

УДК 550.8.02:53.043:537.6/8

В.І. ЧУМАКОВ

Академия ВМС имени П. С. Нахимова, Севастополь

А.В. СТОЛЯРЧУК

Главное представительство заказчика 4104, Харьков

А.А. ТАРАНЧУК

Хмельницкий национальный университет, Хмельницкий

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕРАТОРОВ СВЕРХСИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В МАГНИТОРАЗВЕДКЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Приведено обоснование метода активной магнитной интроскопии земной коры. Рассмотрена возможность применения магнитокумулятивных источников сверхсильных магнитных полей в качестве активных элементов магниторазведки полезных ископаемых. Рассчитаны значения магнитного поля, генерируемого в пространстве магнитокумулятивным источником.

Ключевые слова: полезные ископаемые, магниторазведка, остаточная намагниченность, магнитная восприимчивость, напряженность магнитного поля, интроскопия, магнитокумулятивный генератор, источник тока

V.I. CHUMAKOV

Naval Academy by of P.S. Nakhimov, Dybenkost., 1a, Sevastopol, 99028, Ukraine

A.V. STOLARCHUK

General customer's representation 4104, Moskovski av., 199, Kharkov, 61037, Ukraine

A.A. TARANCHUK

Khmelnsky National University, 11 Institutska str., 29016, Khmelnsky, Ukraine

APPLICATION OF MAGNETIC ULTRAHIGH-FIELD GENERATORS IN MAGNETOEXPLORING OF EARTH'S CRUST

A proving of active magnetic intrascopy method of the Earth's crust is given. Possibility of application of magnetic ultrahigh-field magnetocumulative sources is considered as the active elements of magnetoexploring of minerals. The values of magnetic-field generated in space by a magnetocumulative source are expected.

Keywords: minerals, magnetoexploring, residual magnetization, magnetic susceptibility, intensity of magnetic field, intrascopy, magnetocumulative generator, source of current

1. Введение

Наличие остаточной намагниченности горных пород, руд, различных полезных ископаемых открывает широкую перспективу в решении как общенаучной проблемы – исследовании состояния и динамики поверхностного слоя земной коры, так и прикладной проблемы – анализе природных ресурсов. В настоящее время такой анализ базируется на решении обратной задачи магниторазведки: определении формы и распределения залегающих полезных ископаемых по результатам измерений площадного распределения аномалий магнитного поля Земли [1]. Поверхность Земли представляет собой среду со статистически неоднородным и, вообще говоря, анизотропным, распределением магнитной восприимчивости. Напряженность магнитного поля Земли H_Z , в общем, отличается от идеальной модели однородно намагниченного изотропного шара H_0 и может быть представлена линейной комбинацией постоянного H_0 и переменного H_A поля [1]

$$H_Z = H_0 + H_A = H_0 + H_A + H_A \quad (1)$$

В такой модели отклонение от идеального случая обусловлено аномальной составляющей поля H_A , наличие которой объясняется как намагниченностью значительных объемов поверхностного слоя земной коры (глобальные аномалии), так и намагниченностью отдельных участков, вызванной присутствием в составе горных пород прежде всего железных руд с выраженными ферромагнитными свойствами (региональные аномалии). Вариации магнитного поля H_A вызваны различными причинами, доминирующей из которых является солнечная активность. Амплитудные значения аномальной составляющей напряженности магнитного поля H_A зависят от многих факторов, прежде всего – от состава горных пород и наличия в них материалов с высокой магнитной восприимчивостью.

2. Основная часть

Естественные факторы, определяющие амплитуду поля H_A , могут быть в значительной степени дополнены действием внешнего источника поля антропогенной природы, что позволяет создать заданное распределение поля остаточной намагниченности, выделить границы поверхности и глубины залежей с высоким уровнем остаточного поля (прежде всего, участки коры, содержащие ферромагнитные вещества), уменьшить влияние на результат измерений случайных явлений различного происхождения, не требуя при этом измерительных приборов со сверхвысокой чувствительностью и разрешением. Основными требованиями к внешнему источнику являются способность генерировать магнитное поле с высоким

уровнем напряженности и монополярность генерируемого поля. Такой способ формирования в составляющих земной коры остаточной намагниченности с помощью внешнего источника поля называется активной магнитной интроскопией (АМИ).

