# УБЫВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НИЗКОЧАСТОТНОГО ЗАЗЕМЛЕННОГО ДИПОЛЯ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ

*И. Ф. Огороднейчук, И. Я. Журавлев, А. И. Бых*

Харьков

В горной промышленности передача телемеханической информации осуществляется в основном по проводным каналам связи. Широкое распространение получили высокочастотные каналы, организованные по телефонным и силовым сетям.

В ряде случаев, особенно при телемеханизации передвижных объектов, не связанных с силовой сетью, использование проводных каналов связи нерационально — увеличивается стоимость телемеханических устройств и снижается их надежность. Если дальности передачи в этих системах невелики, то наиболее целесообразным для них является радиоканал.

Линия связи, организованная по горным породам, обладает большей надежностью и экономичностью по сравнению с кабельными линиями связи. Основной недостаток такой линии — значительное затухание сигналов в горных породах — при малых дальностях передачи проявляется мало. Снижением рабочих частот затухание сигналов можно значительно уменьшить.

В лаборатории АТ ХИРЭ были проведены теоретические и экспериментальные исследования распространения электромагнитных полей звукового диапазона в горных породах угольных шахт. В данной статье рассматриваются вопросы выбора излучающих элементов, а также излагаются результаты экспериментального изучения законов убывания амплитуд низкочастотных электромагнитных полей в горных породах.

Правильным выбором типа передающего и приемного элементов в значительной степени определяются дальность действия системы телемеханики, частотные свойства канала, условия согласования с аппаратурой. В качестве излучателей низкочастотных электромагнитных полей обычно применяются заземленные электрические и магнитные диполи. К излучателям, используемым во взрывоопасной атмосфере, кроме требования необходимого коэффициента излучения, предъявляется требование искробезопасности. Последняя, как известно [1], зависит от реактивности цепи излучателя и связана определенным образом с излучающей способностью диполя.

Коэффициент излучения является мерой мощности, связанной с окружающей средой, по сравнению с реактивной мощностью в индуктивности антенны [2].

*Для магнитного диполя, выполненного в виде сферической катушки с сердечником,*

$$p = \frac{a^3}{a' \delta^2} \cdot \frac{1}{\frac{1}{k} + \frac{1}{2}} \ll 1,$$

где $p$ — коэффициент излучения;
$a$ — радиус антенны;
$a'$ — радиус полости в породе;
$\delta = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\lambda}{30\sigma}} = \frac{\lambda_{пор}}{2\pi}$ — глубина проникновения электромагнитного поля в породе;
$k$ — коэффициент, характеризующий магнитные свойства сердечника;
$\lambda$ — длина волны в воздухе;
$\lambda_{пор}$ — длина волны в породе;
$\sigma$ — проводимость породы.

Для достижения коэффициента излучения, близкого к единице, размеры магнитного диполя должны быть соизмеримы с длиной волны в среде. В подземных условиях на низких частотах это требование невыполнимо, поэтому использование магнитных диполей сопряжено с определенной искроопасностью.

Заземленный электрический диполь обладает весьма малой реактивностью подводящих проводников. Коэффициент излучения практически равен единице в широком диапазоне частот. Следовательно, искробезопасность заземленного электрического диполя является наибольшей. Помимо этого электрические заземленные диполи дешевле магнитных и более удобны в эксплуатации.

Экспериментальные исследования законов убывания низкочастотных электромагнитных полей в горных породах проводились на восьми шахтах комбинатов «Луганскуголь» и «Донбассантрацит».

Как известно, поле диполя в однородной изотропной среде имеет три зоны — ближнюю, промежуточную и дальнюю — волновую. Каждой зоне присущ свой закон убывания составляющих поля: в ближней — поле убывает пропорционально кубу расстояния, в дальней — первой степени расстояния, в промежуточной — второй. Результирующее поле — результат геометрического сложения составляющих поля от каждого члена.

В однородной поглощающей среде на все члены поля накладывается экспоненциальный закон убывания от поглощения поля в среде [3].

$$E_\theta = \frac{I_д l}{4\pi\sigma} e^{-br}\left[i\frac{2b^2}{r} + \frac{(1+i)\,b}{r^2} + \frac{1}{r^3}\right]\sin\theta,$$

где $E_\theta$ — электрическая составляющая напряженности поля;
$I_д$ — ток диполя, $a$;
$l$ — длина диполя, $м$;
$r$ — расстояние от излучателя, $м$;
$b$ — коэффициент поглощения поля в среде;
$\sigma$ — проводимость среды, $сим/м$.

