

## ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

*Закирова Альфия Резавановна*

канд. техн. наук, доцент, заведующая Учебным центром  
охраны труда и безопасности

*Кузнецов Константин Борисович*

д-р техн. наук, профессор

ФГБОУ ВПО «Уральский государственный  
университет путей сообщения»

г. Екатеринбург, Свердловская область

### УСТАНОВКА

#### ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ЖИВОТНЫХ

*Аннотация:* в статье рассматриваются основные проблемы нормирования электромагнитных полей. Для формирования электромагнитного поля с целью дальнейшего проведения исследований на животных авторами разработано устройство для создания переменного магнитного и электрического полей.

*Ключевые слова:* электромагнитное поле, электроустановка, вредный производственный фактор, защита персонала.

В 1856 году шотландский физик Джеймс Максвелл обобщил известные эмпирические законы электрических и магнитных явлений и создал теорию ЭМП, установившую общую природу световых и электромагнитных волн и законы их распространения [1; 2].

Электромагнитное поле (и его изменение со временем) описывается в электродинамике в классическом приближении посредством системы фундаментальных уравнений Максвелла. Таких уравнений четыре. В интегральной форме они имеют вид [3]:

$$\oint_l \mathbf{H} dl = \frac{4\pi}{c} \int_S \left( \mathbf{j} + \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{d\mathbf{D}}{dt} \right) d\mathbf{S}, \quad (1.1)$$

$$\oint_l \mathbf{E} dl = -\frac{1}{c} \int_S \frac{d\mathbf{B}}{dt} d\mathbf{S}, \quad (1.2)$$

$$\oint_S (\mathbf{D} d\mathbf{S}) = 4\pi \int \rho dV, \quad (1.3)$$

$$\oint_S (\mathbf{B} d\mathbf{S}) = 0, \quad (1.4)$$

где  $l$  – замкнутый контур, который является границей поверхности  $S$ ;

$H$  – напряжённость магнитного поля, А/м;

$c \approx 3 \cdot 10^8$  – скорость света в вакууме, м/с;  $S$  – двумерная замкнутая в случае теоремы Гаусса поверхность, ограничивающая объём  $V$ , и открытая поверхность в случае законов Фарадея и Ампера-Максвелла;

$j$  – плотность электрического тока (плотность тока проводимости), А/м<sup>2</sup>;

$d/dt$  – производная по времени;

$D$  – электрическая индукция, Кл/м<sup>2</sup>;

$E$  – напряжённость электрического поля, В/м;

$B$  – магнитная индукция, Тл;

$\rho$  – плотность стороннего электрического заряда, Кл/м<sup>2</sup>;

$V$  – объём, ограниченный поверхностью  $S$ .

В дифференциальной форме [3]:

$$\mathit{rot} \mathbf{H} = \frac{4\pi}{c} \cdot \mathbf{j} + \frac{1}{c} \cdot \frac{d\mathbf{D}}{dt}, \quad (1.5)$$

$$\mathit{rot} \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \cdot \frac{d\mathbf{B}}{dt}, \quad (1.6)$$

$$\mathit{div} \mathbf{D} = 4\pi \cdot \rho, \quad (1.7)$$

$$\mathit{div} \mathbf{B} = 0. \quad (1.8)$$

где  $\mathit{rot}$  – ротор вектора;

$\mathit{div}$  – дивергенция вектора.

Уравнения Максвелла показывают, что источниками электрического поля могут быть либо электрические заряды, либо магнитные поля, меняющиеся во времени. Магнитные же поля могут возбуждаться либо движущимися электрическими зарядами (электрическими токами), либо переменными электрическими полями. Уравнения не симметричны относительно электрического и магнитного полей. Это связано с тем, что в природе существуют электрические заряды, но, насколько известно в настоящее время, нет зарядов магнитных [3].

Согласно теории ЭМП, созданной Максвеллом, ЭМП – вид материи, представляющей собой совокупность изменяющихся во времени электрического поля (ЭП) и магнитного поля (МП). Поля связаны между собой непрерывным взаимным превращением, которое происходит в процессе движения ЭМП [2].

