ИМПЕДАНСНЫЙ МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ ПОДВОДНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

В.Г Максименко

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
Фрязинский филиал

Показана возможность обнаружения подводных металлических объектов, в первую очередь, протяженных (трубопроводов, кабелей), по уменьшению сопротивления между заводненными электродами, находящимися над проводником. В лабораторных экспериментах уменьшение сопротивления составляло от долей до единиц процентов.

При проведении строительных работ в прибрежной полосе водоемов возникает задача обнаружения подводных металлических объектов, в первую очередь, проложенных по дну кабелей и трубопроводов. Наиболее распространен способ обнаружения подводных объектов путем ультразвуковой гидролокации [1]. Однако он не позволяет обнаружить объект под слоем ила. С помощью металлоискателя, принцип действия которого основан на изменении частоты настройки колебательного контура в присутствии металлических предметов, не удается обнаруживать объекты на расстоянии больше 2-3 метров [2]. Известен также способ обнаружения подводных кабелей и трубопроводов, в соответствии с которым над трубопроводом располагают возбуждающий провод, по которому пропускают переменный ток. При этом в кабеле или трубе также возбуждается ток. По результатам измерения магнитного поля этого тока можно обнаружить трубопровод на значительном расстоянии от возбуждающего провода [3]. Недостатком этого способа является невозможность возбудить достаточный для измерений ток в трубе, если расстояние между ней и возбуждающим проводом превышает 2 метра, следовательно, невозможность поиска трубопровода, если неизвестно его положение хотя бы в одном месте.

Задача исследования состояла в том, чтобы выяснить возможность обнаружении металлических подводных объектов по результатам измерения импеданса между двумя заводненными электродами. Сопротивление между погруженными в воду электродами определяется в общем случае проводимостью воды, размерами и формой электродов, расстоянием между ними, частотой, на которой производят измерение, и наличием вблизи электродов объектов, проводимость которых значительно отличается от проводимости воды. В случае пресной воды такими объектами могут быть металлические объекты. Как показано в [4], чтобы исключить влияние сопротивления контакта электрода с водой, частота должна составлять не менее 1 кГц. В таком случае сопротивление между электродами определяется сопротивлением растекания.

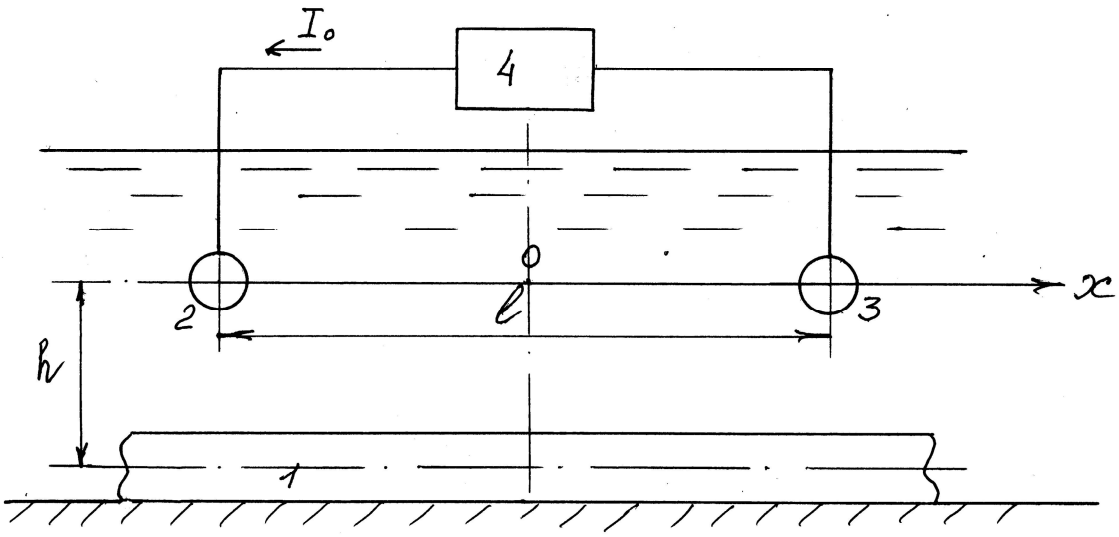

Рис.1. Схема измерения сопротивления растекания. 1- металлический протяженный объект; 2,3 – электроды; 4 – блок измерения.

