

**МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ СРЕДСТВ И СИСТЕМ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ
ОТ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ**

М. С. ТЕРЕХОВА

(Научно-технический центр «ЛЭМТ», Минск);

Г. А. ПУХИР, д-р техн. наук, доц. Н. В. НАСОНОВА

*(Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники, Минск)*

Представлены результаты исследования воздействия высокоинтенсивного электромагнитного излучения на композиционные радиопоглощающие материалы. Проведена оценка эффективности защиты информации в условиях воздействия сверхширокополосным электромагнитным импульсом на экраны электромагнитного излучения на основе полимеров с различными наполнителями углеродных, ферромагнитных и водосодержащих композиционных материалов с учетом их устойчивости при облучении мощным источником электромагнитной энергии. Установлено, что тепловые эффекты, возникающие при поглощении электромагнитной энергии высокой мощности, в основном определяются значением диэлектрической проницаемостью и величиной диэлектрических потерь.

Ключевые слова: *высокоинтенсивное электромагнитное излучение, электромагнитные экраны, радиопоглотители, композиционные материалы, диэлектрические потери, сверхширокополосный электромагнитный импульс.*

Мощные электромагнитные воздействия могут вызывать отказы и сбои систем управления и контроля, отказы систем наведения и посадки самолетов, неустойчивую работу линий связи, потери информации в компьютерах, сбои и зависания цифровой аппаратуры обработки информации, травмы персонала.

Прогнозируемые характеристики ЭМИ различных типов СВЧ-систем показывают, что характеристики разрабатываемых и существующих систем генерации мощных ЭМИ составляют до единиц ГВт по мощности с различной длительностью импульса (доли наносекунд – сотни микросекунд) и периодами повторения [1–2].

Проведенный анализ литературных данных по исследованию устойчивости ЭС и ЛВС при преднамеренном воздействии СКИ ЭМИ [3–5] показал, что наиболее уязвимыми местами систем обработки информации являются исполнительные устройства: контроллеры, сервера, а также каналы передачи данных.

Экранирование является важным элементом комплексного подхода для защиты РЭО от воздействия мощных СШП ЭМИ. Защитные материалы, предлагаемые в настоящее время для экранирования мощных СШП ЭМИ, в основном представляют собой полимерные композиции, предназначенные для объемных поглотителей высокочастотной энергии, и в качестве основного связующего содержат эпоксидные смолы или полиуретановые полимеры, а в качестве поглощающей дисперсии – карбонильное радиотехническое железо или углеродные частицы. Целью работы являлся анализ эффективности применения традиционных радиопоглощающих композиционных материалов при мощных ЭМ воздействиях с различными параметрами и их устойчивости к такому воздействию.

Мощность, поглощенная в единице объема, определяется частотой падающего излучения и тангенсом диэлектрических потерь материала.

$$P = 1/2\omega\epsilon_0\epsilon'\tan\delta E^2, \quad \text{Вт/м}^3 \quad (1)$$

где E – напряженность внешнего электрического поля, В/м;
 ϵ_0 – диэлектрическая постоянная;
 ϵ' – диэлектрическая проницаемость нагреваемого материала;
 $\tan \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь;
 ω – частота электрического поля, Гц [6].

Нагрев диэлектрика в электромагнитном поле определяется также его физическими параметрами, такими как плотность и теплоемкость.

На основе уравнений Максвелла из температурных и полевых зависимостей поляризации диэлектрика можно рассчитать величину адиабатического изменения температуры ΔT вследствие электрокалорического эффекта:

$$\Delta T = - \int_0^{\epsilon_1} \frac{T}{\rho C_E} \left(\frac{\partial P(T, E)}{\partial T} \right)_E dE, \quad (2)$$

где ρ – плотность материала, кг/м³;
 C_E – удельная теплоемкость при постоянных электрических полях, Дж/(кг·К);
 E – напряженность электрического поля, В/м²;
 P – поляризация диэлектрика, Кл/м² [7].

Для композиционных материалов эти параметры являются функциями от многих переменных – концентрации, способа изготовления, состава, характерных размеров и распределения компонентов, и на практике в основном определяются экспериментально.

Для исследования были разработаны образцы композитов с различными составом, структурой и электрофизическими свойствами – с наполнителями на основе углеродных и металлических порошков, а также пористых порошковых

матриц, пропитанных жидким диэлектриком, введенных в различные связующие: на основе полиуретана, эпоксидных смол и силикона.

Для образцов были исследованы электрофизические характеристики композитов в диапазоне частот 8–12 ГГц (рис. 1).

