

УДК 622.272.3

**М.В. Графкина<sup>1</sup>**, д-р техн. наук, проф.,  
**Б.Н. Нюнин<sup>1</sup>**, д-р техн. наук, проф.,  
**А.Д. Потапов<sup>2</sup>**, д-р техн. наук, проф.,  
**Е.Ю. Свиридова<sup>1</sup>**, канд. техн. наук

1 – Московский государственный машиностроительный университет, г. Москва, Россия, e-mail: marina.grafkina@rambler.ru  
 2 – Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия, e-mail: umu-potapov@mail.ru

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

**M.V. Grafkina<sup>1</sup>**, Dr. Sci. (Tech.), Professor,  
**B.N. Nyunin<sup>1</sup>**, Dr. Sci. (Tech.), Professor,  
**A.D. Potapov<sup>2</sup>**, Dr. Sci. (Tech.), Professor,  
**Ye.Yu. Sviridova<sup>1</sup>**, Cand. Sci. (Tech.)

1 – Moscow State University of Mechanical Engineering, Moscow, Russia, e-mail: marina.grafkina@rambler.ru  
 2 – Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia, e-mail: umu-potapov@mail.ru

## ENERGY CHARACTERISTICS OF LOW FREQUENCY ELECTROMAGNETIC FIELDS

**Цель.** Повышение эффективности экологического мониторинга и методов защиты от электромагнитных полей в горнодобывающей отрасли.

**Методика.** Одновременно измеряют во взаимно перпендикулярных плоскостях напряженности электрического и магнитного поля в различных точках пространства.

В случае синусоидальной волны (одна частота электромагнитного спектра) измерение проводят в некоторой точке пространства взаимно перпендикулярных векторов напряженностей электрического и магнитного поля, а также угла, характеризующего временной сдвиг между ними. На основании этих данных рассчитывают активную и реактивную интенсивности электромагнитных полей.

При широкополосном электромагнитном излучении активная и реактивная интенсивности определяются с помощью узкополосного анализатора взаимного спектра на основе быстрого преобразования Фурье.

**Результаты.** Предложен новый подход к экологическому мониторингу электромагнитных полей и проведению необходимых исследований по выявлению закономерностей распределения энергетических параметров низкочастотных электромагнитных полей.

Разработана новая методика определения активной и реактивной интенсивности, а также вектора комплексной интенсивности низкочастотного электромагнитного поля для синусоидального и широкополосного электромагнитного излучения.

На любом горнодобывающем предприятии всегда имеет место несколько источников электромагнитных полей промышленной частоты, которые формируют сложную картину пространственного распределения энергии. Определение комплексной интенсивности низкочастотного электромагнитного поля позволит оценить пространственное распределение электромагнитной энергии как на территории предприятия, так и внутри замкнутых объемов (производственные помещения, участки подземной выработки и др.). Это, в свою очередь, позволит найти направление и расстояние до основных источников излучения, вносящих максимальный вклад в уровень электромагнитного загрязнения. При наличии нескольких источников электромагнитных полей реактивная интенсивность будет исходить из области максимума потока электромагнитной энергии или от источников излучений при проведении измерений рядом с ними.

Мониторинг энергетических характеристик электромагнитных полей даст возможность разработать наиболее эффективные рекомендации и методы снижения негативного воздействия электромагнитных полей. В частности, определить места установки и конструкции поглотителей и защитных экранов, оптимизировать расположение рабочих зон и мест расположения источников низкочастотных электромагнитных полей и др.

**Научная новизна.** Предложены новые подходы к совершенствованию мониторинга электромагнитной безопасности на основе определения энергетических характеристик низкочастотных электромагнитных полей.

**Практическая значимость.** Повышение эффективности электромагнитного мониторинга и методов защиты от электромагнитных полей.