Рассмотрим обнаружение длинного проводника (трубопровода, кабеля), лежащего на дне водоема. Легко показать, что относительное изменение сопротивления растекания между заводненными электродами, находящимися над проводником (рис.1), примерно равно отношению тока, замыкающегося через проводник, к полному току, текущему между электродами. Достаточно просто оценить относительное изменение сопротивления растекания можно лишь, если пренебречь искажением поля между электродами искомым проводником. Рассмотрим квазистационарный случай, когда длина волны в воде много больше расстояния между электродами, проводник изолированный, сферические электроды и проводник расположены в бесконечной и безграничной среде. Тогда распределение потенциала $\varphi(x)$ в воде с проводимостью σ вдоль проводника определяется суперпозицией падений напряжения от токов растекания, текущих от электродов в радиальных направлениях.

$$\varphi(x) = \frac{I_0}{2\pi\sigma}\left(\frac{1}{\sqrt{(x-l/2)^2+h^2}} - \frac{1}{\sqrt{(x+l/2)^2+h^2}}\right), \tag{1}$$

где I_0 - полный ток между электродами, l - расстояние между электродами, h - глубина, на которой расположен проводник относительно электродов. Точка с координатой $x=0$ соответствует середине отрезка между электродами. Ток, протекающий в проводнике между электродами, создает в нем падение напряжения, равное

$$\begin{aligned} U &= 2R_0\sqrt{g_0^2+(\omega C_0)^2}\int_{-l/2}^{l/2}\varphi(x)dx = \\ &= \frac{2I_0\,R_0\sqrt{g_0^2+(\omega C_0)^2}}{\pi\sigma}\left(\frac{l}{2}\ln\frac{l+\sqrt{l^2+h^2}}{h} + h - \sqrt{l^2+h^2}\right). \end{aligned} \tag{2}$$

Здесь R_0 - погонное сопротивление проводника, g_0 - погонная проводимость, а C_0 - погонная емкость изоляции провода, ω - круговая частота. Отсюда среднее значение тока в проводнике $I = U / R_0 l$, а относительное изменение сопротивления между электродами, обусловленное наличием провода,

$$\frac{\Delta R}{R} \approx \frac{I}{I_0} = \frac{2\sqrt{g_0^2 + (\omega C_0)^2}}{\pi \sigma l}\left(\frac{l}{2}\ln\frac{l+\sqrt{l^2+h^2}}{h} + h - \sqrt{l^2+h^2}\right). \qquad (3)$$

Из (3) следует, что относительное изменение сопротивления $\Delta R / R$ монотонно растет с увеличением расстояния l между электродами. Если провод имеет хорошую изоляцию ($g_0 = 0$), то значение $\Delta R / R$ пропорционально частоте.

Для водоемов Московской области проводимость воды по нашим данным [5] может находиться в пределах от 0,0035 до 0,0173 сим/м. При поиске кабеля с хорошей изоляцией и погонной емкостью 100 пФ/м при l=3 м, h=1 м и $\omega = 6{,}28 \cdot 10^6$ Гц в соответствии с (1) можно ожидать относительного изменения $\Delta R / R$ в пределах единиц процентов.

