

УДК 621.396.6 : 621.391.827

А. В. ШВЕЦ – д. физ.-мат. н., с. н. с., Институт радиофизики и электроники

им. А. Я. Усикова НАН Украины, г. Харьков, lxndrshvts9@gmail.com

Т. Н. СЕРДЮК – к. т. н., доцент, Днепропетровский национальный университет
железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, serducheck-t@rambler.ru

А. Ю. ЩЕКOTOB – к. физ. -мат. н., с. н. с., Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта
РАН, г. Москва, Российская Федерация, oldresident@yandex.ru

Г. Г. БЕЛЯЕВ – к. ф.-м. н., с. н. с., Институт земного магнетизма, ионосферы и
распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН, г. Москва, Российская
Федерация, belyaev@izmiran.ru

А. П. КРИВОНОС – аспирант, Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова
НАН Украины, г. Харьков, lesha5300@yandex.ua

**КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ И РЕГИСТРАЦИИ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В ДИАПАЗОНЕ СЧ – ОНЧ**

Статью представили д. ф.-м. н., проф. В. И. Гаврилюк, д. ф.-м. н., с. н. с. В. К. Иванов

Введение

На первом этапе развития в понятие электромагнитной совместимости (ЭМС) вкладывалось обеспечение совместного и одновременного функционирования средств радиосвязи. Эти задачи решались путем распределения частот, выполнения определенных требований к передатчикам, радиоприемникам, источникам электромагнитных помех [1]. Сегодня оно включает в себя, наряду с классическим определением защиты от радиопомех, и вопросы устойчивости систем к помехам, то есть учет различных параметров электромагнитных помех на электронные устройства.

На железнодорожном транспорте, как и в других сферах хозяйственной деятельности человека, наметилась тенденция к увеличению числа различных электронных устройств и оборудования (квазиэлектронные и электронные АТС, электронные телефонные и телеграфные станции коммутации, микропроцессорные устройства диспетчерской централизации и автоблокировки, например, КЭБ-1 и КЭБ-2, разработанные в России и др.).

Для обеспечения надежного и бесперебойного функционирования устройств сиг-

нализации, централизации и блокировки (СЦБ) и связи необходимо обеспечить дистанционный контроль и диагностику работы устройств автоматики, телемеханики и связи на станциях и перегонах с помощью различных датчиков и персональных ЭВМ, объединенных в аппаратно-программные комплексы.

Источниками помех, которые следует принимать во внимание при рассмотрении данного вопроса, являются генераторы помех (контактная сеть с постоянным напряжением 3 кВ или переменным 25 кВ, высоковольтные линии электропередач (ЛЭП), линии основного и резервного питания устройств автоблокировки ВЛ СЦБ и ВЛ ПЭ напряжением 6, 10 кВ и два провода – рельс (ДПР)) и процессы их суммирования от нескольких источников (в том, числе резонанса в контактной сети).

Устройства, обеспечивающие безопасность движения поездов и соединенные с рельсовыми цепями, подвергаются постоянному воздействию помех со стороны систем тягового и внешнего электроснабжения. При этом помехи, возникающие в контактной сети, могут появиться на входе приемников устройств СЦБ и связи гальваническим путем или индуктивно.

Проведение измерений в высоковольтных сетях связано с рядом трудностей, касающихся как вопросов безопасности обслуживающего персонала при проведении измерений, так и организации рабочего места. Перерывы в электроснабжении или выделение «окон» в графике движения поездов и возможное исчезновение при этом источника помех, вызывает необходимость разработки бесконтактных методов и аппаратуры определения уровней и спектрального состава электрического и магнитного полей. При этом диапазон частот должен охватывать спектр излучения основных и высших гармоник силовых и сигнальных сетей, а также импульсных помех, возникающих при коммутации силовых цепей.

Таким образом, разработка системы исследования импульсных и монохроматических помех, создаваемых электрическими и магнитными полями систем внешнего и тягового электроснабжения, высоковольтными линиями питания автоблокировки является актуальной задачей.

