

УДК 621.396.677

## МОДУЛЯТОР НА БАЗЕ С-АНТЕННЫ

*И.В. Брякин*

Рассматривается вариант нового типа электродинамического модулятора (ЭМ) для систем возбуждения феррозондовых магнитометров. В качестве элемента “накачки” предлагается использовать излучающие С-антенны с ферритовым сердечником.

*Ключевые слова:* феррозонд; модулятор; электрический диполь; электрическое поле; магнитное поле; киральная среда; антенна.

## THE MODULATOR ON THE BASIS OF THE C-ANTENNA

*I.V. Bryakin*

The variant of new type of the electrodynamic modulator (EM) for excitation systems of ferrosond the magnetometr is proved. As a “pumping” element, it is offered to use radiating C- antenna with the ferrite core.

*Key words:* flux-gate; modulator; electric dipole; electric field; magnetic field; chirals medium; antenna.

Известно, что для разработчиков магнитометрической аппаратуры особый интерес представляют магнитомодуляционные элементы, являющиеся управляемыми ферромагнитными устройствами, действие которых основано на том, что одно из магнитных полей изменяет (модулирует) магнитное состояние ферромагнитного сердечника для другого поля [1, 2]. Одним из основных вопросов, с которым неизбежно сталкиваются разработчики подобных устройств, является необходимость обоснования принципа работы элемента накачки (источник магнитного поля возбуждения) и его конструктивного исполнения.

С целью повышения эффективности работы и улучшения технических характеристик феррозондовых магнитометров рассмотрим возможность применения нового класса элементов накачки (модуляторов), использующих в качестве своего базового элемента излучающую С-антенну.

В соответствии с первым уравнением Максвелла наличие тока смещения  $j_{см} = e_a dE/dt$  является одним из признаков системы, создающей электромагнитное излучение (ЭМИ), интенсивность которого характеризуется уровнем напряженности электрического поля  $\vec{E}$  в окружающей среде с абсолютной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_a$ . В этом случае наиболее наглядным примером “концентратора” силовых линий тока смещения  $j_{см}$  служит обычный конденсатор с сосредоточенной емкостью  $C$ , возбуждаемый с помощью длинной линии (рисунок 1).

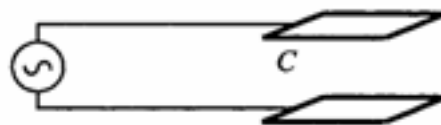


Рисунок 1 – Схема возбуждения С-антенны

Антенну на базе такого конденсатора можно считать антенной конденсаторного типа (С-антенна). При некоторой конструктивной трансформации исходной С-антенны путем разворачивания в пространстве обкладок на  $180^\circ$  (расстояние между внешними краями обкладок равно  $d$ ), получается одна из возможных ее модификаций (рисунок 2).

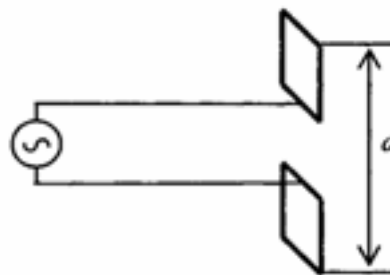


Рисунок 2 – Схема возбуждения модификации С-антенны

В этом случае наблюдается увеличение излучающей способности полученной системы, т. к. силовые линии вектора  $\vec{E}$  в схеме на рисунке 2 вы-

ходят далеко за пределы конденсатора, охватывая окружающее пространство.

Следующая возможная трансформация *C*-антенны заключается в переходе к системе с распределенной емкостью *C* между плечами симметричного вибратора, которые фактически являются вырожденными обкладками плоского конденсатора, то есть антенна конденсаторного типа заменяется известной дипольной антенной, конструктивно представленной на рисунке 3. Первой реализацией подобного излучателя является диполь Герца с емкостными нагрузками в виде шаров на концах плеч длиной *l*.

Традиционная теория и практика проектирования антенно-фидерных устройств предполагают увеличение электрических размеров антенны для повышения эффективности ее излучения. Поэтому диполь с размерами  $2l/\lambda \gg d/\lambda$ , где *l* длина волны, при анализе его излучающих свойств, следует рассматривать как разомкнутый и деформированный отрезок двухпроводной длинной линии (рисунок 3), обладающий резонансными свойствами.