В лабораторных условиях выполнен ряд экспериментов по обнаружению металлических объектов на дне диэлектрической ванны, заполненной водой с проводимостью 0,16 сим/м. Ванна имела размеры 0,6x1,1x0,3 м и была заполнена водой на 20 см. Поставлен эксперимент по обнаружению длинного голого проводника, лежащего на дне ванны перпендикулярно длинным стенкам. В качестве такого проводника использовались стальной и латунный прутки и медная проволока. Два плоских электрода размером 30x30 мм располагались параллельно дну ванны на базе 200 мм друг от друга на расстоянии 110 мм от дна, их база ориентирована перпендикулярно длинным стенкам ванны. Оба электрода одновременно перемещались вдоль ванны, при этом наблюдалось уменьшение сопротивления между электродами в момент пересечения проводника. При диаметре стального прутка 4 мм и длине 600 мм относительное изменение сопротивления составило 1,2% для прутка с чистой поверхностью и 0,9% для прутка, покрытого толстым слоем ржавчины. Медная проволока диаметром 0,5 мм давала изменение сопротивления 0,8%. Таким образом, протяженные проводники, даже подверженные сильной коррозии, уверенно обнаруживались. Отношение зарегистрированного относительного изменения сопротивления к собственной погрешности измерителя составляло десятки раз. Если же на дне ванны между электродами располагался стальной параллелепипед с размерами 50x50x25 мм, то изменение сопротивления составляло 0,15%, что также позволяло уверенно его обнаружить.

В лабораторном эксперименте, выполненном в той же ванне, уверенно обнаруживался объект, представляющий собой жгут из трех покрытых эмалевой изоляцией медных проволок диаметром 0,5 мм с длиной, равной ширине ванны. Концы проволок были изолированы от воды. Погонная емкость одной такой проволоки составляла $2 \cdot 10^{-9} \Phi / м$. На частоте 1 МГц изменение сопротивления между электродами при пересечении объекта составило 0,6%. На рис.2 показаны измеренные зависимости относительного изменения сопротивления между электродами от отношения l / h при пересечении проводника. Кривая 1 получена для неизолированного проводника из латуни диаметром 6 мм и длиной

