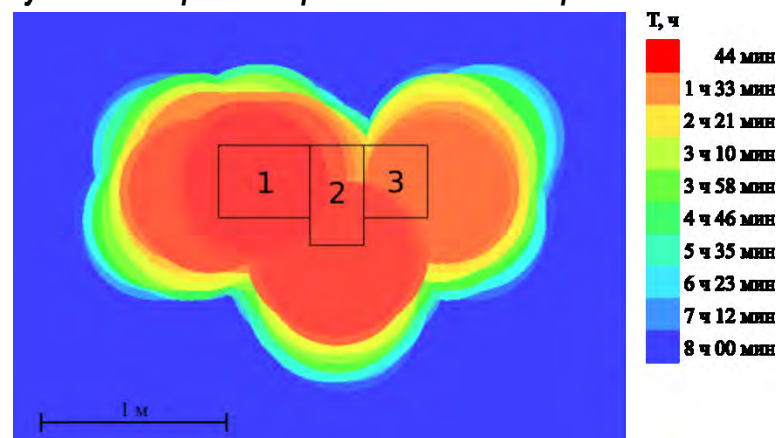


Рис. 7. Карта допустимого времени пребывания в ЭМП частотой 2450 МГц

На рисунке 8 показана карта допустимого времени пребывания в электрическом поле частотой 30 кГц после экранирования [19]. Время допустимого пребывания в течение рабочей смены, которое возле блока 1 до экранирования составляло 30 мин., увеличилось до 2 ч, а возле блока 3 – с 2 ч до 6 ч.

На рисунке 9 показана карта допустимого времени пребывания в ЭМП частоте 2450 МГц после экранирования [19]. Для этой частотной составляющей электромагнитного поля также зафиксировано снижение уровня опасности: время допустимого пребывания возле блока 1 возросло с 44 мин. до 1 ч 36 мин., а возле блока 3 – с 1 ч 12 мин. до 2 ч 19 мин.

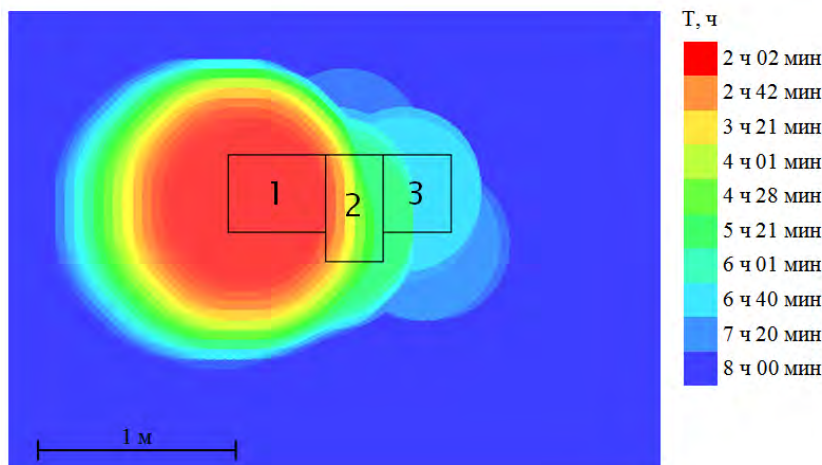


Рис. 8. Карта допустимого времени пребывания в электрическом поле частотой 30 кГц после экранирования

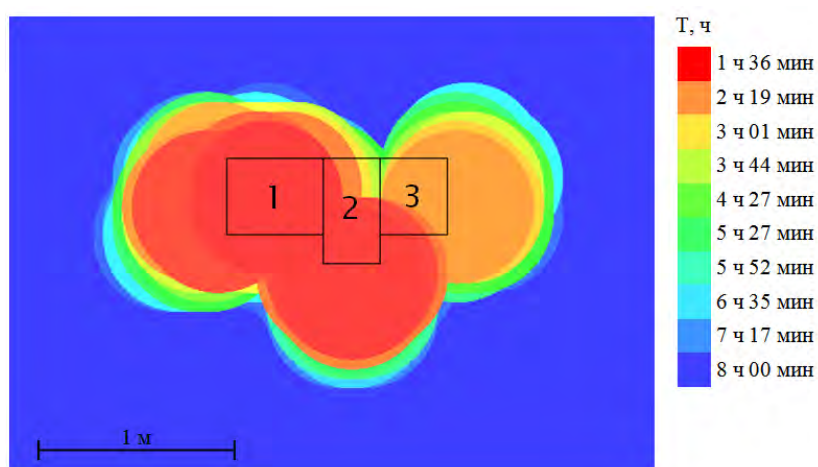


Рис. 9. Карта допустимого времени пребывания в ЭМП частотой 2450 МГц после экранирования

Заключение

Согласно полученным экспериментальным данным, можно сделать вывод об увеличении времени допустимого пребывания в наиболее опасных зонах контролируемого пространства почти в 3 раза. Это подтверждает эффективность выбранного экрана и целесообразность использования разработанной системы для автоматизированного контроля опасности ЭМИ и выбора инженерно-технических мероприятий по обеспечению электромагнитной безопасности.

