

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СВЧ-ДИАПАЗОНА С ВЛАГОСОДЕРЖАЩИМИ МАТЕРИАЛАМИ НА ОСНОВЕ РАЗЛИЧНЫХ ПОРИСТЫХ МАТРИЦ

Н.В. Насонова, Г.А. Пухир

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
ул. П. Бровки 6, 220013 Минск, Беларусь, nasonovan@bsuir.by, puhir@bsuir.by*

Представлены результаты исследования возможности получения экранирующих электромагнитное излучение (ЭМИ) СВЧ-диапазона материалов с заданными характеристиками за счет модификации свойств наполнителя композиционного материала на основе пористых матриц, пропитанных водными растворами. Установлено, что изменение влагосодержания наполнителя оказывает существенное влияние на диэлектрическую проницаемость композита, что позволяет моделировать экранирующие электромагнитное излучение СВЧ-диапазона свойства. Показано, что путем увеличения влагосодержания пористой матрицы можно плавно увеличивать диэлектрические потери композиционного материала, что позволяет увеличить эффективность экранирования СВЧ-излучения в диапазоне частот 8-12 ГГц за счет увеличения доли поглощенной энергии, а также моделировать многослойные конструкции экранов с наилучшим согласованием волновых сопротивлений на границе сред с различными электрофизическими характеристиками.

**Ключевые слова:** сверхвысокочастотное излучение; электромагнитное экранирование; диалектическая проницаемость; пористые матрицы; влагосодержащие композиционные материалы.

## INTERACTION OF MICROWAVE EMR WITH MOISTURE- CONTAINING MATERIALS BASED ON VARIOUS POROUS MATRICES

Natalia Nasonova, Halina Pukhir

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,  
6 P. Brovki Str., 220013 Minsk, Belarus, nasonovan@bsuir.by, puhir@bsuir.by*

The results of the study of the possibility of obtaining shielding electromagnetic radiation in the microwave range with specified characteristics by modifying the properties of the filler of a composite material based on porous matrices impregnated with water solutions are presented. It has been established that a change in the moisture content of the filler has a significant effect on the dielectric constant of the composite, which makes it possible to simulate the properties shielding electromagnetic radiation in microwaves. It is shown that by increasing the moisture content of the porous matrix, it is possible to smoothly increase the dielectric losses of the composite material, which makes it possible to increase the efficiency of shielding microwave radiation in the frequency range 8-12 GHz by increasing the fraction of absorbed energy, as well as to simulate multilayer screen designs with the best matching of wave impedances by boundary of media with different electrophysical characteristics. Investigations of the dependence of the electrophysical (complex dielectric constant) and electromagnetic characteristics of moisture-containing shielding materials based on various matrices were carried out. For example, by impregnation of moisture-containing porous matrices based on non-woven cellulose fabrics in the moisture content range of 10-55 wt%, dielectric constant values in the range of 5.1-48.2 can be obtained. Fibrous moisture-containing matrices based on non-woven cellulose fabrics are characterized by the absorption of electromagnetic radiation from 7.97 to 26.19 dB/cm. By impregnation of moisture-containing porous matrices based on machine knitted fabrics in the moisture content range of 10-65 wt%, dielectric constant values in the range of 2.5-43 can be obtained. Fibrous moisture-containing matrices based on machine knitted fabrics are characterized by the absorption of electromagnetic radiation from 5.64 to 28.32 dB/cm.

**Keywords:** microwave radiation; electromagnetic shielding; dialectical permeability; porous matrices; moisture-containing composite materials.

### Введение

Теоретический анализ показывает, что на основе полярного диэлектрика с дисперсией диэлектрических потерь [1] в ши-

роком диапазоне частот могут быть получены экранирующие и поглощающие электромагнитное излучение материалы, характеризующиеся коэффициентом пе-

редачи ЭМИ (-61.1)-(-7.4) дБ и коэффициентом отражения (-3.91)0(-0.42) дБ в диапазоне частот 8-12 ГГц. Ослабление ЭМИ линейно зависит от толщины такого материала, а коэффициент отражения слабо изменяется при превышении толщины материала свыше 4 мм, что связано с подавлением электромагнитных волн, отраженных от задней границы материала. Для диапазона частот 90-140 ГГц ослабление ЭМИ составляет 25.5 дБ, а коэффициент отражения определяется диэлектрическими характеристиками материала и изменяется в пределах (-6.9)-(-1.6) дБ [2-4].