На рис. 1 приведены графики убывания электромагнитного поля различной частоты по оси диполя, построенные для однородной среды при

$$I_д = 1a;$$

$$\sigma = 2 \cdot 10^{-2}\ сим/м;\quad l = 30\ м.$$

Реальные горные породы имеют многослойную структуру. Проводимости отдельных слоев подчинены случайному закону.

В такой среде структура электромагнитного поля намного усложняется. Убывание составляющих поля зависит от большого числа факторов — числа, мощности и проводимости слоев, ориентации излучателя по отношению к слоям и т. п.

Для нас важными являются два обстоятельства:

а) в слоистой среде убывание поля вдоль слоев происходит не так быстро, как в однородной среде;

б) на угольных месторождениях слоями с сильно отличающейся проводимостью являются пласты угля, что является также весьма благоприятным, так как излучающие и приемные диполи в большинстве случаев будут располагаться в выработках, пройденных по пластам угля.

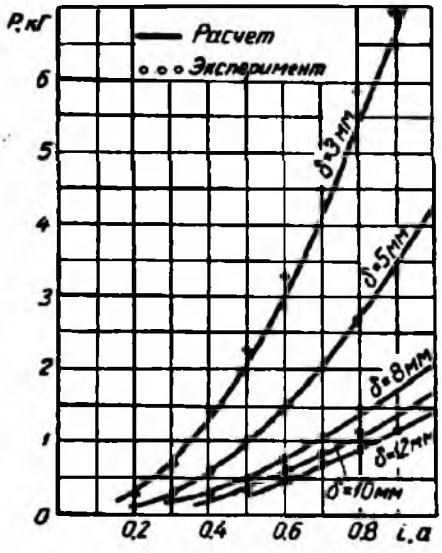



Рис. 1. Графики убывания электромагнитного поля различной частоты для однородной среды.

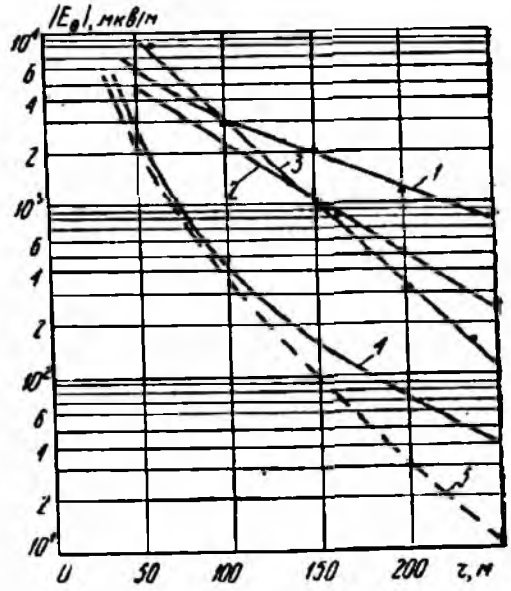



Рис. 2. Экспериментальные характеристики, снятые в штреках при различных вариантах заземления диполей на частоте 3 *кгц*.

Ввиду того, что мощности пластов угля невелики по сравнению с длиной волны, то наибольшее влияние они оказывают на расхождение поля. Затухание поля определяется эффективной проводимостью массива горных пород.

Аналитическое определение влияния пластов на структуру электромагнитного поля сопряжено со значительными трудностями, поэтому повышается роль экспериментальных исследований, позволяющих определить законы убывания полей в реальных условиях и выявить оптимальную ориентацию излучателей в пространстве.

На рис. 2 приведены экспериментальные характеристики, снятые в штреках при различных вариантах заземления диполей на частоте 3 *кгц*. Кривая *3* снята в промежуточном штреке шахты «Красный партизан». Передающий и приемный диполи заземлялись в боковых стенках штрека в пласте антрацита.

Измерение потенциала по периметру выработки показало, что напряженность поля в боковых породах почти постоянна, а в пласте она близка к нулю, т. е. пласт в поперечном направлении можно считать эквипотенциальной поверхностью. Такая структура присуща плоскому полю. Это же подтверждается ходом кривой *3*, резко отличающейся от этой же характеристики в однородной среде. Здесь стационарный закон почти не проявляется, а закон, определяемый членом $e^{-br}$, начинает сказываться в непосредственной близости от излучателя. Причиной такого различия является весьма высокая проводимость пласта антрацита, в результате чего он служит «направляющим» проводником

для тока, т. е. здесь видно существенное улучшение стационарной части поля за счет использования слоистого строения среды.