ЭМП в форме ЭМВ создается ускоренно движущимися электрическими зарядами (ЭЗ). Однако созданная электромагнитная волна (ЭМВ) распространяется со скоростью света, а не со скоростью движущихся ЭЗ. Частота же колебаний ЭМВ совпадает с частотой колебания ЭЗ. Магнитное поле в отличие от электрического поля существует в отрыве от ЭЗ, его создающих [2].

Электромагнитные волны ЭМП представляют собой волны поперечного типа: в любой момент времени и в любой точке направления действия магнитного и электрического полей (векторы напряжённости магнитного и электрического полей:  $H$  и  $E$ ) перпендикулярны направлению распространения волны, при этом направление электрического поля всегда перпендикулярно направлению магнитного поля (рис. 1).

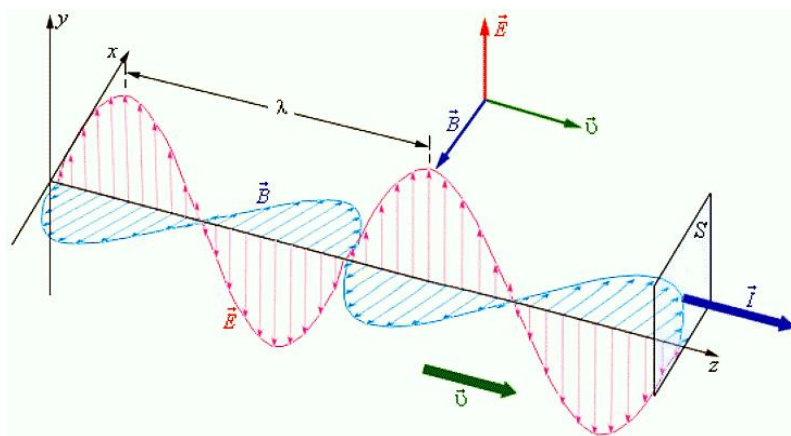


Рис. 1. Пространственное распределение напряженности ЭП и индукции МП

Теория Д. Максвелла позволила установить, что скорость распространения электромагнитных волн в какой-либо среде определяется зависимостью [1]:

$$V = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon \cdot \mu}}, \quad (1.9)$$

где  $c$  – скорость света в вакууме, м/с;

$\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды, для воздуха  $\varepsilon \approx 1$ ;

$\mu$  – магнитная проницаемость среды, для воздуха  $\mu \approx 1$ .

В зависимости от частоты волны ЭМП обладают некоторыми характерными особенностями, в зависимости от которых их подразделяют на [1]:

- низкочастотные (0–10000 Гц);
- диапазона радиосвязи (10–300 ГГц);
- оптического диапазона (300 ТГц – 300 ПГц);
- ионизирующие (300 ПГц – 30000 ЭГц).

Существует международная классификация электромагнитных волн по частотам. Она приведена в таблице 1.

**Научные исследования: от теории к практике**

Таблица 1

## Международная классификация электромагнитных волн по частотам

<i>Наименование частотного диапазона</i>	<i>Границы диапазона</i>	<i>Наименование волнового диапазона</i>	<i>Границы диапазона</i>
Крайние низкие, КНЧ	3...30 Гц	Декамегаметровые	100...10 Мм
Сверхнизкие, СНЧ	30...300 Гц	Мегаметровые	10...1 Мм
Инфранизкие, ИНЧ	0,3...3 кГц	Гектокилометровые	1000...100 км
Очень низкие, ОНЧ	3...30 кГц	Мириаметровые	100...10 км
Низкие частоты, НЧ	30...300 кГц	Километровые	10...1 км
Средние, СЧ	0,3...3 МГц	Гектометровые	1...0,1 км
Высокие частоты, ВЧ	3...30 МГц	Декаметровые	100...10 м
Очень высокие, ОВЧ	30...300 МГц	Метровые	10...1 м
Ультравысокие, УВЧ	0,3...3 ГГц	Дециметровые	1...0,1 м
Сверхвысокие, СВЧ	3...30 ГГц	Сантиметровые	10...1 см
Крайне высокие, КВЧ	30...300 ГГц	Миллиметровые	10...1 мм
Гипервысокие, ГВЧ	300...3000 ГГц	Децимиллиметровые	1...0,1 мм

В данной работе особое внимание уделено исследованию ЭМП частотой до 10 кГц, т.е. низкочастотного диапазона.