В качестве задающего источника поля могут быть использованы магнитокумулятивные генераторы (МКГ), принцип действия которых основан на сжатии (кумуляции) магнитного поля, предварительно запасенного в замкнутом контуре, продуктами детонации взрывчатого вещества (ВВ) [2]. Возможность генерирования с помощью МКГ монополярного импульса тока обеспечивает возбуждение остаточной намагниченности в окружающих породах, а большая абсолютная величина тока (и, соответственно, магнитного поля) создает условия для покрытия больших территорий.

МКГ представляет собой электрическую цепь (рис. 1а), ток в которой описывается параметрическим уравнением вида

$$L(t) \frac{di(t)}{dt} + \left[\frac{dL(t)}{dt} + R \right] i(t) = 0, \quad (2)$$

где $L(t) = L_0 f(t)$ и R – соответственно индуктивность и активное сопротивление цепи.

Решение (1) записывается в виде

$$i(t) = I_0 \exp \left\{ - \int_0^t \frac{1}{f(t)} \left[\frac{df(t)}{dt} + \frac{R}{L_0} \right] dt \right\}, \quad (3)$$

где I_0 – начальный ток в цепи, обеспечивающий запасание магнитного поля.

Как видно из (2), характер временной зависимости тока определяется законом изменения индуктивности $L(t)$. Нарастание тока имеет место при выполнении условий

$$\frac{df(t)}{dt} < 0, \quad \frac{L_0}{R} \left| \frac{df(t)}{dt} \right| > 1.$$

Условие $\frac{L_0}{R} \left| \frac{df(t)}{dt} \right| = 1$ соответствует максимальному значению тока (точка поворота А на рис.1б в

момент времени t_1 . При этом $\frac{di}{dt} = 0$).

На рис. 2б приведены временные диаграммы тока МКГ для различных законов изменения индуктивности $f(t)$: экспоненциального – 1, линейного – 2, степенного – 3. Как видно, скорость возрастания тока $di(t)/dt$ на конечном этапе сжатия поля возрастает, если шаг намотки спирали МКГ уменьшается по длине спирали.

Эффективность МКГ существенно зависит от потерь магнитного потока в замкнутом контуре, которые вызываются различными причинами: недостатками конструкции, диффузией тока в проводник, джоулевыми потерями и потерями на излучение. Известно также, в условиях сверхсильных полей металлы проявляют текучесть, что приводит к разрушению элементов конструкции МКГ еще на этапе сжатия магнитного поля [2]. С целью предотвращения данного эффекта разработана модель комплексированного генератора (КМКГ), в котором реализован принцип распараллеливания магнитного потока в многолайнерной системе [3]. В [4–6] разработаны различные виды КМКГ, показаны общие варианты их конструктивного исполнения. Модель спирального генератора приведена на рис.1в. Его основными элементами служат внешняя 1 и внутренняя 3 спиральные катушки индуктивности, коаксиальные цилиндрические проводящие лайнеры 2 и 4, пространство между которыми 5 заполнено ВВ. На торцах генератора располагаются соответственно детонаторы 6 и нагрузка **Н**. В плоскоспиральном КВМГ (рис.2г) используются плоские катушки 1, а лайнеры 2, заполненные зарядом ВВ 6, имеют U-образную форму. Несколько таких генераторов расположены по окружности. После запитки генератора от внешнего источника через контакты 3 происходит синхронный подрыв детонаторов 5. В результате магнитной кумуляции деформируемым лайнером поле выдавливается к центру системы.

Одним из важных свойств МКГ является возможность генерирования не только сверхсильных токов, но и импульсов с высокой скоростью нарастания тока. Для этого в схему рис.1 вводится емкость, что приводит к реализации схемы, процесс в которой описывается параметрическим уравнением II порядка [7]. Решая его методом редукции [8], получим, что временная зависимость тока может быть представлена выражением

$$i(t) = A(t)s(t). \quad (3)$$

Здесь амплитудный множитель **A(t)** может быть получен как результат решения уравнения I порядка, а колебательный множитель **s(t)** зависит от вида инварианта уравнения, полученного в результате редукции [7,8]. Условия реализации колебательного режима изложены в [7].