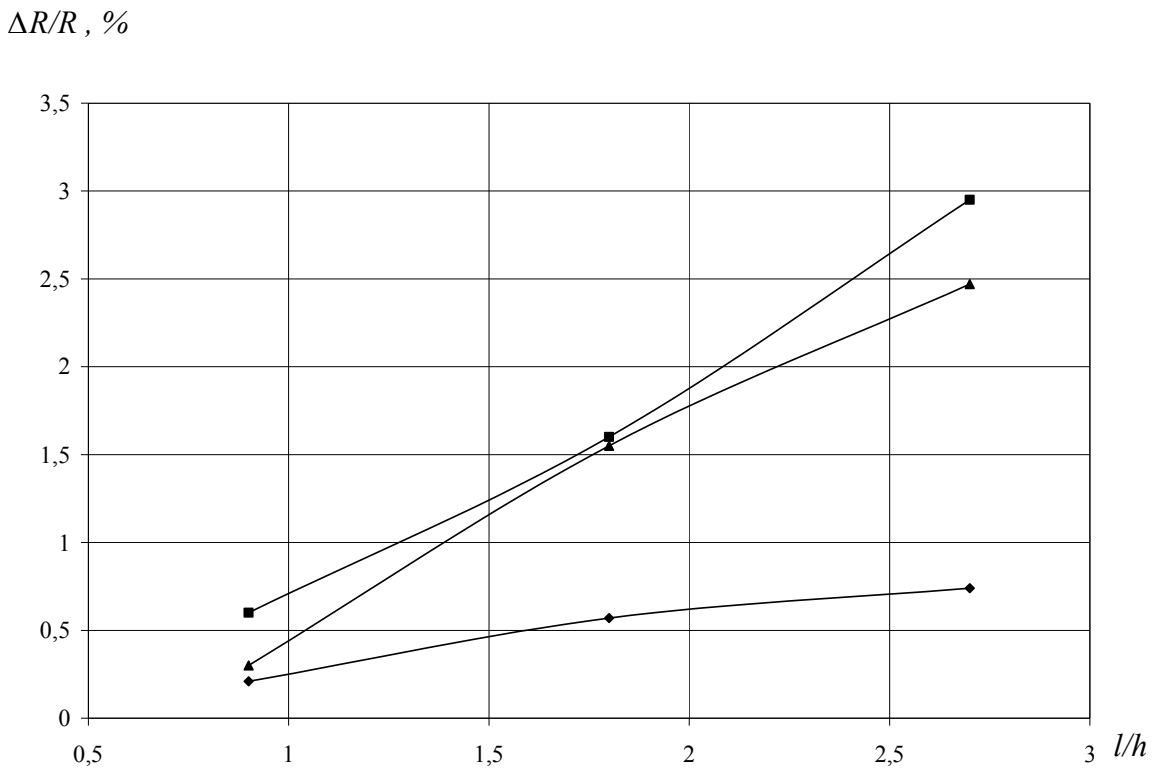

Рис.2. *Относительное изменение сопротивления между электродами при изменении расстояния между электродами. 1 – латунный пруток диаметром 6 мм, частота 1 кГц; 2 - жгут из трех эмалированных медных проволок диаметром 0,5 мм, частота 1 МГц, эксперимент; 3 – расчетная кривая для жгута из изолированных проволок.*