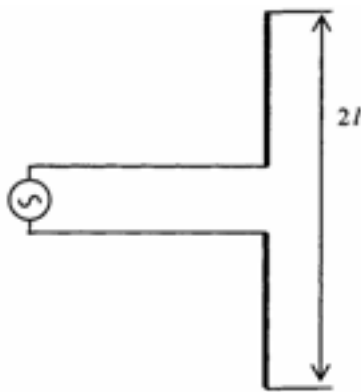


Рисунок 3 – Схема возбуждения дипольной антенны

Следует отметить, что интерес к резонансным системам электромагнитного излучения (ЭМИ) на сосредоточенных элементах (рисунки 1 и 2) сегодня

существенно возрос, в том числе благодаря обсуждению работ Н. Теслы [3].

Но при этом остается открытым вопрос о том, во-первых, как будут резонировать и излучать системы, показанные на рисунках 1 и 2, если в их состав ввести дополнительные реактивные элементы (рисунок 4), и, во-вторых, можно ли на основе рассматриваемых схем реализовать малогабаритную резонансную антенну, а если можно – то какой излучающей способностью будет обладать такая антенна. Исходя из особенностей таких резонансных систем ЭМИ, рассмотрим возможность их применения для задач модуляции магнитной проницаемости в ферритовых сердечниках.

По принципу действия к *C*-антенне близки *EH*-антенны, в которых разделены процессы формирования электрической *E*-составляющей и магнитной *H*-составляющей ЭМИ. Поэтому рассмотрим более подробно принцип функционирования *EH*-антенн.

Определенные изменения в цепи питания антенны позволяют трансформировать антенну Герца таким образом, чтобы она стала *EH*-антенной, в которой существующая задержка фазы в  $90^\circ$  между током и напряжением, приложенными от источника питания, обеспечивают необходимую синфазность создаваемых полей *E* и *H*. Данное свойство *EH*-антенны предопределяет ее способность отдавать мощность от передатчика непосредственно в ЭМИ. Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что путем добавления определенных компонентов к классической антенне Герца можно получить новый вид антенны с новыми свойствами, в которой поле *H* образуется токами смещения через емкость антенны.

*EH*-антенна обычно конструируется таким образом, чтобы существенно сужалась диаграмма ее направленности в плоскости поля *E*. Для этого применяют длинные полые цилиндры для формирования “дипольной” конфигурации *EH*-антенны (рисунок 5).

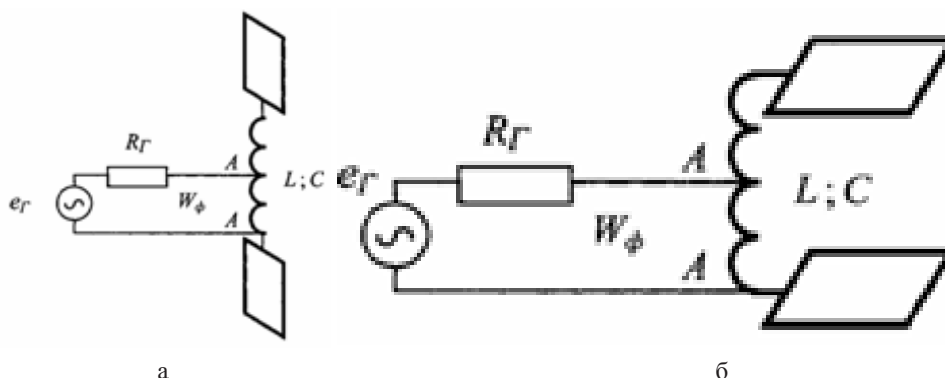


Рисунок 4 – Схемы возбуждения *C*-антенны

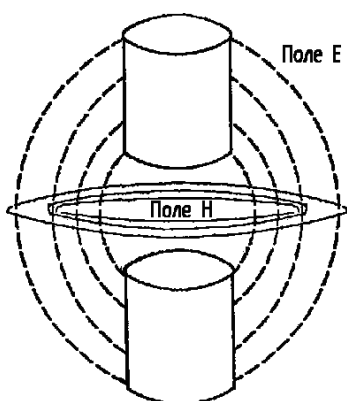


Рисунок 5 – “Дипольная” конфигурация EH-антенны

Поля EH-антенны ограничены физическим объемом конструкции. EH-антенна не является резонансной структурой, следовательно, ее частотные свойства полностью определяются внешней фазирующей цепью. Типичная фазирующая цепь имеет узкий частотный диапазон, поэтому EH-антенна фактически не излучает на гармониках. В соответствии с принципом взаимности антенн, EH-антенна может с успехом использоваться как для приема, так и для передачи.