**Ключевые слова:** экологический мониторинг, электромагнитное поле, электромагнитная безопасность, горнодобывающая отрасль, ближняя и дальняя зона, активная и реактивная интенсивность, поляризация, источник излучения

**Постановка проблемы.** Эффективное ведение горных работ требует повышения уровня энергово-

оруженности горных предприятий. В связи с этим увеличивается потребляемая мощность и создается разветвленная структура электроснабжения предприятия, включающая в себя системы: внешнего электроснабжения, электроснабжения потребителей по-

© Графкина М.В., Нюнин Б.Н., Потапов А.Д., Свиридова Е.Ю., 2014

верхности, электроснабжения подземных горных работ, электроустановок и др. – часть этих систем работает на переменном токе промышленной частоты. Отсюда, помимо загрязнения воздушной среды, происходит рост электромагнитного загрязнения. Общеизвестно негативное воздействие даже относительно низкого уровня низкочастотных электромагнитных полей на здоровье человека [1–2].

В систему энергоснабжения горных предприятий входят следующие источники электромагнитных полей промышленной частоты (ЭМП): электрические машины и аппараты, открытые распределительные устройства, щиты электропитания, воздушные линии электропередачи, кабельные линии электропередачи и др.

**Выделение нерешенных ранее частей проблемы.** В настоящее время мониторинг низкочастотных электромагнитных полей осуществляется на основе измерений амплитудных значений напряженностей электрического и магнитного поля на различных расстояниях от источника излучений. В современной научной литературе практически не встречаются результаты исследований энергетических параметров и характера низкочастотных электромагнитных полей.

Имея определенные наработки в этой области исследования [3–6], авторы считают целесообразным разработку новых подходов к экологическому мониторингу электромагнитных полей и проведение необходимых исследований по выявлению закономерностей распределения энергетических параметров низкочастотных электромагнитных полей.

**Изложение основного материала.** Теоретические предпосылки исследований заключаются в следующем.

В общем случае между векторами напряженности электрического поля  $E$  и магнитного поля  $H$  существуют пространственный и временной сдвиги. Для идеальной среды, которая характеризуется отсутствием потери энергии при распространении волны, пространственный угол всегда составляет  $90^\circ$ . В среде с потерями пространственный угол между  $E$  и  $H$  не равен  $90^\circ$ . Угол временного сдвига в ЭМП сложной пространственной структуры будет определяться интерференционной картиной, создаваемой распределенными источниками, наличием границ и т.д.

Для источников ЭМП характерно наличие ближних и дальних зон. В ближней зоне происходит два качественно различных в энергетическом отношении процесса. Первый процесс представляет собой процесс периодического обмена энергией между источником энергии и ближней зоной (реактивная интенсивность  $I_i$ ). Энергия то забирается от источника и накапливается в ЭМП ближней зоны, то отдается обратно источнику. Этот процесс характерен для „кулонова“ и „био-саварова“ полей ближней зоны. Второй процесс – процесс излучения энергии (активная интенсивность  $I_a$ ). Им характеризуется волновой процесс в ближней зоне. Излучаемая энергия составляет относительно небольшую величину по сравнению с энергией, периодически накапливаемой в ЭМП ближней зоны и затем отдаваемой источнику питания.

В большинстве случаев ЭМП промышленной частоты представляют собой стационарные гармонические волны. В стационарных гармонических электромагнитных волнах вектор комплексной интенсивности равен

$$\vec{I}_k = \vec{I}_a + i\vec{I}_i,$$

где  $I_a$  – вектор активной интенсивности ЭМП,  $\frac{Bm \cdot cm^2}{c}$ ;  $I_i$  – вектор реактивной интенсивности ЭМП,  $\frac{Bm \cdot cm^2}{c}$ .