При оценке напряженности ЭМП в России по существующим в настоящее время нормативным документам [4–7] не учитывается спектр частот до 10 кГц (кроме отдельного учета 50 Гц и 10 кГц). Предельно допустимые уровни воздействия ЭМП на человека для ряда стран [7] представлены в таблице 2.

Анализ нормирования напряженности ЭМП низкочастотного (НЧ) диапазона в разных странах показывает, что встречаются противоречия для одного и того же диапазона частот: нормируются разные уровни напряженности ЭМП, причем значения величин нормируемых значений отличаются в десятки и даже сотни раз.

В данном докладе представлена разработанная авторами экспериментальная установка для создания электрических и магнитных полей с различной величиной напряженности электрического и магнитного поля и частоты переменного ЭМП до 10 кГц.

Нормируемые параметры ЭМП в разных странах

Страна	Частота $f$ , Гц	Напряженность ЭП, кВ/м	Напряженность МП, А/м
Великобритания (профессионалы и население)	24–600	$600/f$	$64000/f$
	750–1000	1	$64000/f$
	>1000	1	64
Республика Корея (профессионалы и население)	8–25	20	$20000/f$
	25–820	$0,5/f$	$20/f$
	>820	0,61	24,4
Россия СанПиН 2.2.4.1191–03	50	5,0	80,0
Страны Евросоюза Directive 2004/40/EC	0–1	–	163000
	1–8	20	$163000/f^2$
	8–25	20	$20000/f$
	(0,025– 0,82 кГц)	$500/f$	$20/f$
	820–2500	0,610	24,4
	2500–10000	0,610	24,4
Япония (профессионалы и население)	50/60	3	–
	>100	0,614	163
	>10000	0,275	72,8

Предполагается, в дальнейшем, провести серию экспериментальных исследований с целью выявления биологического воздействия ЭМП на жизнедеятельность моделируемых животных (планарий) совместно с Ингушским государственным университетом.

Над созданием устройств, формирующих электромагнитное, магнитное и электрическое поля для различных целей, в последние годы работали такие учёные, как С.М., Гальперин, А.Ф. Макуренов, В.К. Ковнацкий, О.Г. Давыденко, С.П. Меркулова, А.П. Ишков, Л.В. Шмолин, А.В. Савиных, Ю.А. Савиных, С.Д. Савченко, О.Е. Овчинникова, Н.П. Рубцов, И.И. Дик, В.Н. Кудряшов, Е.А. Цыганков, Е.В. Мамонтов, Е.Ю. Грачёв, P. Fojkht, F. Vrijuss, A. Jordan и др.

Учеными С.М. Гальпериным и А.Ф. Макуреновым было разработано устройство, которое получило название «Имитатор электромагнитного поля очень низких частот». Оно предназначено для отработки диаграмм направленности антенн в диапазоне очень низких частот (ОНЧ), отладки в комплексе приборов, включающих в свой состав антенны этого диапазона [9].

Ученые В.К. Ковнацкий, О.Г. Давыденко и С.П. Меркулова разработали устройство, которое получило название «Установка для исследования электромагнитного поля электрических колец Гельмгольца» [10].

А.П. Ишковым было разработано устройство для создания однородного переменного магнитного поля. Оно предназначается для применения в экспериментальной физике и при создании авторезонансных ускорителей [11].

Учёные P. Fojkht, F. Brjuss, и A. Jordan разработали устройство для приложения магнитного переменного поля для нагрева магнитных или намагничиваемых веществ в биологической ткани. Оно относится к медицинской технике и предназначено в частности для термотерапии с магнитными наночастицами [12].

Л.В. Шмолин разработал устройство для создания в водной среде раздражающего электрического поля. Оно предназначено для использования в рыбном хозяйстве в качестве рыбозащитного или рыбоудерживающего устройства [13].