Библиографический список

1. IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency

Electromagnetic Fields, 3kHz to 300 GHz, IEEE Standard C95.1-2005 (Revision of IEEE Standard C95.1-1991).

2. IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz Amendment 1: Specifies Ceiling Limits for Induced and Contact Current, Clarifies Distinctions between Localized Exposure and Spatial Peak Power Density, IEEE Standard C95.1a-2010 (Amendment to IEEE Std C95.1-2005).

3. IEEE Standard for Safety Levels With Respect to Human Exposure to Electromagnetic Fields, 0-3 kHz, IEEE Standard C95.6-2002.

4. IEEE Recommended Practice for Radio Frequency Safety Programs, 3 kHz to 300 GHz,

IEEE Standard C95.7-2014 (Revision of IEEE Std C95.7-2005).

5. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы Российской Федерации СанПиН 2.1.2.2645-10. Санитарно-эпидемиологические требования к условиям проживания в жилых зданиях и помещениях. – 2010. – Текст: непосредственный.

6. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы Российской Федерации СанПиН 2.2.4.3359-16. Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах. – 2016. – Текст: непосредственный.

7. Ahlbom, A., et al. (1998). Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Phys.* 74 (4): 494-522.

8. Foster, K., Ziskin, M., Balzano, Q., Hirata, A. (2018). Thermal Analysis of Averaging Times in Radio-frequency Exposure Limits Above 1 GHz. *IEEE Access.* PP. 1-1. Doi: 10.1109/ACCESS.2018.2883175.

9. Krause, A., Nguyen, L., Tuan, C., et al. (2012). Conductive Concrete as an Electromagnetic Shield. *2012 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compability.* 6351806, pp. 85-87.

10. Sidorov A.I., Okrainskaya I.S., Tavarov S.Sh. Mapping of distribution of the electric field along the 500 kV transmission lines in the Republic of Tajikistan. *Bulletin of the Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi.* Vol. 25, no. 1, pp. 56-59, 2014.

11. Okrainskaya, I., Sidorov, A., Gladyshev, S. (2012). Staff protection in super high voltage electric substations by using of the electric field measurement devices. *IEEE International Conference on Electro/Information Technology.* 1-6. Doi: 10.1109/EIT.2012.6220756.

12. Tavarov, S., Sidorov, A., Medvedeva, V. (2016). Servicing of the 500 kV transmission

lines with the use of calculate cards of intensity distribution in electric field of industrial frequency. *2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM).* 1-4. Doi: 10.1109/ICIEAM.2016.7910980.

13. Okrainskaya, I., Gladyshev, S., Sidorov, A. (2014). Distribution of the electric field intensity near the equipment of the 500 kV power substation. *2014 IEEE International Conference on Electro/Information Technology (EIT).* 216-220. Doi: 10.1109/EIT.2014.6871764.

14. Lin, S.-C., Ma, C.-C., Hsiao, S.-T., et al. (2016). Electromagnetic interference shielding performance of waterborne polyurethane composites filled with silver nanoparticles deposited on functionalized graphene. *Applied Surface Science.* 385. Doi: 10.1016/j.apsusc.2016.05.063.

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).* 909-910. Doi: 10.1109/INFOCOMW.2019.8845229.

16. Патент № 2713096. Российская федерация СПК G01R 29/08 (2019.08). Мобильный аппаратно-программный комплекс для автоматизированного контроля и оценки состояния электромагнитной обстановки / Сошников А. А., Титов Е. В., Мигалев И. Е. / патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ). – № 2018122578; заявл. 20.06.2018; опубли. 03.02.2020. – Текст: непосредственный.

17. Soshnikov A., Migalev I., Titov E. (2016). Principles of Functioning of Technological Module for Danger Estimation of Combined

Electromagnetic Field. *Procedia Engineering*. 165. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.815>.

18. 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>.

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

20. П. м. 2015153603 Российская Федерация. Установка для предпосевной обработки семян СВЧ-энергией / А. В. Бастрон, А. В. Исаев, А. В. Мещеряков. Свидетельство Роспатента об официальной регистрации полезной модели от 14.12.2015 г. – Текст: непосредственный.