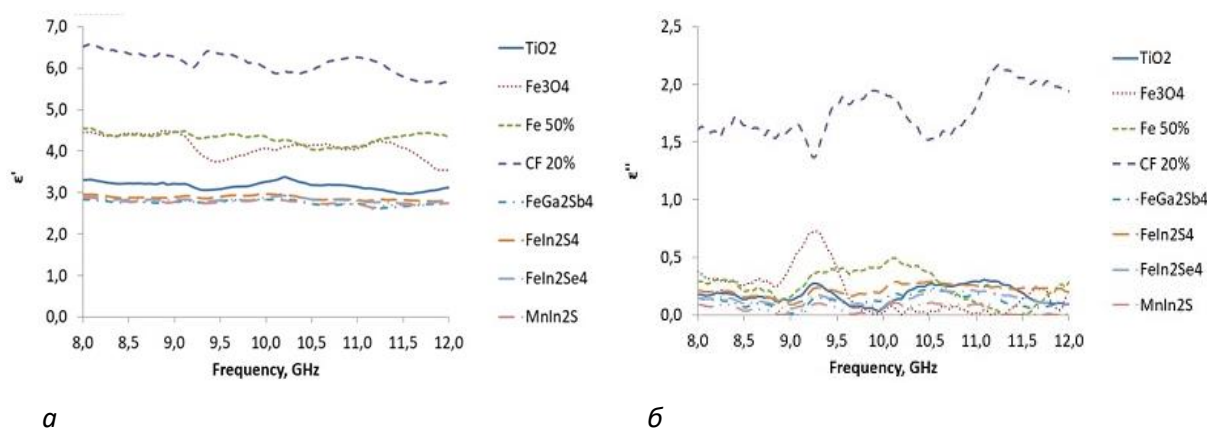


Рисунок 1. – Частотная зависимость диэлектрической проницаемости (действительной (а) и мнимой (б) частей) в диапазоне 8–12 ГГц образцов на основе силиконового связующего с различными порошковыми наполнителями

Углеродные волокна распределялись в различных матрицах (силикон, эпоксидное связующее, пенополиуретан). Эпоксидное связующее варьировалось в различной концентрации от 5 до 20% в объеме композита. Значение комплексной диэлектрической проницаемости образцов композиционных материалов на основе углеродных волокон составляет 7 до 110.

Ориентационная поляризация молекул воды в условиях воздействия сверхвысокочастотного электромагнитного излучения обуславливает дисперсию диэлектрической проницаемости влагосодержащих материалов электромагнитных экранов. С увеличением влагосодержания от остаточного в размере 10 масс. % до 50 масс. % матрицы высокой плотности на основе влагосодержащего силикагеля наблюдается равномерный рост комплексной диэлектрической проницаемости: с 3 до 20 для действительной части и с 0,5 до 5 для диэлектрических потерь, которые определяются мнимой частью диэлектрической проницаемости ϵ'' .

Исследования диэлектрических свойств образцов влагосодержащего силикагеля в силиконовом связующем в диапазоне частот 8–12 ГГц представлены на рис. 2.

Для анализа тепловыделения композиционных материалов при взаимодействии с мощным электромагнитным излучением использовался программный пакет ComsolMultiphysics. Моделирование предполагает варьирование следующих параметров для оценки процессов поглощения электромагнитной энергии и преобразования энергии в тепловую для композиционных материалов: теплопроводность, Вт/м·К; теплоемкость, кДж/м·К; диэлектрическая проницаемость

ϵ' ; диэлектрические потери ϵ'' ; плотность ρ , кг/м³. В процессе моделирования были заданы следующие параметры излучения: непрерывное излучение с частотой 4,2 ГГц, плотность потока мощности составляла от 0,0265 до 100 кВт/м².

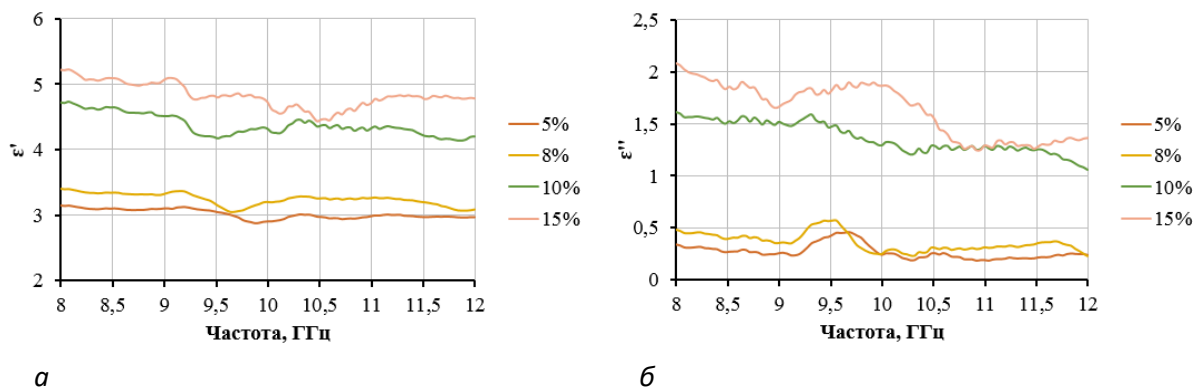


Рисунок 2. – Частотная зависимость диэлектрической проницаемости (действительной (а) и мнимой (б) частей) в диапазоне 8–12 ГГц образцов на основе влагосодержащего силикагеля в силиконовом связующем