Для адаптации EH-антенны к задачам, выполняемым элементом накачки (модулятором), произведем соответствующую конструктивную трансформацию этой антенны к виду (модификация C-антенна), представленному на рисунке 6.

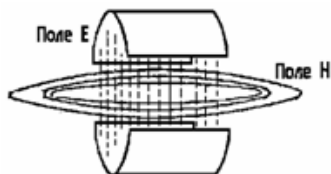


Рисунок 6 – Конфигурация C-антенны

ЭМ на базе подобной C-антенны состоит из двух тонких полуцилиндров, образующих между собой электрическую емкость. Если к этим элементам приложить ВЧ-напряжение, между ними возникнет электрическое поле  $E$ , и через емкость потечет ток, являющийся током смещения. Данный ток приводит к появлению магнитного поля  $H$ , окружающего электрическое поле  $E$ , и расположенное к нему ортогонально. Однако при протекании тока через конденсатор, фаза тока опережает фазу приложенного напряжения. В этом случае несовпадение во времени фаз электрического  $E$  и магнитного  $H$  полей не позволяет создать условия для возникновения электромагнитного излучения, т. е. выполнить все условия теоремы Пойнтинга.

Применение индуктивности, включенной последовательно с C-антенной, вызовет необходи-

мый сдвиг фаз (временную задержку) между током и напряжением. С помощью этой индуктивности можно подобрать такую временную задержку, которая обеспечит на рабочей частоте соответствующую синфазность электрического  $E$  и магнитного  $H$  полей. В этом случае будут выполнены все условия теоремы Пойнтинга и, следовательно, возникнет излучение электромагнитных волн (ЭМВ). При этом диаграмма направленности C-антенны в азимутальном направлении является круговой (ненаправленной), а электрическое и магнитное поля образуются и существуют одновременно, как и в EH-антенне.

Рассмотрим вариант C-антенны, содержащей в качестве рабочей среды ферромагнитное тело (цилиндрический стержень конечной длины) и те физические процессы, которые в своей совокупности могут дать новый физический эффект (рисунок 7).

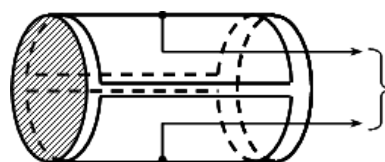


Рисунок 7 – Элемент возбуждения модулятора

Для данного варианта модулятора элемент возбуждения можно представить в виде электрического диполя с сосредоточенными параметрами (рисунок 7), образованного совокупностью двух равных по величине и обратных по знаку зарядов, меняющихся по гармоническому закону  $q = q_0 e^{-i\omega t}$ , и прямолинейного элементарного тока  $I = -\partial q / \partial t = i\omega q_0 e^{-i\omega t}$ , текущего между этими зарядами. Момент такого диполя при расстоянии между его полюсами  $dl$  равен  $I dl$ .

Рассмотрим ферромагнитный стержень в качестве композитной среды (материала), относящейся к классу так называемых киральных (chiral) сред, в которых имеют место более общие связи типа  $\vec{D}(\vec{E}, \vec{H}), \vec{B}(\vec{H}, \vec{E})$  [4].

Пусть в изотропном диэлектрическом наполнителе равномерно расположены упорядоченно (бианизотропная среда) (рисунок 8, а) или стохастически (биизотропная среда) (рисунок 9, б) медные спиральки с размерами, значительно меньшими рабочей длины волны.