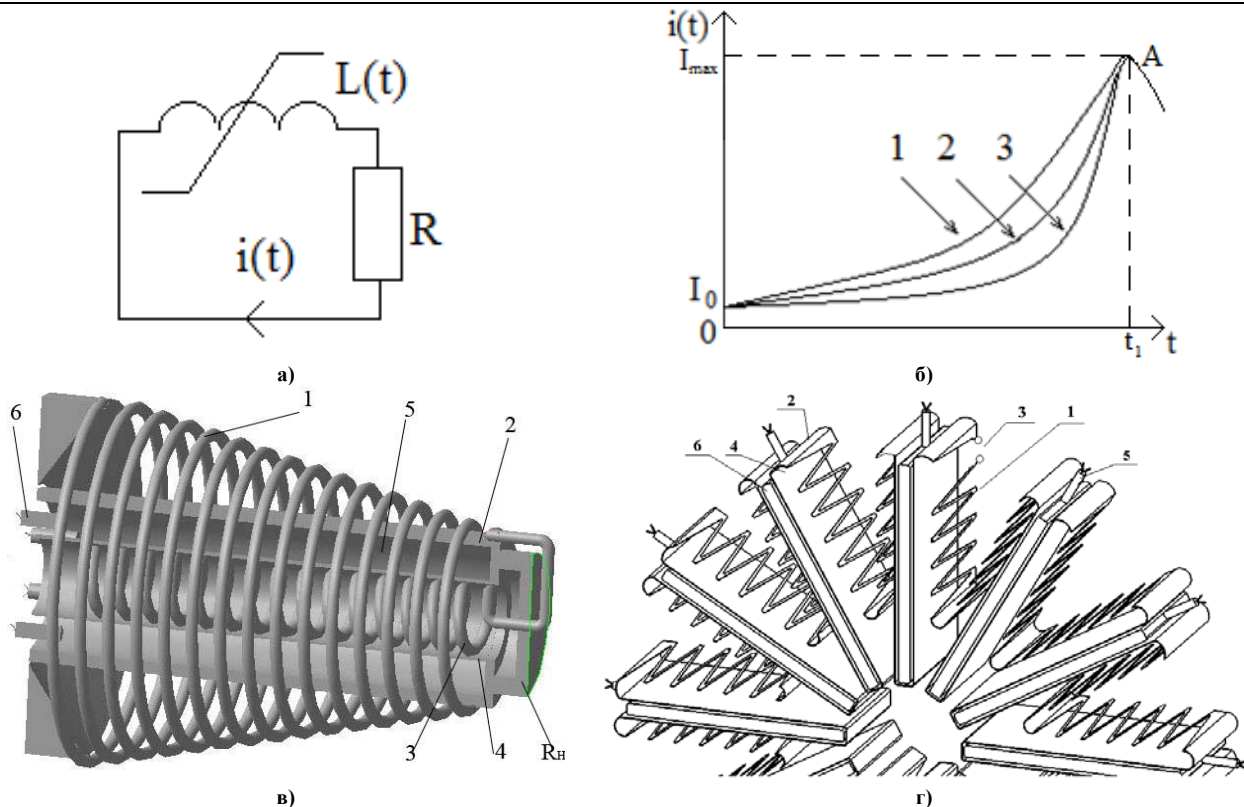


Рис. 1. Электрическая схема МКГ – (а), временные зависимости тока для различных законов изменения индуктивности $L(t)$ – (б), модель спирального КМКГ – (в), модель плоскоспирального КМКГ – (г)

Коэффициент усиления тока МКГ $k_i = I_{\max}/I_0$ может достигать значений порядка 10^3 , т.е. при запитке током в несколько килоампер могут быть получены мегаамперные величины выходных токов и, соответственно, высокие значения магнитного поля. Таким образом, комплексированные МКГ по выходным характеристикам тока, массогабаритным параметрам и возможности практической реализации могут рассматриваться в качестве активных элементов для магнитной интроскопии. Следует отметить, что возникновение ударной волны при детонации ВВ в МКГ дает возможность проводить одновременно сейсмографические измерения, чем повысить информативность результатов.