Для решения поставленной задачи и научного обоснования выбора метода и средства бесконтактного исследования уровней и спектра электромагнитных помех необходимо оптимизировать метод расчета магнитометров, который позволит согласовать динамический диапазон шума на выходе датчика и на входе антенного усилителя, разработать измерительный комплекс с использованием ПЭВМ для возможности архивирования данных и оперативного анализа изменения электрического и магнитного полей, оценки их влияния на смежные устройства СЦБ и связи.

Расчет параметров магнитной антенны (Воздушная рамка)

В настоящее время известны различные методы и средства измерения уровней и спектра низкочастотных электромагнитных помех, основанных на использовании датчиков Холла, индукционных датчиков, SQUID магнетометров и т.д. Индукцион-

ные магнитометры широко используются для измерения переменных магнитных полей в различных областях науки и техники. Основные преимущества индукционных магнитометров состоят в высокой чувствительности, которая уступает только SQUID магнетометрам, и высокой линейности в широком диапазоне частот при низкой стоимости изготовления [2].

В зависимости от области применения к основным параметрам магнитометра предъявляются следующие требования: минимальный уровень измеряемой магнитной индукции, частотный диапазон и динамический диапазон измеряемого поля. Требуемые параметры обеспечиваются выбором геометрической конфигурации индукционного датчика, параметрами обмотки и электронной частью магнитометра. В работах [2, 3] отмечается, что чувствительность индукционного датчика определяется площадью и массой обмотки. Данное свойство существенно облегчает процедуру конструирования датчика с заданными требованиями к чувствительности, которая определяется только этими двумя параметрами. Однако важной проблемой недостаточно освещенной в литературе, остается согласование уровня сигнала на выходе датчика с входной цепью усилителя для достижения максимальной чувствительности, обеспечиваемой датчиком. В ряде случаев для согласования используется повышающий трансформатор [3], что усложняет и утяжеляет конструкцию и вносит дополнительные помехи и частотные искажения.

Для обеспечения необходимой чувствительности для приема атмосфериков в диапазоне частот отсечки волновода Земля-ионосфера выполним расчет параметров воздушной круговой рамочной антенны.

Основным источником шума в магнитной антенне является тепловой шум провода рамки, средний квадрат напряжения которого не зависит от частоты и определяется по формуле Найквиста:

$$\langle e^2 \rangle = 4kTR_a \Delta f, \quad (1)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана, T – температура, К, R_a – сопротивление обмотки рамки, Ом, Δf – полоса частот, в которой выполняются измерения. Для оценки среднеквадратичного значения шумового напряжения в полосе 1 Гц при комнатной температуре $T = 293$ К удобна следующая формула:

$$\bar{e} = \langle e^2 \rangle \cong 4\sqrt{R_a},$$

где напряжение измеряется в нВ/Гц^{1/2}, а сопротивление в кОм.

Согласно закону Фарадея, амплитуда напряжения на концах обмотки на частоте ω определяется индукцией магнитного поля с амплитудой B , площадью рамки A и количеством витков обмотки N :

$$v = j\omega ANB. \quad (2)$$

В формуле (2) предполагается, что магнитное поле направлено перпендикулярно плоскости рамки. Отношение сигнал/шум на выходе антенны определяется следующим образом:

$$SNR_{loop} = \frac{|v|}{\sqrt{\langle e^2 \rangle}} = \frac{\omega ANB}{\sqrt{4kTR_a\Delta f}}. \quad (3)$$

Выразим сопротивление провода через его удельное сопротивление ρ , сечение провода s и периметр рамки $c_1\sqrt{A}$:

$$R_a = \rho N c_1 \sqrt{A} / s = \rho N^2 c_1 \sqrt{A} / S, \quad (4)$$

где $S = sN$ – полное сечение обмотки. Константа c_1 определяется отношением периметра к корню квадратному из площади рамки и определяется ее формой. В частности, для круговой рамки диаметром D , $c_1 = 2\sqrt{\pi} = 3,5449$. Тогда из (3) и (4) получим следующее выражение для отношения сигнал/шум на частоте f :

$$SNR_{loop} = \frac{\pi f A^{3/4} S^{1/2} B}{\sqrt{kT\rho c_1 \Delta f}}. \quad (5)$$

Отсюда следует, что отношение сигнал/шум воздушной рамки определяется только двумя ее конструктивными параметрами: площадью A и полным сечением обмотки S . Данное замечательное свойство

позволяет выбором количества витков в обмотке, при сохранении ее полного сечения и площади витка, согласовать выход датчика и вход антенного усилителя по уровню шумов.