Наиболее важными характеристиками, влияющими на поведение материалов при воздействии ЭМИ СВЧ-диапазона, являются [5]: комплексная диэлектрическая ( $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$ ) и магнитная ( $\mu = \mu' - j\mu''$ ) проницаемости, диэлектрические ( $\epsilon''$ ) и магнитные ( $\mu''$ ) потери, тангенс угла диэлектрических ( $tg\delta_\epsilon = \epsilon''/\epsilon'$ ) и магнитных ( $tg\delta_\mu = \mu''/\mu'$ ) потерь, волновое сопротивление:

$$Z = \sqrt{\frac{\mu\mu_r}{\epsilon\epsilon_r}}.$$

### Результаты эксперимента

Проводились исследования зависимости электрофизических (комплексной диэлектрической проницаемости) и электромагнитных характеристик влагосодержащих экранирующих материалов на основе различных матриц. Для этих целей были изготовлены образцы композиционных материалов на основе пористых матриц из порошка силикагеля и измельченной древесины, пропитанных водно-солевым раствором, размещенных в силиконовом связующем в соотношении 1:1 для получения однородной структуры. А также негерметизированные пористые матрицы на основе машинно-вязанных и нетканых целлюлозных полотен, пропитанных водой в разном количестве.

Моделирование экранов ЭМИ с определенными защитными свойствами основано на расчете электрофизических

свойств материалов, из которых они изготовлены. Общий уровень ослабления ЭМИ в основном определяют потери на проводимость материала. А малоотражающие конструкции экранов требуют согласования волновых параметров экрана со свойствами окружающей среды. Диэлектрические свойства экранов толщиной 4 мм, изготовленных из разработанных композиционных материалов на основе влагосодержащей измельченной древесины в силиконовом связующем, а также влагосодержащего силикагеля в силиконовом связующем были рассчитаны на основании измерений S-параметров тестируемого сигнала – источника ЭМИ.

Как показано на рис. 1, увеличение влагосодержания материала приводит к равномерному росту комплексной диэлектрической проницаемости, в большей степени действительной ее части. Для представленных образцов значения действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости при увеличении влагосодержания с 10% до 60% увеличилось в 2 раза.

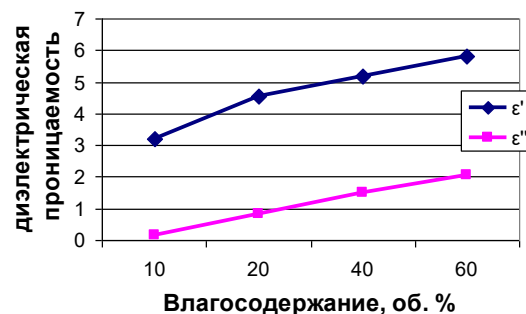


Рис. 1. Зависимость комплексной диэлектрической проницаемости от влагосодержания матрицы (влагосодержащий порошковый силикагель) в силиконовом связующем при максимальном количестве наполнителя на частоте 10 ГГц

Fig. 1. Dependence of the complex dielectric constant on the moisture content of the matrix (moisture-containing powder silica gel) in a silicone binder with a maximum amount of filler at a frequency of 10 GHz

Увеличение влагосодержания композиционных материалов на основе измельченной древесины (рис. 2) приводит также к возрастанию комплексной диэлектрической проницаемости в 2 раза. Контроль

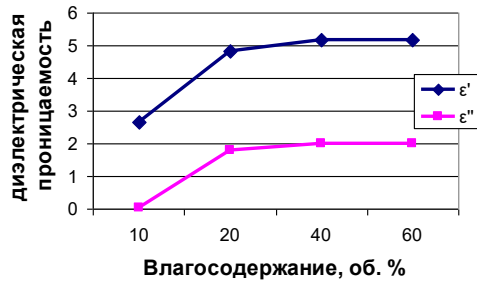


Рис. 2. Зависимость комплексной диэлектрической проницаемости от влагосодержания матрицы (измельченная древесина) в силиконовом связующем при максимальном количестве наполнителя на частоте 10 ГГц