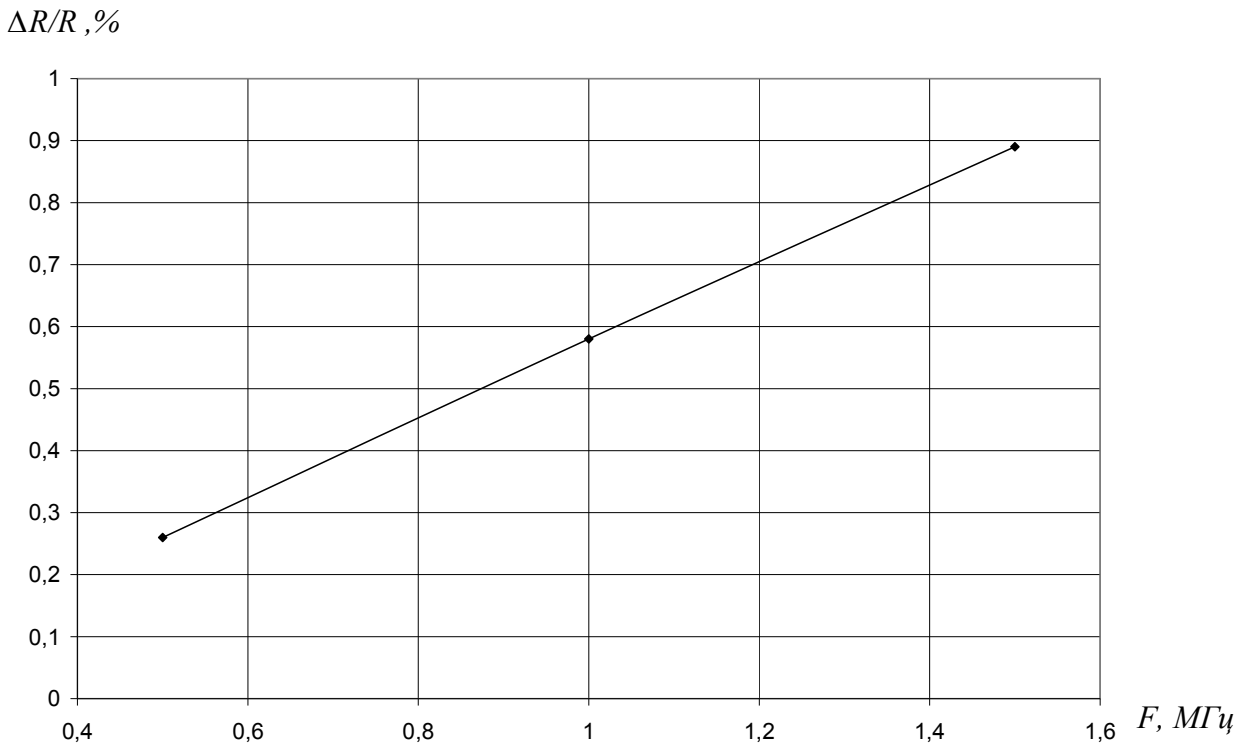

Рис. 3. *Зависимость величины* $\Delta R/R$ *от частоты.*

0,6 м при частоте измерения 1 КГц. Кривая 2 – для жгута из трех эмалированных медных проволок диаметром 0,5 мм, кривая 3 – значение $\Delta R/R$, рассчитанное для жгута из изолированных проволок по формуле (3). Расчетная кривая 3 близка к экспериментальной 2 только при малом отношении l/h. С увеличением расстояния между электродами, возможно, сказываются конечные размеры ванны. На рис. 3 показана измеренная зависимость $\Delta R/R$ от частоты (объект – жгут из трех изолированных проволок). Она близка к линейной, что согласуется с (3).

Рассмотрим также случай обнаружения металлического объекта, размеры которого много меньше расстояния между электродами. Известно, что сопротивление растекания определяется величиной емкости между электродами, если жидкость считать диэлектриком [6]. Соответственно, относительное изменение сопротивления растекания в проводящей жидкости равно относительному изменению емкости в непроводящей. Пусть объект в виде металлического цилиндра длиной L и площадью сечения S помещен в плоский конденсатор, пластины которого имеют площадь S_0 и расположены на расстоянии d, так, что ось цилиндра перпендикулярна пластинам. Если не учитывать искажение поля цилиндром, то относительное изменение сопротивления растекания между пластинами равно

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{S}{S_0}\frac{L}{d-L}. \qquad (4)$$

Эта формула лишь позволяет оценить порядок ожидаемой величины $\Delta R/R$, так как на практике приближение плоского конденсатора обычно не выполняется. Также искажение структуры поля вблизи цилиндра может привести к увеличению отношения $\Delta R/R$ по сравнению с (4).

В лабораторных условиях выполнены эксперименты по обнаружению небольших металлических объектов. Для этого на противоположных больших стенках ванны были установлены два плоских электрода размером 22х37 см, сопротивление между ними на частоте 1000 Гц составило 80 Ом. Измерительный прибор регистрировал относительное изменение сопротивления между электродами с ошибкой в 0,01%. Уверенно обнаруживалось внесение в пространство между электродами металлического предмета длиной от 3 см и более. Например, при внесении стального стержня длиной 30 мм и диаметром 3 мм, ориентированного перпендикулярно к электродам, относительное изменение сопротивления составило 0,03%, что существенно больше, чем рассчитанное по формуле (4). Это изменение значительно возрастало с увеличением длины объекта, в меньшей степени – при увеличении других его размеров, и практически не зависело от материала объекта (сталь, медь). Большое влияние на величину $\Delta R/R$ имеет состояние поверхности проводника. При использовании двух односторонних плоских электродов, расположенных на базе 200 мм параллельно дну ванны на расстоянии 110 мм от него (как и в эксперименте по обнаружению длинных проводников) установлено следующее.

а) Наибольшее значение $\Delta R/R$ наблюдается, если объект расположен строго посредине между электродами.

б) Увеличение длины проводника ведет к увеличению $\Delta R/R$, причем эта зависимость близка к квадратичной в диапазоне значений длины объекта (в эксперименте – го-

лой медной проволоки диаметром 2 мм) от $0{,}5L$ до L. При меньшей длине объекта зависимость близка к линейной.

в) Сопротивление между электродами мало зависит от площади сечения проводника, а определяется, в основном его поперечным горизонтальным размером. При лежащей на дне ванны между электродами полоске фольгированного текстолита шириной 4 см и длиной 20 см (толщина фольги 0,1 мм) сопротивление между электродами равно 292,7 Ом. Такое же значение получается и в случае четырех лежащих параллельно медных проволок диаметром 2 мм, равномерно распределенных по ширине 4 см. При укладке же их вплотную друг к другу сопротивление увеличивается до 294 Ом.

г) Уменьшение расстояния от электродов до объекта по вертикали ведет к увеличению $\Delta R/R$ (рис.4).