Группа учёных, в состав которой входили А.В. Савиных, Ю.А. Савиных, С.Д. Савченко, О.Е. Овчинникова, Н.П. Рубцов, И.И. Дик, В.Н. Кудряшов и Е.А. Цыганков, разработала устройство для формирования равномерного электрического поля в электропроводной среде [14].

Учёными Е.В. Мамонтовым и Е.Ю. Грачёвым был разработан способ образования двумерного линейного электрического поля и устройство для его осуществления. Это устройство может быть использовано для усовершенствования конструкций и технологий изготовления устройств пространственно-временной фокусировки и масс разделения заряженных частиц [15].

Изучением создания электромагнитных и магнитных полей, в частности для исследований их влияния на биологические объекты, в последние годы занимались такие учёные, как В.С. Мартынюк, Н.А. Темурьянц, А.В. Яценко, И.В. Анисимов, Н.Г. Птицына, Ю.А. Копытенко, С.В. Сурма, П.А. Кузнецов, Р.С. Хрусталёва, Т.В. Песков, Б.Ф. Щёголев, G. Villoresi, D. Pfluger и др. При подробном рассмотрении разработанных ими устройств выявлено, что они не могут или не предназначены для одновременного создания переменного магнитного и электрического поля различной напряженности.

Авторами разработано устройство, которое представляет собой экспериментальную установку для создания переменного магнитного и электрического полей. Роль формирователя переменного магнитного поля в этой установке выполняет соленоид. Формирователем электрического поля служат две металлические пластины, встроенные в соленоид. Причём пластины подключены к выходу источника переменного напряжения.

Установка может отдельно создавать переменное магнитное поле, электрическое поле и электромагнитное поле (при одновременном формировании переменного магнитного и электрического поля). Одним из элементов установки является генератор переменного тока. Этот генератор позволяет изменять частоту переменного магнитного поля в диапазоне  $0 \dots 10\,000$  Гц (на предварительном этапе исследование касается диапазона  $0 \dots 1000$  Гц).

Устройство для создания переменного магнитного и электрического полей представляет собой экспериментальную установку и включает следующие основные элементы:

- 1) вольтметр переменного напряжения;
- 2) лабораторный автотрансформатор;
- 3) усилитель переменного напряжения;
- 4) соленоид со встроенными металлическими пластинами;
- 5) амперметр переменного тока;
- 6) реостат регулировки тока (встроен в усилитель);
- 7) генератор переменного напряжения.

Сущность устройства заключается в том, что оно содержит две электрические цепи, первая из которых включает генератор переменного напряжения, который входом подключен к сети напряжением 220В и выходом соединен с одним из входов усилителя переменного напряжения, снабженного встроенным реостатом, при этом усилитель переменного напряжения вторым входом подключен через выключатель к сети напряжением 220В и выходом соединен через амперметр с обмоткой соленоида, вторая электрическая цепь включает высоковольт-



ный источник переменного напряжения, который входом подключен через выключатель к выходу лабораторного автотрансформатора, причем лабораторный автотрансформатор входом подключен к сети напряжением 220 В, при этом высоковольтный источник переменного напряжения имеет два выхода, одним из которых подключен к металлическим пластинам, встроенным в соленоид, причем клеммы подключения пластин снабжены резисторами, а другим выходом – к вольтметру переменного напряжения, причем максимальное напряжение на входе высоковольтного источника переменного напряжения составляет 240 В.

На рис. 2 представлена схема устройства для создания переменного магнитного и электрического полей, включающая генератор переменного напряжения 1, усилитель переменного напряжения 2, амперметр переменного тока 3, соленоид 4, лабораторный автотрансформатор 5, высоковольтный источник переменного напряжения 6, вольтметр переменного напряжения 7, металлические пластины 8, сеть 9 напряжением 220В, выключатель 10, выключатель 11.