Кривая *4* снята на шахте «Ломоватка-Южная» в промежуточном штреке пласта $m_3$. Диполи заземлялись по схеме «почва — почва». Здесь влияние пласта угля марки ПС проводимостью $\sigma = 2 \cdot 10^{-3}$—$5 \cdot 10^{-3}$ *сим/м* незначительно, и кривая *4* имеет все характерные участки, как и в однородной среде. Кривая *2* получена в вентиляционном штреке шахты «Ново-Павловская». Передающий диполь заземлялся в боковых стенках штрека в пласте антрацита, а приемный — подсоединялся к пласту и почве. Заметно также отсутствие потенциального члена, как и у кривой *3*, но наклон кривой меньше, очевидно, из-за меньшей проводимости вмещающих пород.

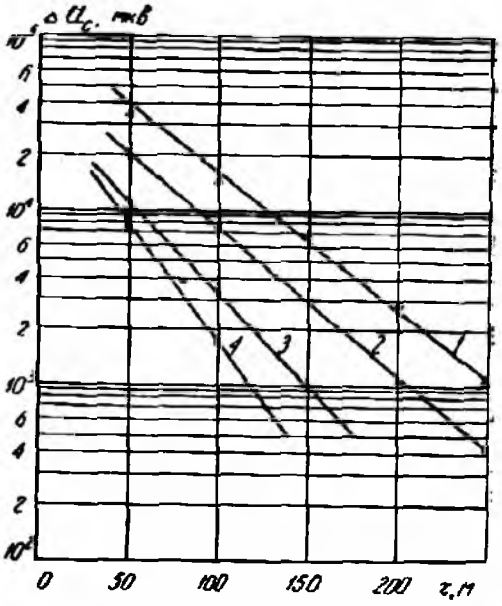



Рис. 3. Экспериментальные характеристики, снятые в лавах при различных вариантах заземления диполей на частоте 2,7 *кгц*

Кривая *1* снята в откаточном штреке пласта $m_3$ шахты «Ломоватка-Южная». В штреке проложен бронированный кабель, уменьшающий затухание поля. Диполи подсоединялись по схеме «кровля — почва». Кривая *5* рассчитана для однородной среды с проводимостью $\sigma = 2 \cdot 10^{-2}$ *сим/м*. Наклон этой кривой в дальней зоне выше, чем у экспериментальных кривых, из чего можно сделать вывод, что проводимость пород ниже $2 \cdot 10^{-2}$ *сим/м*. Аналогичные зависимости были сняты в лавах (рис. 3).

Кривая *1* (рис. 3) снята в лаве шахты «Ново-Павловская», остальные — в лаве шахты «Красный партизан». При получении зависимостей *1* и *2* передающие диполи заземлялись по схеме «пласт — пласт», приемные — по схеме «пласт — почва». Постоянство наклона кривых говорит о концентрации тока в пласте антрацита.

Кривой *3* соответствует заземление передающего диполя по схеме «пласт — почва», приемного — «кровля — почва»; кривая *4* снята при подсоединении диполей по схеме «кровля — почва». Это семейство кривых снято на частоте 2, 7 *кгц* и приведено к току 1 *а*.

Анализируя рассмотренные экспериментальные зависимости, можно сделать следующие выводы.

1. При заземлении передающего диполя в почве влияние пласта угля незначительно и им можно пренебречь.

2. Заземление диполей по схеме «кровля — почва» для случая низкопроводящего пласта или заземление по схеме «пласт — пласт» при наличии выработки в высокопроводящем пласте позволяет значительно уменьшить расхождение электромагнитного поля. Ход кривых $E_\theta(r)$ для этих случаев резко отличается от хода аналогичных кривых в однородной среде. За счет концентрации тока в высокопроводящих слоях кривые $E_\theta(r)$ приобретают вид прямых линий.

Увеличение уровня сигнала в точке приема зависит от соотношения проводимостей пласта и боковых пород. По данным экспериментов, оно составляет в среднем 10—30 раз.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Правила изготовления взрывозащитного электрооборудования. Отчет МакНИИ и Гипронисэлектрошахт, 1966.

2. Уилер. Основные ограничения при использовании длинноволновых малогабаритных антенн на подводных лодках. Сб. «Распространение длинных и сверхдлинных радиоволн». Изд-во иностр. лит-ры, 1960.

3. Г. А. Лавров, А. С. Князев. Приземные и подземные антенны. Изд-во «Советское радио», 1965.