Fig. 2. Dependence of the complex dielectric constant on the moisture content of the matrix (crushed wood) in the silicone binder with the maximum amount of filler at a frequency of 10 GHz

влагосодержания наполнителя позволяет получать более точно требуемые величины эpsilon для моделирования конструкции на основе таких композитов с заданными электромагнитными свойствами при воздействии СВЧ-излучения.

С помощью стандартного векторного анализатора цепей VNA MS4644B Anritsu с волноводным измерительным трактом были получены значения S-параметров для образцов композиционных влагосодержащих материалов с разными пористыми матрицами и влагосодержанием.

Показано, что характеристики ослабления ЭМИ образцов в диапазоне частот 8-12 ГГц относительно равномерны и находятся на уровне (-5.5)-(-2.0) дБ для волокнистых материалов с 10 % мас. влагосодержанием. При увеличении концентрации воды характер ослабления ЭМИ в диапазоне частот не изменяется, величина растет за счет диэлектрических потерь воды, распределенной в поровом пространстве пропитанных матриц. Наблюдается небольшое различие величины ослабления для волокнистых матриц различных типов, которое становится более заметным при повышении влагосодержания материала. Так для волокнистых материалов с 50% мас. влагосодержанием ослабление ЭМИ различается на 1.5-3 дБ, а разница фаз составляет 30-70 градусов.

Влагосодержащие волокнистые материалы обеспечивают характеристики коэффициента отражения ЭМИ в пределах (-10)-(-1.5) дБ, также равномерные в исследуемом диапазоне частот. Диэлектрические потери воды, которой пропитаны волокнистые матрицы, обуславливают сдвиг фаз коэффициентов передачи и коэффициента отражения, который увеличивается по мере роста массовой доли влаги в образцах.

Определены зависимости комплексных показателей диэлектрической проницаемости для исследованных волокнистых материалов с различным влагосодержанием. Результаты математического моделирования приведены на рис. 3.

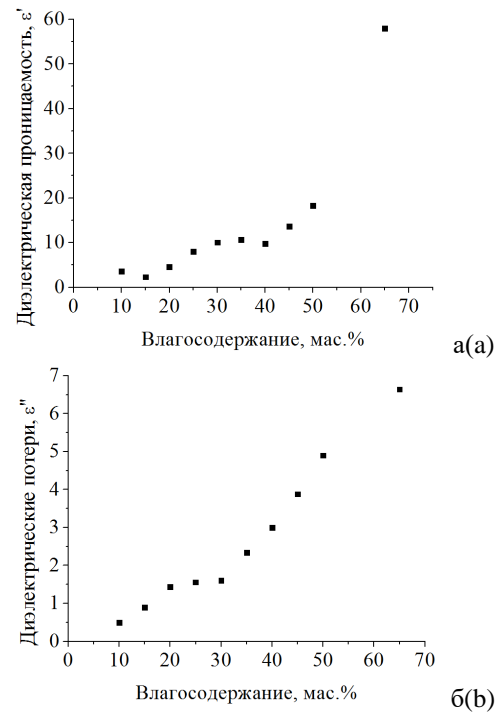


Рис. 3. Зависимость диэлектрических характеристик влагосодержащих волокнистых матриц на основе машинно-вязанных полотен на частоте 10 ГГц от влагосодержания (а – действительная часть; б – мнимая часть)

Fig. 3. Dependence of the dielectric characteristics of moisture-containing fibrous matrices based on machine-knitted fabrics at a frequency of 10 GHz on the moisture content (a – real part; b – imaginary part)

Поскольку характеристики ослабления и отражения относительно равномерны в диапазоне частот 8-12 ГГц, на рисунках приводятся результаты, полученные для

частоты 10 ГГц. При этом установленные зависимости сохраняются для остальных частот исследованного диапазона. Увеличение влагосодержания волокнистой матрицы выражается в росте величины диэлектрической проницаемости от 2.5-10 для влагосодержания 10-40% мас. до 20.3–58.0 при максимальном насыщении пористой матрицы водой (50-65 % мас.).