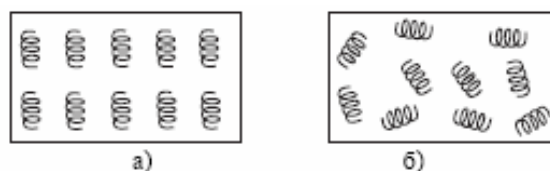


Рисунок 8 – Варианты интерпретации киральных сред

Механизм образования киральной поляризации под действием внешнего магнитного поля  $\vec{H}$  представлен на рисунке 10. Переменное магнитное поле  $\vec{H}$  (рисунок 9, а) индуцирует в соответствии законом электромагнитной индукции Фарадея э.д.с. в каждом из витков спиральки (рисунок 9, б). В результате вдоль длины спиральки образуется электрическое поле  $\vec{E}_i$ , которое эквивалентно полю электрического диполя (рисунок 9, в).

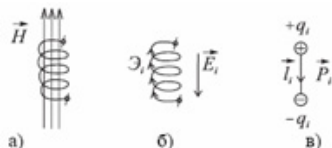


Рисунок 9 – Киральная поляризация под действием магнитного поля

Таким образом, за счет магнитного поля  $\vec{H}$  образуется элементарный диполь  $\vec{P}_i(\vec{H})$  (рисунок 9, в). В результате возникает киральная составляющая вектора поляризованности среды:

$$\vec{p}_k(\vec{H}) = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \left( \sum_{i \in \Delta V} \vec{P}_i(\vec{H}) / \Delta V \right).$$

Процесс возникновения киральной намагниченности представлен на рисунке 10.

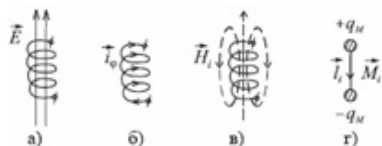


Рисунок 10 – Киральная намагниченность под действием электрического поля

За счет действия внешнего электрического поля  $\vec{E}$  (рисунок 10, а) в проводящей спиральке возникают токи  $i_j$  (рисунок 10, б), образующие вокруг спиральки магнитное поле  $\vec{H}_i$ , аналогичное полю магнитного диполя (рисунок 10, в). В результате возникает магнитный момент  $\vec{M}_i$  (рисунок 3, г). Следствием этого является образование киральной намагниченности

$$\vec{J}_k(\vec{E}) = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \left( \sum_{i \in \Delta V} \vec{M}_i(\vec{E}) / \Delta V \right).$$

Таким образом, в киральных средах материальные уравнения связей можно представить в виде

$$\vec{D}(\vec{E}, \vec{H}) = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}(\vec{E}) + \vec{P}_k(\vec{H}),$$

$$\vec{B}(\vec{H}, \vec{E}) = \mu_0 \vec{H} + \vec{J}(\vec{H}) + \vec{J}_k(\vec{E}),$$

или в качестве уравнений Друде–Борна–Федорова [5]:

$$\vec{D} = \epsilon_a \vec{E} + \beta \epsilon_a \text{rot} \vec{E},$$

$$\vec{B} = \mu_a \vec{H} + \beta \mu_a \text{rot} \vec{H},$$

где  $\beta$  – коэффициент киральности.

Анализ приведенных выше уравнений показывает, что существует возможность управления параметрами рассматриваемой трехмерной среды, условно содержащей ферритовые и проводящие элементы. Обобщая можно констатировать, что в рассматриваемой направляющей структуре (ферромагнитный стержень) возбуждаются поперечно-электрические (TE) волны, или волны магнитного типа (H) (рисунки 3, 10). Это волны, электрическое поле которых перпендикулярно к направлению распространения ( $E_z$ ), а магнитное поле имеет продольную составляющую ( $H_z$ ). Уравнение  $H_z$  в цилиндрической системе координат имеет вид [4]

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \times \frac{\partial H_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \times \frac{\partial^2 H_z}{\partial \phi^2} + g^2 H_z = 0,$$

где  $g^2 = k^2 + g'^2$ .

Решением данного уравнения является функция  $H_z = [C_n J_n(gr) + D_n N_n(gr)]' \cos(n\phi)$ , где  $C_n$  и  $D_n$  – постоянные интегрирования;  $J_n$  и  $N_n$  – цилиндрические функции 1-го рода (Бесселя) и 2-го рода (Неймана).

Продольная составляющая  $H_z$  возбуждаемой магнитной волны в направляющей структуре осуществляет фактически модуляцию ее магнитной проницаемости.