д) Увеличение площади электродов также ведет к увеличению $\Delta R/R$ (рис.5). Эта зависимость не следует из выражения (3), при выводе которого диаметр электродов считался пренебрежимо малым по сравнению с расстоянием между электродами.

Таким образом, теоретическая оценка и лабораторные эксперименты дают основания полагать, что поиск металлических подводных объектов, в частности, кабелей и трубопроводов, импедансным методом возможен и в натурных условиях. Изменение рельефа дна в лабораторном эксперименте путем укладки на него плохо проводящих предметов (фторопластовых и деревянных брусков) практически не сказывалось на сопротивлении между электродами. Это позволяет надеяться, что при поиске подводных металлических объектов в натурных условиях изменение рельефа дна не помешает их обнаружению.

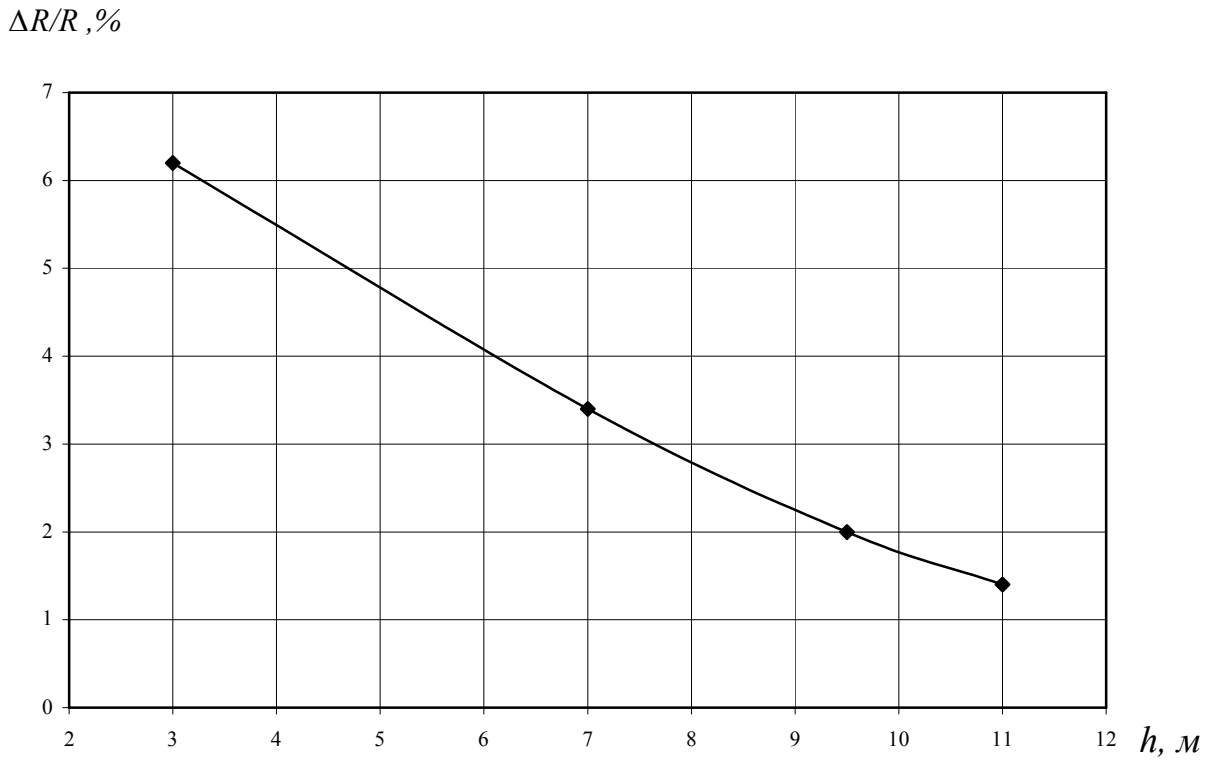

Рис.4. *Зависимость величины $\Delta R/R$ от расстояния между электродами и объектом по вертикали.*