На любом горнодобывающем предприятии всегда имеет место несколько источников электромагнитных полей промышленной частоты, которые формируют сложную картину пространственного распределения энергии. Точка с максимальными уровнями напряженностей электрического и магнитного поля не всегда будет расположена непосредственно возле источника излучения с максимальными значениями напряженностей электрического и магнитного поля. Это связано с явлением суммирования энергий различных когерентных источников. Определение комплексной интенсивности ЭМП позволит оценить пространственное распределение электромагнитной энергии как на территории предприятия, так и внутри замкнутых объемов (производственные помещения, участки подземной выработки и др.). Это, в свою очередь, позволит найти направление и расстояние до источника излучения, вносящего максимальный вклад в уровень электромагнитного загрязнения, а также разработать наиболее эффективные рекомендации по выбору защитных мероприятий и снижению негативного воздействия ЭМП.

Компоненты вектора комплексной интенсивности (активная и реактивная) могут быть определены несколькими способами.

В случае синусоидальной волны (одна частота электромагнитного спектра) проводится измерение в некоторой точке пространства взаимно перпендикулярных векторов  $E$  и  $H$ , а также угла  $\Delta\phi_{EH}$ , характеризующего временной сдвиг между ними. На основании этих данных рассчитывают активную  $I_a$  и реактивную  $I_i$  интенсивности ЭМП

$$I_a = E \cdot H \cdot \cos \Delta\phi_{EH};$$

$$I_i = E \cdot H \cdot \sin \Delta\phi_{EH}.$$

При широкополосном электромагнитном излучении активная и реактивная интенсивности определяются с помощью узкополосного анализатора взаимного спектра на основе быстрого преобразования Фурье

$$I_a(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{\Delta f \cdot T} \int_0^T E_{\Delta f}(t) \cdot H_{\Delta f}(t) dt;$$

$$I_i(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{\Delta f \cdot T} \int_0^T E_{\Delta f}(t) \cdot H_{\Delta f}^*(t) dt,$$

где  $f$  – полоса частот, Гц;  $t$  – время, с;  $H^*$  – комплексно сопряженная величина напряженности магнитного поля, А/м.

Если соотношение  $I_i / I_a$  равно 0, то мы имеем дело с дальней зоной электромагнитного поля. Если соотношение не равно 0, то – это ближняя зона.

Зная  $I_a$  и  $I_i$ , можно также определить расстояние до источника излучения  $R$

$$R = \frac{I_a}{I_i \cdot k},$$

где  $k = 2\pi / \lambda$  – волновое число;  $\lambda$  – длина волны, м;  $I_a$  – активная интенсивность ЭМП,  $\frac{Вт \cdot см^2}{с}$ ;  $I_i$  – реактивная интенсивность ЭМП,  $\frac{Вт \cdot см^2}{с}$ .

Направление на источник излучения определяется по направлению вектора активной интенсивности электромагнитного поля.

При наличии нескольких источниках ЭМП в ближнем поле усложнена их идентификация при использовании только одной активной интенсивности. В этом случае особенно полезна реактивная интенсивность, поскольку она будет исходить из области максимума потока электромагнитной энергии или от источников излучений при проведении измерений рядом с ними. Реактивная интенсивность может быть использована также при определении пространственного распределения источников. Наличие реактивной интенсивности в дальней зоне служит признаком присутствия двух или более источников ЭМП.

Рассмотрим два предельных случая разности фаз между  $E$  и  $H$ .

На рис.1 представлен случай, когда временной сдвиг между  $E$  и  $H$  –  $\Delta\phi_{EH} = 0^\circ$  (рис. 1, а), существует только активная интенсивность  $I_a$ , направленная перпендикулярно плоскости  $E$ - $H$  (рис. 1, б), при этом концы векторов  $E$  и  $H$  с течением времени перемещаются вдоль отрезка прямой линии (линейная поляризация, рис. 2).