Характер зависимости диэлектрической проницаемости от массовой доли воды в композите нелинейный, на кривой могут быть выделены участки с различным наклоном, что связано с влиянием различных форм воды на общую диэлектрическую проницаемость образцов.

Диэлектрическая проницаемость влагосодержащих волокнистых матриц на основе машинно-вязанных полотен медленно возрастает пропорционально увеличению влагосодержания (от 2.5 до 10.2 при изменении влагосодержания с 10 до 40 %). Развитая поверхность в виде межнитиевых и межволоконных пространств за счет влияния поверхностных сил связывает воду по поверхности твердого тела, что снижает величину диэлектрической проницаемости. Согласно результатам экспериментов, вблизи величины влагосодержания 40 % угол наклона характеристики диэлектрической проницаемости возрастает и происходит значительное увеличение величины  $\epsilon'$  (с 10.2 до 40.0) с увеличением влагосодержания на 20 %. Это свидетельствует о появлении свободной воды, которая заполняет оставшееся поровое пространство, образуя объемную форму с более высоким значением  $\epsilon'$ . Диэлектрические потери составляют от 0.5 до 6.64 и обнаруживают аналогичную зависимость от влагосодержания материала.

Пропиткой пористых матриц на основе машинно-вязанных полотен в диапазоне влагосодержания 10-65 мас.% могут быть получены величины диэлектрической проницаемости в диапазоне 2.5–43. Волокнистые влагосодержащие матрицы на основе машинно-вязанных полотен характеризуются ослаблением электромагнит-

ного излучения от 5.64 до 28.32 дБ/см.

Зависимость диэлектрической проницаемости водосодержащих волокнистых матриц на основе нетканых целлюлозных полотен от массовой доли воды (рис. 4) также нелинейна. Особенностью исследуемой матрицы является способность макромолекул целлюлозы взаимодействовать с молекулами воды, влияя на их подвижность. Большая часть молекул воды в целлюлозной матрице оказывается в «связанном» состоянии, вследствие чего появление свободной воды и увеличение наклона кривой  $\epsilon'$  наблюдается при величине влагосодержания 30 мас. %. Диэлектрические потери влагосодержащих целлюлозных матриц составляют 0.7-5.5.

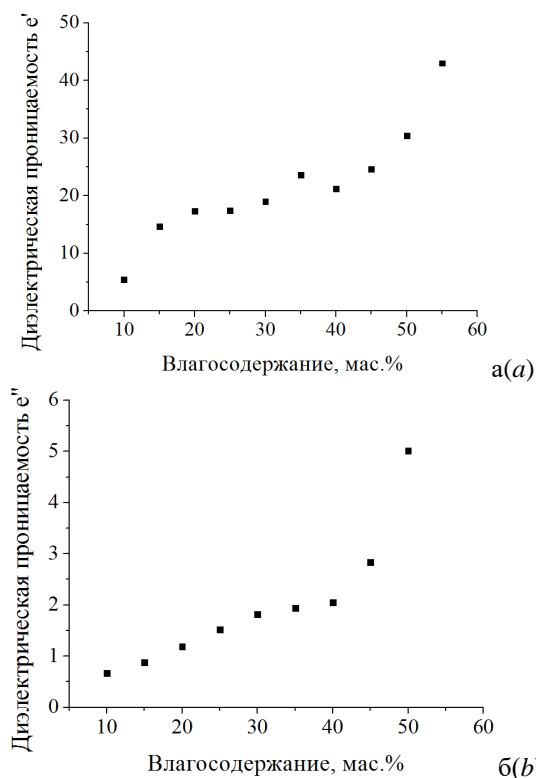


Рис. 4. Зависимость диэлектрических характеристик волокнистых матриц на основе нетканых целлюлозных полотен на частоте 10 ГГц от их влагосодержания (а – действительная часть; б – мнимая часть)

Fig. 4. Dependence of the dielectric characteristics of fibrous matrices based on nonwoven cellulose webs at a frequency of 10 GHz on their moisture content (a – real part; b – imaginary part)

Пропиткой пористых матриц на основе нетканых целлюлозных полотен водой в диапазоне влагосодержания 10-55 мас.%

получены величины диэлектрической проницаемости в пределах 5.1-48.2.