Показано, что критическое значение при нагреве материала имеет его величина диэлектрических потерь. Так, для материала с $\epsilon'=5$ и $\epsilon''=2$ время нагрева до температуры деструкции полимера при его облучении мощным непрерывным излучением на частоте 4,2 ГГц составляет 30 сек, в то время как для диэлектрика с малыми потерями $\epsilon'=5$ и $\epsilon''=0,01$ нагрев за 5 мин составляет 13 градусов (рис. 3).

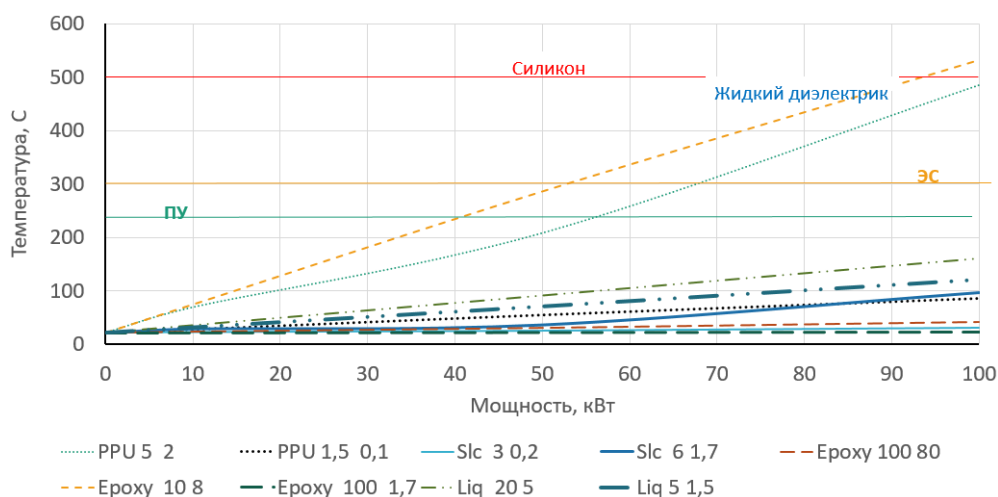


Рисунок 3. – Зависимость температуры нагрева образцов композиционных материалов от мощности воздействующего электромагнитной излучения

Показано, что варьирование теплофизических параметров в модели в пределах, характерных для современных композиционных радиопоглощающих материалов существенного влияния на результаты моделирования не оказывает. Зависимость тепловых эффектов от электрофизических параметров обладает

комплексным и нелинейным характером. Существует диапазон диэлектрических свойств, в котором преобладает поглощение. Превышение порога приводит к снижению скорости нагрева, даже при аналогичном тангенсе угла диэлектрических потерь ($\tan\delta$), вероятно, вследствие повышения доли отражаемой энергии. Низкий уровень диэлектрических потерь приводит к отсутствию эффекта нагрева.

Заметные тепловые эффекты наблюдаются при воздействии непрерывным электромагнитным излучением мощностью 100 кВт/м^2 и выше (продолжительность воздействия <10 сек.).

Профиль распределения температуры после 2 секунд воздействия непрерывного излучения при плотности потока мощности 500 кВт на образец на основе эпоксидного связующего и проводящего наполнителя, приведенный на рисунке 4, показывает, что максимум температуры создается в центре образца (свыше $800 \text{ }^\circ\text{C}$). Заданные граничные условия учитывают теплообмен с окружающей средой (воздух, температура $21 \text{ }^\circ\text{C}$).