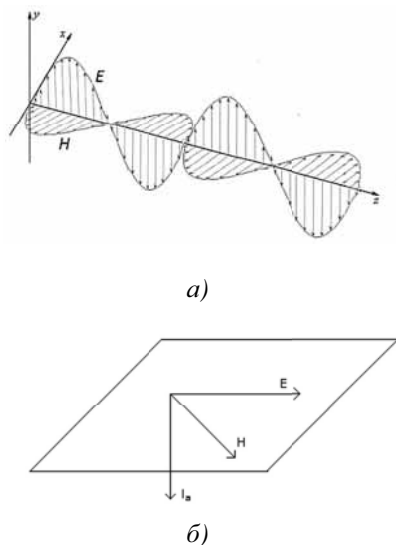


Рис. 1. Отсутствие временного сдвига между  $E$  и  $H$  ( $\Delta\phi_{EH} = 0^\circ$ ): а) графическое изображение временного сдвига, равного 0; б) активная интенсивность при временном сдвиге, равном 0

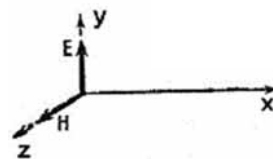


Рис. 2. Линейная поляризация

На рис. 3 представлен случай, когда временной сдвиг между  $E$  и  $H$  –  $\Delta\phi_{EH} = 90^\circ$ , при этом существует только реактивная интенсивность.

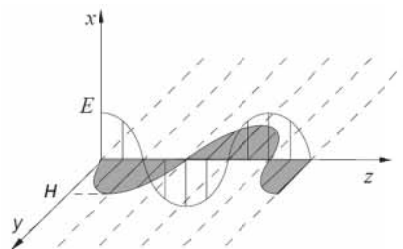


Рис. 3. Временной сдвиг между  $E$  и  $H$  –  $\Delta\phi_{EH} = 90^\circ$

В интервале  $\Delta\phi_{EH}$  от 0 до  $90^\circ$  концы векторов  $E$  и  $H$  описывают эллипс или круг (эллиптическая или круговая поляризация, рис. 4) [7].

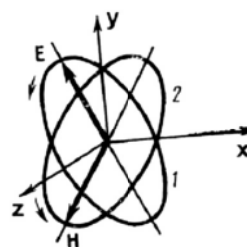


Рис. 4. Эллиптическая поляризация

Плоскость движения вектора  $E$  совпадает с плоскостью, определяемой векторами активной и реактивной интенсивности.

**Выводы.** Мониторинг энергетических характеристик электромагнитных полей, выявление особенностей их пространственного распределения позволят определить источники, вносящие максимальный вклад в формирование уровня электромагнитного загрязнения, и разработать наиболее эффективные рекомендации и методы снижения негативного воздействия электромагнитных полей. В частности, определить места установки и конструкции поглотителей и защитных экранов, оптимизировать расположение рабочих зон и мест расположения источников ЭМП и др.

Предлагаемые подходы к определению характеристик низкочастотных электромагнитных полей повысят эффективность мониторинга электромагнитных полей как на территории горных предприятий, так и внутри замкнутых объемов (производственные помещения, участки подземной выработки и др.).

**Список литературы / References**

1. Balodis, V. (2008), "Electric and magnetic fields", *Environmental Issues*, no.5, 81 p.
2. Blanc, M. (1995), *Biological effects of environmental electromagnetic fields*, Washington (DC).
3. Развитие системы экологического мониторинга электромагнитных и инфразвуковых низкочастотных полей на застроенных территориях [Электронный ресурс] / М.В. Графкина, Б.Н. Нюнин, Е.Ю. Свиридова, Е.П. Теряева – Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: [www.unistroy.spb.ru](http://www.unistroy.spb.ru). (дата обращения: 11.12.2013).
4. Графкина, М.В., Nyunin, B.N., Sviridova, Ye.Yu. and Teryaeva, Ye.P. "Development of system of environmental monitoring of electromagnetic and infrasonic low-frequency fields in the built-up territories", *Construction of unique buildings and constructions*, (2012), no. 4. available at: [www.unistroy.spb.ru](http://www.unistroy.spb.ru). (accessed: February 20, 2013)
4. Пименов В.Ю. Техническая электродинамика / Пименов В.Ю., Вольман В.И., Муравцов А.Д. – М.: Радио и Связь, 2000. – 536 с.
- Pimenov, V.Yu., Wolman, V.I., Muravtsov, A.D. (2000), *Tekhnicheskaya elektrodinamika* [Technical Electrodynamics], Radio and Communication, Moscow, Russia.