На входе усилителя квадраты напряжений шума усилителя и собственного шума датчика суммируются, тогда отношение сигнал/шум, приведенное к входу усилителя имеет следующий вид:

$$SNR_{amp} = \frac{SNR_{loop}}{r},$$

$$r = \sqrt{1 + \frac{E_{amp}^2 \Delta f}{\langle e^2 \rangle}}, \quad (6)$$

где $\langle e^2 \rangle$ – резистивный шум обмотки в заданной полосе частот, B , E_{amp} – спектральная плотность напряжения входного шума усилителя, В/Гц^{1/2}. Выразим собственный шум обмотки $\langle e^2 \rangle$ с N витками провода сечения s через тепловой шум одного витка $\langle e_1^2 \rangle$ из провода сечения S при условии $S = sN$:

$$\langle e^2 \rangle = N^2 \langle e_1^2 \rangle, \quad (7)$$

где

$$\langle e_1^2 \rangle = 4kT\rho c_1 \sqrt{A} \Delta f / S. \quad (8)$$

Тогда выражение для r в (6) принимает следующий вид:

$$r = \sqrt{1 + \frac{E_{amp}^2 \Delta f}{N^2 \langle e_1^2 \rangle}}. \quad (9)$$

Таким образом, выбором количества витков N при сохранении полного сечения провода S можно поднять отношение сигнал/шум на входе усилителя до величины, близкой к величине отношения сигнал/шум, обеспечиваемого рамкой.

Определим пороговую магнитную индукцию B_{th} , как величину, которая обеспечивает значение $SNR_{amp} = 1$. Тогда алгоритм определения конструктивных параметров рамочной антенны сводится к следующему.

1. Задаем требуемую пороговую магнитную индукцию B_{th} на частоте f , полосу частот Δf , площадь рамки A , и спектральную плотность шумового напряжения входного каскада усилителя E_{amp} .
2. Выбираем значение $r = \sqrt{2}$, которое реализуется при условии равенства среднеквадратичных значений собственного шума обмотки и входного шума усилителя, и определяем необходимое полное сечение обмотки из формул (5), (6), обеспечивающее отношение сигнал/шум $SNR_{amp} = SNR_{loop} / r = 1$ на входе усилителя:

$$S = \frac{r^2 k T \rho c_1 \Delta f}{\pi^2 f^2 A^{3/2} B_{th}^2} = \frac{2 k T \rho c_1 \Delta f}{\pi^2 f^2 A^{3/2} B_{th}^2}. \quad (10)$$

3. Определяем $\langle e_1^2 \rangle$ из (8), и из (9) при условии $r = \sqrt{2}$ получаем:

- количество витков:

$$N = \frac{E_{amp} \sqrt{\Delta f}}{\sqrt{\langle e_1^2 \rangle} (r^2 - 1)} = \frac{E_{amp} \sqrt{\Delta f}}{\sqrt{\langle e_1^2 \rangle}}, \quad (11)$$

- сечение провода обмотки:

$$s = S / N. \quad (12)$$

4. Выбирая стандартный диаметр обмоточного провода, ближайший к расчетному $d = \sqrt{4s / \pi}$, из формул (8) – (10) после пересчета S и r , при фиксированных A и N , получаем скорректированное значение B_{th} :

$$B_{th}' = \frac{r \sqrt{k T \rho c_1 \Delta f}}{\pi f A^{3/4} S^{1/2}}. \quad (13)$$

Полоса пропускания магнитной антенны и антенного усилителя

Следующим шагом рассмотрим требования к параметрам индукционного датчика для обеспечения равномерной амплитудно-частотной передаточной характеристики при широкополосных измерениях магнитного поля.

Индукцируемое напряжение в обмотке магнитной антенны пропорционально ча-

стоте падающего поля (2). Для получения плоской передаточной характеристики приемника по полю в качестве антенного усилителя магнитной антенны может быть использован усилитель тока, как было, например, предложено в работе [7]. Схема антенного усилителя для магнитной антенны, преобразователя ток – напряжение, представлена на рис. 2.