Чтобы сделать вывод о возможности реализации метода АМИ, оценим величину напряженности магнитного поля, генерируемого источником, и рассчитаем пространственное распределение поля. Рассмотрим МКГ, нагруженный рамкой, по которой протекает импульс тока, мгновенное значение которого описывается функцией $i(t) = I_{\max} f(t)$. Рамку с характерным размером $2l$ разместим в центре сферической системы координат, как показано на рис. 2. Длительность импульса тока МКГ составляет величину порядка $T_{\text{им}} = 10 \div 100$ мкс, поэтому в области пространства, ограниченной расстоянием $r = cT_{\text{им}} = 3 \div 30$ км, магнитное поле, создаваемое током МКГ, можно считать квазистационарным. Теперь, используя представления [9], индукционную составляющую магнитного поля в произвольной точке на сфере радиуса r запишем в виде

$$H(r, t) = \frac{2li(t)}{4\pi r^2} \sin \theta. \quad (4)$$

Экран S на рис.2 обеспечивает подавление квадрупольной составляющей поля рамки, чем достигается повышение эффективности генерирования поля.

Известно, что экспериментально с помощью МКГ достигнуты величины импульсных токов I_{\max} , превышающие 10^8 А [10]. Как следует из (4), напряженность генерируемого магнитного поля $H = 1$ А/м при $\theta = \pi/2$ на расстоянии $R = 1$ км для рамки с характерным размером $l = 0,25$ м достигается при токе КМКГ $I_{\max} \cong 24$ МА, что представляет собой реализуемую величину. В табл.1 приведены результаты расчета поля на различных расстояниях от источника для тока 50 МА.

Таблица 1

Результаты расчета напряженности магнитного поля

r , км	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,5	2,0	3,0	5,0	10
H , А/м	50	12,5	5,56	3,1	2,0	0,89	0,5	0,22	0,08	0,02



Рис.3. Пространственное распределение магнитного поля

Показано, что на основе использования эффекта остаточной намагниченности горных пород, минералов и полезных ископаемых можно реализовать магниторазведку методом активной магнитной интроскопии. В качестве активного элемента предлагается применение магнитокумулятивных источников сверхбольших токов и сверхсильных магнитных полей. Рассмотрены модели комплексированных магнитокумулятивных генераторов. Показано, что анализ параметрического уравнения электрической цепи генератора позволяет получить аналитические решения для цепей I и II порядков при различных законах вывода индуктивности. Приведены результаты расчета магнитного поля, формируемого источником в пространстве.

Література

1. Хмелевской В.К. Краткий курс разведочной геофизики. – М. : Изд-во МГУ. – 1979. – 287с.
2. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. – М. : Мир. – 1972. – 391 с.
3. Столярчук А.В., Чумаков В.И. Принципы создания комплексированного ВМГ // 2-й Международный радиоэлектронный Форум "Прикладная радиоэлектроника. Состояние, перспективы развития" МРФ-2005. Сб. научн. трудов. Т. VI. – Харьков : АН ПРЭ. – ХНУРЭ. – 2005. – С.92 – 95.
4. Пат. України № 46997 МПК (2009) H02N 11/00 Комплексований вибухомагнітний генератор / В.І. Чумаков, О.В. Столярчук, Г.Ф. Коняхін, патентовласник Харк. нац. ун-т радіоелектроніки. – № u200908126, заявл. 20.11.2009, опубл. 11.01.2010., бюл. № 1.
5. Пат. України № 53875 МПК (2010) H02N 11/00 Біконічний комплексований вибухомагнітний генератор / В.І. Чумаков, О.В. Столярчук, Г.Ф. Коняхін, О.Ю. Звягінцев, патентовласник Харк. нац. ун-т радіоелектроніки, № u201003403, заявл. 24.03.10, опубл. 25.10.2010, бюл. № 20.
6. Пат. України № 74115 МПК (2012) H02N 11/00 Плоскоспіральний комплексований вибухомагнітний генератор / В.І. Чумаков, О.В. Столярчук, Г.Ф. Коняхін, патентовласник АВМС ім. П.С. Нахімова, № a201203959, заявл. 02.04.2012, опубл. 25.10.2012, бюл. № 20.
7. Chumakov V.I. Raising the Current Build-Up Rate in Explosive Magnetic Generators with Capacitive Loads // Telecommunication and Radioengineering. – 1998. – Vol.52. – N 8. – P. 26-31.
8. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. Пер. с нем. – М.: Наука: Гл. ред. физ.-мат. лит., 1971. – 576с.
9. Хармут Х.Ф. Несинусоидальные волны в радиолокации и радиосвязи: Пер. с англ. – М. : Радио и связь. – 1985. – 376 с.
10. Megagauss magnetic fields generation and pulse power application / M. Cowan, R.B. Spilman / Nova Science. – 1994. – 1119 p.
11. Чумаков В.И. Импульсные процессы и системы: Учебно-методическое пособие / Сост.: Чумаков В.И., Столярчук А.В. – Севастополь: АВМС им. П.С. Нахимов. – 2012. – 70 с.