**Мета.** Підвищення ефективності екологічного моніторингу та методів захисту від електромагнітних полів у гірничодобувній галузі.

**Методика.** Одночасно вимірюють у взаємно перпендикулярних площинах напруженості електричного та магнітного поля в різних точках простору.

У випадку синусоїдальної хвилі (одна частота електромагнітного спектра) вимірювання проводять у деякій точці простору взаємно перпендикулярних векторів напруженості електричного та магнітного поля, а також кута, що характеризує часовий зсув між ними. На основі цих даних розраховують активну та реактивну інтенсивності електромагнітних полів.

При широкополосному електромагнітному випромінюванні активна та реактивна інтенсивності визначаються за допомогою вузькополосного аналізатора взаємного спектра на основі швидкого перетворення Фур'є.

**Результати.** Запропонований новий підхід до екологічного моніторингу електромагнітних полів та проведення необхідних досліджень з виявлення закономірностей розподілу енергетичних параметрів низькочастотних електромагнітних полів.

Розроблена нова методика визначення активної та реактивної інтенсивності, а також вектора комплексної інтенсивності низькочастотного електромагнітного поля для синусоїдального та широкополосного електромагнітного випромінювання.

На будь-якому гірничодобувному підприємстві завжди має місце декілька джерел електромагнітних полів промислової частоти, що формує складну картину просторового розподілу енергії. Визначення комплексної інтенсивності низькочастотного електромагнітного поля дозволить оцінити просторовий розподіл електромагнітної енергії як на території пі-

дприємства, так і всередині замкнутих об'ємів (виробничі приміщення, ділянки підземної виробки та ін.). Це, у свою чергу, дозволить знайти напрямки та відстані до основних джерел випромінювання, що вносять максимальний внесок у рівень електромагнітного забруднення. При наявності декількох джерел електромагнітних полів реактивна інтенсивність буде виходити з області максимуму потоку електромагнітної енергії чи від джерел випромінювання при проведених вимірювань поруч із ними.

Моніторинг енергетичних характеристик електромагнітних полів дасть змогу розробити найбільш ефективні рекомендації та методи зниження неактивного впливу електромагнітних полів. Зокрема, визначити місця установки та конструкції поглиначів і захисних екранів, оптимізувати розміщення робочих зон і місць розташування джерел низькочастотних електромагнітних полів та ін.

**Наукова новизна.** Запропоновані нові підходи до вдосконалення моніторингу електромагнітної безпеки на основі визначення енергетичних характеристик низькочастотних електромагнітних полів.

**Практична значимість.** Підвищення ефективності електромагнітного моніторингу та методів захисту від електромагнітних полів.

**Ключові слова:** екологічний моніторинг, електромагнітне поле, електромагнітна безпека, гірничодобувна галузь, ближня й дальня зона, активна й реактивна інтенсивність, поляризація, джерело випромінювання

**Purpose.** Definition the energy characteristics of low-frequency electromagnetic fields to improve environmental monitoring and protection methods in the mining industry.

**Methodology.** The method of determining the active and reactive intensity of low-frequency electromagnetic field, the technique of calculating the integrated intensity of the vector and the distance to the source.

**Findings.** The proposed approach to the definition of the energy characteristics of low-frequency electromagnetic fields might identify their distribution, identify sources that make maximum contribution to the level of electromagnetic pollution and develop the most effective tips and techniques to reduce the negative effects of electromagnetic fields in the mining industry.

**Originality.** The new approach to improve the monitoring of electromagnetic safety by determining the energy characteristics of low-frequency electromagnetic fields.

**Practical value.** Improved monitoring and electromagnetic methods of protection from electromagnetic fields.

**Keywords:** environmental monitoring, electromagnetic field, electromagnetic safety, mining, near and far field, active and reactive intensity, polarization, radiation source

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук В.Т. Медведєвим. Дата надходження рукопису 21.05.13.