Коэффициент преобразования магнитной индукции системы рамка – антенный усилитель равен:

$$G(f) = - \frac{j 2 \pi f A N}{j 2 \pi f L_a + R_a} R_{fb} = - \frac{A N R_{fb}}{L_a \left[1 - j \frac{f_a}{f} \right]} \underset{f \gg f_a}{\approx} - \frac{A N R_{fb}}{L_a}, \quad (14)$$

где $f_a = \frac{R_a}{2 \pi L_a}$ – частота среза катушки индуктивности по уровню -3дБ.

Для оценки индуктивности рамки воспользуемся формулой, приведенной в работе [3]:

$$L_a = 2.00 \times 10^{-7} N^2 c_1 \sqrt{A} \times \left(\ln \frac{c_1 \sqrt{A}}{d \sqrt{N}} - c_2 \right), \quad (15)$$

где $c_1 = 3,545$, $c_2 = 0,815$ – константы для круговой рамки. Для других форм рамок значения этих констант приведены в табл. 1 [3].

Таблица 1

Константы для различных форм
рамочной магнитной антенны

Форма рамки	$c1$	$c2$
Окружность	3,545	0,815
Правильный восьми- угольник	3,641	0,925
Правильный шести- угольник	3,722	1,000
Квадрат	4,000	1,217
Равносторонний тре- угольник	4,559	1,561
Прямоугольный равно- бедренный треугольник	4,828	1,696

Преобразуем (15) к следующему виду:

$$L_a = 2.00 \times 10^{-7} N^2 c_1 \sqrt{A} \times \left(\ln \frac{c_1 \sqrt{\pi A}}{2\sqrt{S}} - c_2 \right), \quad (16)$$

Тогда из (4) и (16) получим следующее выражение для частоты среза катушки индуктивности:

$$f_a = \frac{R_a}{2\pi L_a} = \frac{10^7 \rho}{4\pi S \left(\ln \frac{c_1 \sqrt{\pi A}}{2\sqrt{S}} - c_2 \right)}, \quad (17)$$

Интересно отметить, что для выбранной формы рамки, как и в случае с отношением сигнал/шум (5), частота среза определяется только двумя конструктивными параметрами: площадью антенны A и полным сечением обмотки S .

Расчет параметров емкостной электрической антенны и антенного усилителя

Определение соотношения магнитного и электрического полей, излучаемых источником помех, важно при решении задач ЭМС. Поэтому рассмотрим расчет основных параметров датчика электрического поля. В качестве датчика вертикального электрического поля в диапазоне СНЧ-СДВ, как правило, используется вертикальный металлический штырь или изолированная сосредоточенная емкость (металлический цилиндр, шар), установленная на вертикальной мачте. Амплитуда сигнала на выходе датчика определяется следующим образом:

$$e = E_z h_{\text{eff}}, \quad (18)$$

где E_z – вертикальная компонента напряженности электрического поля, В/м, h_{eff} – эффективная высота антенны, м, которая приблизительно пропорциональна геометрической высоте стержня или мачты.

Для расчета параметров датчика вертикального электрического поля используем следующую эквивалентную схему цепи антенна – вход антенного усилителя с источ-

никами шумового тока и напряжения представлена на рис. 1.

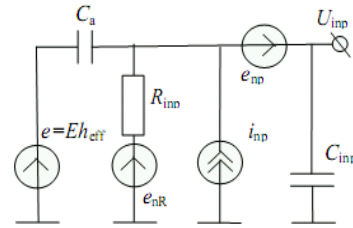


Рис. 1. Эквивалентная схема электрической антенны и входного усилителя с источниками шума

На схеме использованы следующие обозначения: h_{eff} – эффективная высота антенны; e_{nR} – напряжение теплового шума шунтирующего сопротивления; i_{np} – шумовой ток входного усилителя; e_{np} – шумовое напряжение входного усилителя; C_a – собственная емкость датчика; C_{inp} – сумма входной емкости усилителя и шунтирующей емкости; R_{inp} – шунтирующее сопротивление (сопротивление утечки); U_{inp} – напряжение на входе усилителя.