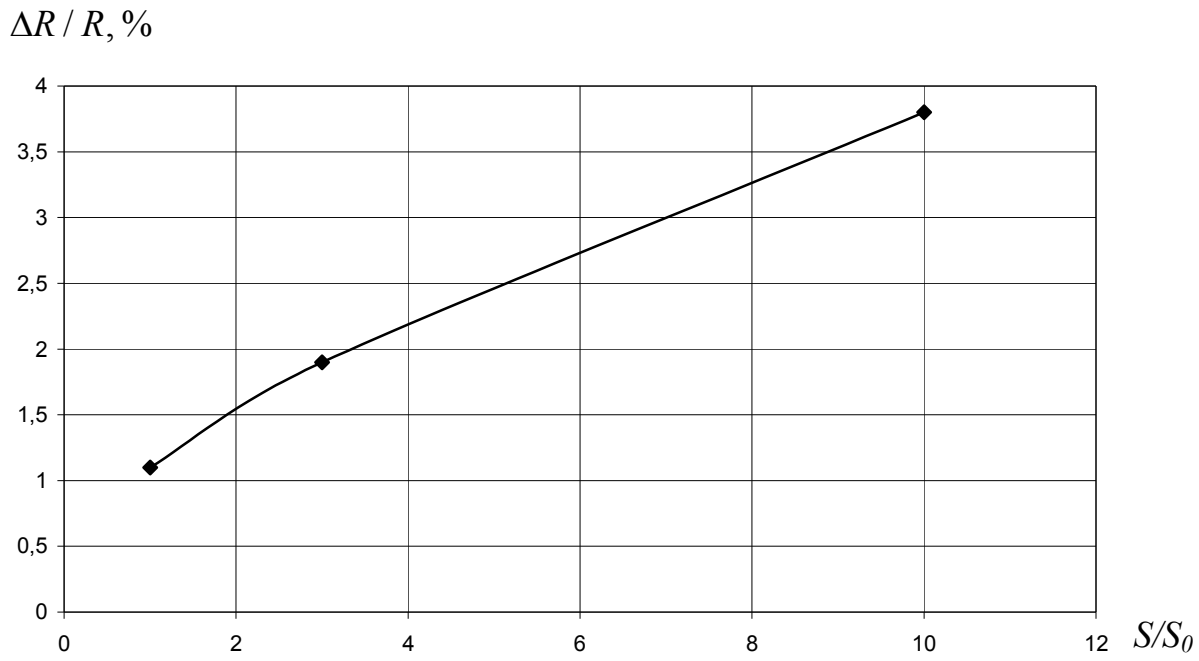

***Рис.5**. Зависимость величины $\Delta R / R$ от площади электродов S (S_0 = 3 см^2).*

Литература

1. Клюкин И.И. Удивительный мир звука. / Л., «Судостроение», 1978, 168 с.
2. Щедрин А.И., Осипов И.Н. Металлоискатели для поиска кладов и реликвий. (МРБ, вып. 1232). / М., «Радио и связь», «Горячая линия – Телеком», 1999, 192 с.
3. Каевицер В.И., Лишин И.В., Максименко В.Г., Нарышкин В.И., Дякин В.А., Гашевский А.В., Гашевская О.С. Радиофизический метод измерения координат и глубины расположения электрического кабеля, проложенного по дну водоема. // Радиотехника и электроника. - 2004, т. 49, № 4, с. 450-453.
4. Максименко В.Г. Импедансные характеристики и предельная чувствительность электродных датчиков электромагнитного поля в морской воде. // Радиотехника и электроника. - 2006. - Т. 51. - № 7. - С. 786-795.
5. Максименко В.Г., Нарышкин В.И., Гатилов А.В. Измерение низкочастотного электромагнитного поля в водоемах Подмосковья./ Региональная XIII конференция по распространению радиоволн: Тезисы докладов – С. – Петербург, 2007, С.51-53.
6. Говорков В.А. Электрические и магнитные поля. Изд. 3-е./М., 1968, «Энергия», 488с.