Волокнистые влагосодержащие матрицы на основе нетканых целлюлозных полотно характеризуются поглощением электромагнитного излучения от 7.97 до 26.19 дБ/см.

### Заключение

Таким образом, путем варьирования влагосодержанием и типом пористой матрицы можно создавать экраны ЭМИ с заданными экранирующими характеристиками за счет изменения комплексной диэлектрической проницаемости композиционного материала. Влагосодержащие порошковые и волокнистые пористые матрицы, размещенные в неорганическом связующем, позволяют получать величины диэлектрической проницаемости в пределах 2,6–5,9 с равномерным распределением наполнителя по объему материала и могут применяться для создания согласующих слоев радиопоглотителей.

### Библиографические ссылки

1. Kolbun N.V., Borbotko T.V., Kazeka A.A., Proudnik A.M., Lynkou L.M. Simulation of electromagnetic radiation passing through liquid-containing nanostructured materials. In Proceedings of SPIE «12th International Workshop on Nano-Design Technology and Computer Simulations» (17 June 2009). Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers; 2009; 7377(0A): 1-6.
2. Гринчик Н.Н., Насонова Н.В., Лыньков Л.М., Харма У.М. Водосодержащие капиллярно-пористые экраны электромагнитного излучения. Теория и практика. Минск: Бестпринт, 2016. 238 с.
3. Насонова Н.В., Пулко Т.А., Аль-Адеми Я.Т.А., Ахмед А.А.А., Лыньков Л.М. Влияние влажности на экранирующие характеристики радиопо-

глощающих материалов. *Вестник ГГТУ* 2013; 2(53). 86-91.

4. Белоусова Е.С., Насонова Н.В., Пулко Т.А., Лыньков Л.М. Композиционные материалы с проводящими и диэлектрическими компонентами для экранирования электромагнитного излучения СВЧ-диапазона. *Вестник ПГУ*. 2014; (3): 62-66.
5. Dishovsky N. Rubber based composites with active behaviour to microwaves (review). *Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy* 2009; 44(2): 115-122.

### References

1. Kolbun N.V., Borbotko T.V., Kazeka A.A., Proudnik A.M., Lynkou L.M. Simulation of electromagnetic radiation passing through liquid-containing nanostructured materials. In Proceedings of SPIE «12th International Workshop on Nano-Design Technology and Computer Simulations» (17 June 2009). Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers; 2009; 7377(0A): 1-6.
2. Grinchik N.N., Nasonova N.V., Lyn'kov L.M., Harma U.M. Vodosoderzhashhie kapilljarnoporiuste jekrany jelektromagnitnogo izluchenija. Teorija i praktika [Water-containing capillary-porous electromagnetic shields. Theory and practice]. Minsk: Bestprint, 2016. 238 p. (In Russian).
3. Nasonova, N.V., Pulko T.A., Al'-Ademi Ja.T.A., Ahmed A.A.A., Lyn'kov L.M. Vlijanie vlazhnosti na jekranirujushhie harakteristiki radiopogloshhajushih materialov [The influence of moisture on shielding characteristics of radio absorbing materials]. *Vestnik GGTU* 2013; 2(53). 86-91. (In Russian).
4. Belousova E.S., Nasonova N.V., Pulko T.A., Lyn'kov L.M. Kompozicionnye materialy s provodjashhimi i dijelektricheskimi komponentami dlja jekranirovaniya jelektromagnitnogo izluchenija SVCh-diapazona [Composite materials with conductive and dielectric components for electromagnetic shielding in microwaves]. *Vestnik PGU* 2014; (3): 62-66. (In Russian).
5. Dishovsky N. Rubber based composites with active behaviour to microwaves (review). *Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy* 2009; 44(2): 115-122.