References

1. Khmelevskoi V.K. Short course of exploring geophysics. – Moscow: Izd-vo MGU. – 1979. – 287 p. (Rus.)
2. Knoepfel H. Pulsed High Magnetic Fields. – Moscow: Mir. – 1972. – 391 p. (Rus.)
3. Stolarchuk A.V., Chumakov V.I. Designing of complexing EMG principles // 2-nd International Radioelectronics Forum "Applied Radioelectronics: State and perspectives of development" IRF-2005. Proceedings of Forum. Vol. VI. – Kharkov: ASARE. – KNURE. – 2005. – P.92 – 95. (Rus.)
4. Pat. of Ukraine № 46997 MPC (2009) H02N 11/00. Kompleksovanyi vybuhomagnitnyi generator / V.I. Chumakov, A.V. Stolarchuk, G.F. Koniahin, patentovlasnyk Khark. nats. un-t radioelektroniky. – № u200908126, zaiavl. 20.11.2009, opubl. 11.01.2010., bul. № 1. (Ukr.)
5. Pat. of Ukraine № 53875 MPC (2010) H02N 11/00 Bikonichnyi kompleksovanyi vybuhomagnitnyi generator / V.I. Chumakov, A.V. Stolarchuk, G.F. Koniahin, A.V. Zviagintsev, patentovlasnyk Khark. nats. un-t radioelektroniky. – № u201003403, zaiavl. 24.03.10, opubl. 25.10.2010., bul. № 20. (Ukr.)
6. Pat. of Ukraine № 74115 MPC (2012) H02N 11/00 Plaskospiralnyi kompleksovanyi vybuhomagnitnyi generator / V.I. Chumakov, A.V. Stolarchuk, G.F. Koniahin, patentovlasnyk Khark. nats. un-t radioelektroniky. – № a201203959, zaiavl. 02.04.2012, opubl. 25.10.2012., bul. № 20. (Ukr.)
7. Chumakov V.I. Raising the Current Build-Up Rate in Explosive Magnetic Generators with Capacitive Loads // Telecommunication and Radioengineering. – 1998. – Vol. 52. – N 8. – P. 26-31.
8. Kamke E. Handbook of ordinary differential equations. – Moscow : Nauka : Gl. Red. Fiz.-mat. Lit. – 1971. – 576 p.
9. Harmuth H.F. Nonsinusoidal Waves for Radar and Radio Communication. – Moscow: Radio i svyaz. – 1985. – 376 p. (Rus.)
10. Megagauss magnetic fields generation and pulse power application / M. Cowan, R.B. Spilman / Nova Science. – 1994. – 1119 p.
11. Chumakov V.I. Pulse processes and systems: textbook / Compilers: V.I. Chumakov, A.V. Stolarchuk. – Sevastopol: AVMSim. P.S. Nakhimov. – 2012. – 70 p. (Rus.)

Рецензія/Peer review : 19.7.2013 р.

Надрукована/Printed : 14.10.2013 р.