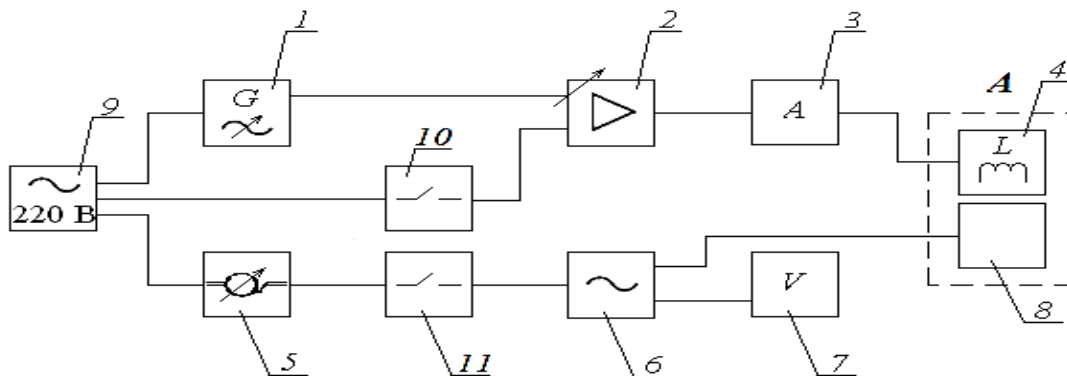


Рис. 2. Схема устройства для создания переменного магнитного и электрического полей

Предлагаемое устройство работает следующим образом.

С помощью генератора переменного напряжения 1, подключенного к сети 9 напряжением 220В, осуществляется получение переменного напряжения заданной формы и частоты. Сигнал с генератора переменного напряжения 1 подается на один из входов усилителя переменного напряжения 2, который вторым входом через выключатель 10 подключен к сети 9 напряжением 220 В. К выходу

усилителя переменного напряжения 2 через амперметр переменного тока 3 подключена обмотка соленоида 4. Таким образом, в обмотке соленоида 4 создается ток заданной величины, который приводит к образованию переменного магнитного поля внутри соленоида 4. Величина тока определяют с помощью амперметра переменного тока 3.

Регулирование тока производится с помощью изменения напряжения на выходе генератора переменного напряжения 1, а также с помощью переменного реостата, встроенного в усилитель переменного напряжения 2.

Для получения электрического поля служит высоковольтный источник переменного напряжения 6, который входом подключен через выключатель 11 к выходу лабораторного автотрансформатора 5. Лабораторный автотрансформатор 5 входом подключен к сети 9 напряжением 220В. С помощью лабораторного автотрансформатора 5 осуществляют регулирование напряжения на входе высоковольтного источника переменного напряжения 6. Высоковольтный источник переменного напряжения 6 имеет два выхода, одним из которых подключен к металлическим пластинам 8, а другим – к вольтметру переменного напряжения 7, с помощью которого измеряют напряжение на выходе высоковольтного источника переменного напряжения 6. При подаче напряжения на металлические пластины 8 в пространстве между ними образуется электрическое поле.

Высоковольтный источник переменного напряжения 6 содержит клеммы (на схеме не представлены) для подключения вольтметра переменного напряжения 7 и металлических пластин 8. Для повышения безопасности работы клеммы подключения металлических пластин 8 соединены с высоковольтным источником переменного напряжения 6 через резисторы (на схеме не представлены). Максимально допустимое напряжение на входе высоковольтного источника переменного напряжения 6, подаваемое с лабораторного автотрансформатора 5, равно 240 В.

Металлические пластины 8 размещены внутри соленоида 4 таким образом, что переменное магнитное поле, создаваемое обмоткой соленоида 4, и электрическое поле, создаваемое между металлическими пластинами 8, совпадают или

пересекаются в своей большей части, создавая в этой области пространства электромагнитное поле.

Таким образом, предлагаемая установка позволяет генерировать как электрическое поле, так и переменное магнитное поле, что позволяет с ее помощью исследовать сочетанное действие на организм животных электрического и магнитного поля. Изменение частоты магнитного поля в низком диапазоне частот с помощью генератора тока позволяет установить взаимодействие физиологических факторов организма животных с изменением частоты магнитного поля.