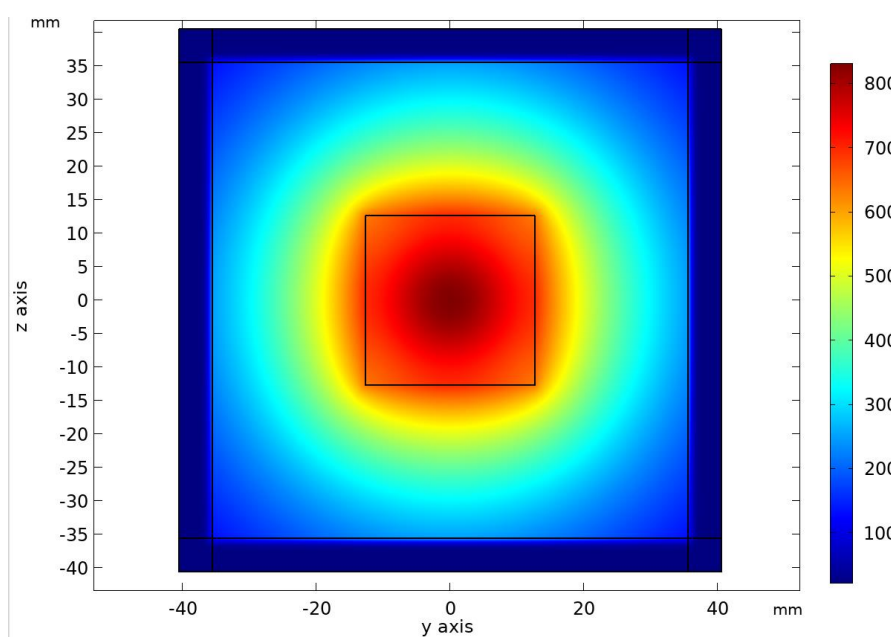


Рисунок 4. – Профиль распределения температуры при воздействии в течение 2 секунд при плотности потока мощности непрерывного излучения 500 кВт для образца на основе эпоксидного связующего с параметрами $\epsilon'=10$, $\epsilon''=8$.

Для разработанных образцов была измерена эффективность экранирования в диапазоне частот $8\text{--}12 \text{ ГГц}$, как отношение амплитуды электрического поля, измеренного до установки экрана, и после его установки. И показано, что эффективность экранирования определяется концентрацией наполнителя, видом связующего и толщиной.

Эффективность экранирования варьируется в диапазоне от 10 до 100 дБ в диапазоне частот $8\text{--}12 \text{ ГГц}$. Максимальное значение характерно для образца

на основе углеродных волокон, распределенных в эпоксидном связующем с концентрацией 35 об.%. Водосодержащие композиты характеризуются достаточно высокой эффективностью экранирования порядка 50 дБ во всем исследуемом частотном диапазоне.

Заключение. Получены результаты нагрева разных композиционных материалов под действием непрерывного и импульсного ЭМИ высокой интенсивности. Показано, что зависимость тепловых эффектов от электрофизических параметров обладает комплексным и нелинейным характером. Эффективность экранирования ЭМИ высокой интенсивности композиционными материалами определяется концентрацией наполнителя, видом связующего и толщиной. Значимые тепловые эффекты (требуемая продолжительность воздействия <10 сек) наблюдаются при облучении композиционных материалов непрерывным электромагнитным излучением мощностью 100 кВт/м² и выше. Влагосодержащие материалы позволяют увеличить время нагрева в 2–3 раза по сравнению с композитами остаточной влажности при одинаковом уровне мощности воздействующего излучения. Эффективность экранирования таких композитов также определяется электрофизическими параметрами наполнителя и связующего и, в зависимости от концентрации и типа наполнителя может достигать 100 дБ в частотном диапазоне 8–12 ГГц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Быстров Р. П., Дмитриев В. Г., Потапов А. А., Перунов Ю. М., Черепенин В. А. Электромагнитные системы и средства преднамеренного воздействия на физические и биологические объекты РЭНСИТ, 2014, том 6(2). – С. 129–169.
2. An Overview of High-Power Electromagnetic (HP EM) Radiating and Conducting Systems / D. V. Giri, F. Tesche // Circuit and Electromagnetic System Design Notes. – Note 50.24. – March 2006. – P. 1–17.
3. Гребенкин А. В. Электромагнитная совместимость электронных технических средств. Реальная необходимость или необходимая реальность // Алгоритм безопасности, № 5, 2017. – С. 54–57.
4. Акбашев Б. Б., Лафишев М. А., Еряшев Д. И. Эволюция систем видеонаблюдения и актуальность их защиты от ЭМИ // Технологии ЭМС 2011. – № 2(37). – С. 54–56.
5. Балюк Н. В., Керичев Л. Н., Степанов П. В. Мощный электромагнитный импульс: воздействие на электронные средства и методы защиты. – М. : ООО «Группа ИДТ», 2008. – 487 с.
6. Ольшанский А. И. Исследование СВЧ сушки тканей / А. И. Ольшанский, В. И. Ольшанский, С. В. Жерносек // Вестник Витебского государственного технологического университета. – 2013. – № 24. – С. 55–65.
7. Lee S. Sr_x-Ba_{1-x}Nb₂O_{6-δ} Ferroelectric-thermoelectrics: crystal anisotropy, conduction mechanism, and power factor / Lee, S., Wilke, R. H., Trolier-McKinsry, S., Zang, S., & Randall, C. A. // Applied Physics Letters. – 2010. – Т. 96. – № 3. – С. 031910.1-031910.3.