Таким образом, применение ферромагнитного сердечника одновременно в качестве элемента настройки режимов работы С-антенны и элемента системы накачки создает условие возбуждения магнитных потоков, которые в токопроводящих полуцилиндрах наряду с поступательным (линейным) движением электронов обеспечивают и присутствие их доминирующего вращательного движения. В этом случае поля  $E$  и  $H$ , созданные одновременно при помощи фазированной рабочей (киральной) среды и надлежащим образом пространственно расположенные в ней, обуславливают возникновение ЭМИ в соответствии с теоремой Пойнтинга на такой частоте, на которой реактивное сопротивление сосредоточенной индуктивности киральной среды корректирует фазу тока через конструктивную емкость С-антенны ЭМ. Эта частота приблизительно равна резонансной частоте контура, образованного внутренней сосредоточенной индуктивностью киральной среды и конструктивной емкостью ЭМ.

При настройке ЭМ в резонанс, в промежутке между полуцилиндрами возникают напряжения большой амплитуды, которые создают значительное поле  $E$  значительной напряженности, вызывающее между ними ток смещения, который в свою очередь создает поле  $H$  в ферритовом сердечнике в фазе с питающим полуцилиндром напряжением, а значит и с полем  $E$ . В этом случае можно конста-

тировать, что непосредственно в рабочей среде ЭМ создаются ЭМВ, которые в измерительных катушках феррозондового магнитометра наводят трансформаторную э.д.с., а в случае наличия постоянного магнитного поля формируют дополнительно модуляционную э.д.с. [5, 6].

В рассматриваемом варианте модифицированной *C*-антенны поля *E* и *H* фактически заключены в пределах физического объема ферромагнитной среды, а высокая эффективность их взаимодействия в пределах этого физического объема, где они сформированы одновременно, обеспечивает минимальные конструктивные размеры *C*-антенны и ее пространственную компактность. Предлагаемая конструкция модифицированной *C*-антенны наилучшим образом удовлетворяет необходимым условиям возбуждения ЭМИ, что и обеспечивает высокую эффективность работы ЭМ в целом при относительно небольших его размерах. Изменяя параметры фазирующей цепи каким-либо внутренним или внешним способом, можно расширить полосу частот, для которых выполняется необходимое фазовое соотношение.

При таком варианте конструктивного решения ЭМ относительно просто решаются две основные задачи обеспечения требуемого режима функционирования *C*-антенны: электрическая, состоящая в согласовании генератора с антенной, и электродинамическая, заключающаяся в “согласовании” антенны с рабочим пространством среды. ЭМ на базе *C*-антенны слабо подвержен внешним возмущениям, обладает исключительной помехоустойчивостью и имеет очень высокое отношение сигнал/шум в условиях промышленных и атмосферных помех. Применение данного ЭМ обеспечивает

практически максимальное преобразование полей *E* и *H* в ЭМИ.

Представленная теоретическая интерпретация электромагнитных процессов и приведенные результаты практических разработок дополняют теорию традиционных антенн, не вступая с ней в противоречие, обосновывают возможность создания нового класса магнитомодуляционных элементов и открывают определенные возможности для проектировщиков магнитометрической аппаратуры в плане создания различных вариантов феррозондов с улучшенными техническими характеристиками и расширенными функциональными возможностями.

#### Литература

1. Розенблат М.А. Бесконтактные магнитные устройства автоматики / М.А. Розенблат. М.: АН СССР, 1961. 180 с.
2. Максвелл Дж. К. Трактат об электричестве и магнетизме. Т. I / Дж. К. Максвелл. М.: Наука, 1989. 416 с.
3. Тесла Н. Лекции, статьи / Н. Тесла. М.: Tesla Print, 2003. 199 с.
4. Никольский В.В., Никольская Т.И. Электродинамика и распространение радиоволн / В.В. Никольский, Т.И. Никольская. М.: Наука, 1989. 544 с.
5. Жвирблис В.Е. Принципы симметрии и системности в химии / В.Е. Жвирблис. М.: МГУ, 1987. 87 с.
6. Брякин И.В. Градиентометрические сейсмоприемники / И.В. Брякин // Матер. межд. конф. “Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения” (УКИ-10). М., 2010. С. 212–221.