Установка позволяет задавать необходимые параметры ЭМП в диапазоне напряженности электрического поля 0–5000 В/м, магнитного поля – 0–100 А/м, частоты для данного исследования до 10 кГц, что позволяет изучать физиологические факторы биоорганизмов в зависимости от заданных параметров ЭМП при различных длительностях воздействия ЭМП.

Устройство является мобильным и может работать от сети переменного тока напряжением 220 В.

### *Список литературы*

1. Кузнецов К.Б., Мишарин А.С. Электробезопасность в электроустановках железнодорожного транспорта: Учебное пособие для вузов ж.-д. транспорта / Под ред. К.Б. Кузнецова. – М.: Маршрут, 2005. – 456 с.
2. Аполлонский С.М., Каляда Т.В., Синдаловский Б.Е. Безопасность жизнедеятельности человека в электромагнитных полях: Учеб. пособие. – СПб.: Политехника, 2006. – 263 с.
3. Сивухин, Д.В. Общий курс физики. – Изд. 4-е, стереотипное. – М.: Физматлит; Изд-во МФТИ, 2004. – Т. III. Электричество. – 656 с.
4. СанПиН 2.2.4.1191-03. Электромагнитные поля в производственных условиях [Текст]. – М.: Федеральный центр Госсанэпиднадзора Минздрава России, 2003. – 38 с.
5. Directive 2004/40/EC on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents, official Journal of the Europe Union, L 159, 30.4.2004.

6. Закирова А.Р. Оценка электромагнитных полей на рабочих местах персонала тягового электроснабжения как проблема техносферной безопасности // Актуальные проблемы защиты окружающей среды и техносферной безопасности в меняющихся антропогенных условиях» – «Белые ночи-2014»: Материалы международной научн.-практ. конф.: Сб. научн. Тр. – Грозный: Профобриздат, 2014. – С. 61–70.

7. Кузнецов К.Б., Закирова А.Р. Оценка электромагнитной обстановки и вероятности возникновения профессионально обусловленного заболевания // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2014. – №4 (24). – С. 82–89.

8. Мартынюк В.С., Темурьянц Н.А., Яценко А.В. и др. Компьютерная система генерации и регистрации низкочастотных магнитных полей в магнитобиологических экспериментах // Ученые записки Таврического национального университета им. В.И. Вернадского. Серия «Биология, химия». Том 16 (55). – 2003. – №1. – С. 71–73.

9. Гальперин С.М., Макуренок А.Ф. Имитатор электромагнитного поля очень низких частот и его вариант. Пат. РФ на изобретение №2252426 от 20.05.2005, опубл. 20.05.2005. – Бюл. №14.

10. Ковнацкий В.К., Давыденко О.Г., Меркулова С.П. Установка для исследования электромагнитного поля электрических колец Гельмгольца. Пат. РФ на изобретение №2491650 от 27.08.2013, опубл. 27.08.2013. – Бюл. №24.

11. Ишков А.П. Устройство для создания однородного переменного магнитного поля. Пат. РФ на изобретение №2523856 от 27.07.2014, опубл. 27.07.2014. – Бюл. №21.

12. Fojkht P., Brjuss F., Jordan A. Устройство для приложения магнитного переменного поля для нагрева магнитных или намагничиваемых веществ в биологической ткани. Пат. РФ на изобретение №2499617 от 27.11.2013, опубл. 27.11.2013. – Бюл. №33.

13. Шмолин Л.В. Устройство для создания в водной среде раздражающего электрического поля. Пат. РФ на изобретение №2255435 от 27.06.2005, опубл. 27.06.2005. – Бюл. №18.

14. Савиных А.В., Савиных Ю.А., Савченко С.Д. и др. Устройство для формирования равномерного электрического поля в электропроводной среде. Пат. РФ на изобретение №2414803 от 20.03.2011, опубл. 20.03.2011. – Бюл. №8.

15. Мамонтов Е.В., Грачев Е.Ю. Способ образования двумерного линейного электрического поля и устройство для его осуществления. Пат. РФ на изобретение №2496178 от 27.03.2013, опубл. 27.03.2013. – Бюл. №9.