References

1. IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3kHz to 300 GHz, IEEE Standard C95.1-2005 (Revision of IEEE Standard C95.1-1991).

2. IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz Amendment 1: Specifies Ceiling Limits for Induced and Contact Current, Clarifies Distinctions between Localized Exposure and Spatial Peak Power Density, IEEE Standard C95.1a-2010 (Amendment to IEEE Std C95.1-2005).

3. IEEE Standard for Safety Levels With Respect to Human Exposure to Electromagnetic Fields, 0-3 kHz, IEEE Standard C95.6-2002.

4. IEEE Recommended Practice for Radio Frequency Safety Programs, 3 kHz to 300 GHz,

IEEE Standard C95.7-2014 (Revision of IEEE Std C95.7-2005).

5. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы Российской Федерации СанПиН 2.1.2.2645-10. Санитарно-эпидемиологические требования к условиям проживания в жилых зданиях и помещениях, 2010.

6. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы Российской Федерации СанПиН 2.2.4.3359-16. Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах, 2016.

7. Ahlbom, A., et al. (1998). Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Phys.* 74 (4): 494-522.

8. Foster, K., Ziskin, M., Balzano, Q., Hirata, A. (2018). Thermal Analysis of Averaging Times in Radio-frequency Exposure Limits Above 1 GHz. *IEEE Access*. PP. 1-1. Doi: 10.1109/ACCESS.2018.2883175.

9. Krause, A., Nguyen, L., Tuan, C., et al. (2012). Conductive Concrete as an Electromagnetic Shield. *2012 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. 6351806, pp. 85-87.

10. Sidorov A.I., Okrainskaya I.S., Tavarov S.Sh. Mapping of distribution of the electric field along the 500 kV transmission lines in the Republic of Tajikistan. *Bulletin of the Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi*. Vol. 25, no. 1, pp. 56-59, 2014.

11. Okrainskaya, I., Sidorov, A., Gladyshev, S. (2012). Staff protection in super high voltage electric substations by using of the electric field measurement devices. *IEEE International Conference on Electro/Information Technology*. 1-6. Doi: 10.1109/EIT.2012.6220756.

12. Tavarov, S., Sidorov, A., Medvedeva, V. (2016). Servicing of the 500 kV transmission lines with the use of calculate cards of intensity distribution in electric field of industrial frequen-

cy. 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 1-4. Doi: 10.1109/ICIEAM.2016.7910980.

13. Okrainskaya, I., Gladyshev, S., Sidorov, A. (2014). Distribution of the electric field intensity near the equipment of the 500 kV power substation. *2014 IEEE International Conference on Electro/Information Technology (EIT)*. 216-220. Doi: 10.1109/EIT.2014.6871764.

14. Lin, S.-C., Ma, C.-C., Hsiao, S.-T., et al. (2016). Electromagnetic interference shielding performance of waterborne polyurethane composites filled with silver nanoparticles deposited on functionalized graphene. *Applied Surface Science*. 385. Doi: 10.1016/j.apsusc.2016.05.063.

15. Djuric, N., Kavecan, 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)*. 909-910. Doi: 10.1109/INFOCOMW.2019.8845229.

16. Pat. na izobretenie No. 2713096. Rossiyskaya federatsiya SPK G01R 29/08 (2019.08). Mobilnyy apparatno-programmnyy kompleks dlya avtomatizirovannogo kontrolya i otsenki sostoyaniya elektromagnitnoy

obstanovki / A.A. Soshnikov, E.V. Titov, I.E. Migalev / patentoobladatel: Federalnoe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Altayskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet im. I.I. Polzunova» (AltGTU). – No. 2018122578; zayavl. 20.06.2018; opubl. 03.02.2020.

17. Soshnikov A., Migalev I., Titov E. (2016). Principles of Functioning of Technological Module for Danger Estimation of Combined Electromagnetic Field. *Procedia Engineering*. 165. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.815>.

18. 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>.

19. Migalev I.E. Avtomatizirovanny kontrol elektromagnitnykh izlucheniyy v tekhnologiyakh APK: dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk / I.E. Migalev. – Barnaul, 2018. – 126 s.

20. P.m. 2015153603 Rossiyskaya Federatsiya. Ustanovka dlya predposevnoy obrabotki semyan SVCh-energiy / A.V. Bastron, A.V. Isaev, A.V. Meshcheryakov. Svidetelstvo Rospatenta ob ofitsialnoy registratsii poleznoy modeli ot 14.12.2015 g.