Передаточная функция схемы записывается следующим образом:

$$K(f) = \frac{U_{\text{inp}}}{e} = \frac{j2\pi f C_a R_{\text{inp}}}{1 + j2\pi f R_{\text{inp}} (C_a + C_{\text{inp}})}. \quad (19)$$

Частота среза схемы равна:

$$f_a = \frac{1}{2\pi R_{\text{inp}} (C_a + C_{\text{inp}})}. \quad (20)$$

Выше частоты среза $f^2 \gg f_a^2$ схема работает, как емкостной делитель, с коэффициентом передачи:

$$K(f) = \frac{C_a}{C_a + C_{\text{inp}}}. \quad (21)$$

Ниже частоты среза $f^2 \ll f_a^2$ имеем дифференциальную цепь с коэффициентом передачи:

$$K(f) = j2\pi f C_a R_{\text{inp}}. \quad (22)$$

Основными источниками шума во входных цепях являются:

- тепловой шум шунтирующего сопротивления;
- шумовой ток входного усилителя;

- шумовое напряжение входного усилителя.

Данные источники показаны на эквивалентной схеме входной цепи датчика электрического поля на рис.1.

Полная спектральная плотность шума на входе усилителя равна:

$$\bar{e}_{nt} = \sqrt{\bar{e}_{np}^2 + \frac{R_{inp}^2 (\bar{i}_{np}^2 + 4kT / R_{inp})}{1 + (2\pi f)^2 R_{inp}^2 C_1^2}}, \quad (23)$$

где $C_1 = C_a + C_{inp}$, k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура.

В рабочем диапазоне частот $f^2 \gg f_a^2$ выражение упрощается:

$$\bar{e}_{nt} = \sqrt{\bar{e}_{np}^2 + \frac{1}{(2\pi f)^2 C_1^2} \left(\bar{i}_{np}^2 + \frac{4kT}{R_{inp}} \right)}. \quad (24)$$

Из полученных формул, в частности, следует неожиданный результат – вклад теплового шума шунтирующего сопротивления уменьшается в полосе пропускания при увеличении его значения.

Расчет параметров приемника

Расчет параметров датчиков поля в данной статье проведен на примере применения для измерений импульсных атмосферных помех, порождаемых разрядами молний, – атмосфериков. Пороговая амплитуда поля для записи атмосфериков выбирается опытным путем, исходя из обеспечения достаточно высокого отношения сигнал/шум. В работе [4] было показано, что при пороговой амплитуде сигнала в полосе частот 1,6 – 1,9 кГц равной $0,3 \cdot 10^{-12}$ Тл обеспечивается превышение сигнала над шумами в 30 – 100 раз, что позволяет оценивать параметры атмосферика с точностью 1 – 3 %.

Параметры индукционного датчика

Определим пороговую амплитуду магнитного поля $B_{th} = 0,7 \cdot 10^{-12}$ Тл в полосе 24 кГц. Выбирая круглую рамку диаметром 0,53 м, намотанную медным проводом

(удельное сопротивление меди при 20 градусах Цельсия $\rho = 1,75 \cdot 10^{-8}$ Ом·м), нижнюю оценку частоты отсечки для первой моды 1600 Гц и усилитель с входным шумом $E_{amp} = 3$ нВ/Гц^{1/2} (например, ОР37, Analog Devices) в соответствии с алгоритмом, описанным выше, найдем требуемые параметры обмотки датчика магнитного поля:

- количество витков $N = 450$;
- диаметр провода $d = 0,16$ мм;

При этом расчетные электрические параметры датчика оказываются следующими:

- сопротивление провода $R_a = 663$ Ом;
- индуктивность $L_a = 0,363$ Гн;
- нижняя частота среза по уровню - 3дБ $f_a = 291$ Гц.

Коэффициент усиления и динамический диапазон канала магнитной компоненты

В качестве аналого-цифрового преобразователя (АЦП) используется четырехканальная шестнадцатиразрядная звуковая карта МАУА44, которая имеет диапазон амплитуды входных сигналов 1 В. Таким образом, диапазон измеряемых напряжений на входе АЦП $2^{-15}(30\text{мкВ}) - 1\text{В}$.

Выбирая амплитуду сигнала, соответствующего пороговому значению магнитной индукции $B_{th} = 0,7$ пТл, в 4 раза больше минимального измеряемого напряжения в АЦП $U_{th} = 120\text{мкВ}$, получим требуемый коэффициент преобразования приемника: $KG = U_{th} / B_{th} = 1,7 \cdot 10^8$ В/Тл = 0,17 В/нТл, где G – коэффициент преобразования антенны и первого каскада антенного усилителя из формулы (14), K – дополнительный коэффициент усиления, реализованного в последующих каскадах приемника.

Таким образом, диапазон измеряемых амплитуд магнитной индукции, приведенных к входу АЦП, составляет $0,18 \cdot 10^{-12}$ Тл – $6 \cdot 10^{-9}$ Тл, а с учетом порогового значения магнитной индукции датчика: $0,7 \cdot 10^{-12}$ Тл... $6 \cdot 10^{-9}$ Тл.

Параметры компонентов антенного и основного усилителей, обеспечивающие заданный коэффициент преобразования, приведены на схеме, рис. 2, 3 соответственно.

Дополнительное усиление обеспечивается вторым каскадом антенного усилителя и основным усилителем. Для уменьшения помех от электрических наводок в кабеле, соединяющем антенный усилитель и систему сбора данных, применен балансный выходной усилитель.

Емкости в схеме используются для обеспечения спада частотной характеристики выше 20 кГц для подавления высокочастотных сигналов радиовещательных станций и предотвращения их детектирования во входных цепях усилителя. По экранированному кабелю по витым парам передаются сигналы, а также питание $\pm 12\text{В}$.

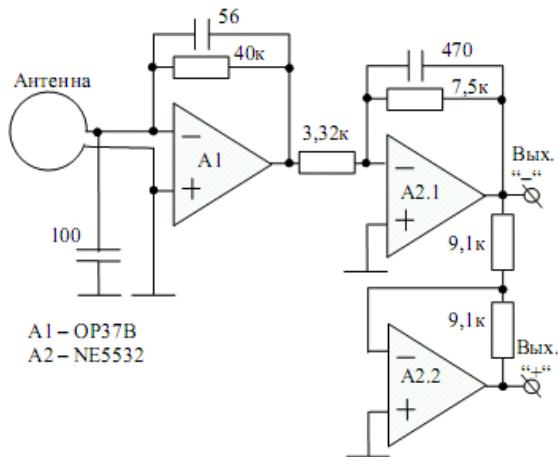


Рис.2. Принципиальная схема антенного усилителя магнитной антенны

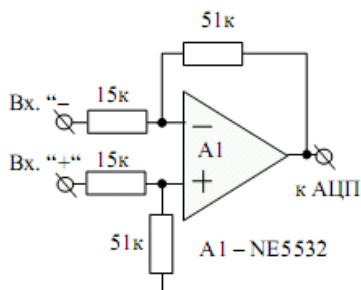


Рис.3. Принципиальная схема основного усилителя каналов магнитной и электрической компонент

Параметры канала электрической компоненты

Исходя из порогового значения магнитной индукции, соответствующая напряженность электрического поля может быть оценена как $E_{th} = B_{th} \cdot c$ [В/м] = $1,4 \cdot 10^{-12} \cdot 3 \cdot 10^8 = 0,42$ мВ/м, c – скорость света в вакууме. Таким образом, при эффективной высоте электрической антенны $h_{eff} = 1$ м, коэффициент усиления приемника 1 обеспечивает динамический диапазон сигналов атмосфериков на входе АЦП, принятый для магнитных компонент поля.

В качестве входного каскада используем операционный усилитель общего применения с полевыми транзисторами на входе К140УД8 со следующими шумовыми параметрами: $e_{np} = 80$ нВ/Гц^{1/2}, $i_{np} = 0,5 \cdot 10^{-5}$ нА/Гц^{1/2}. Тогда, на частоте 1600 Гц, при $C_1 = 100$ пФ, $R_{inp} = 10\text{М}$, $T = 293\text{К}$, из формулы (18) получим напряжение шума $e_{nt} = 12,5$ мкВ в полосе частот 20 кГц. Данный уровень шума обеспечивает отношение сигнал/шум = 33 по отношению к рассчитанному выше значению пороговой амплитуды $E_{th} = 420$ мкВ сигнала в канале электрической антенны при действующей высоте антенны 1 м.

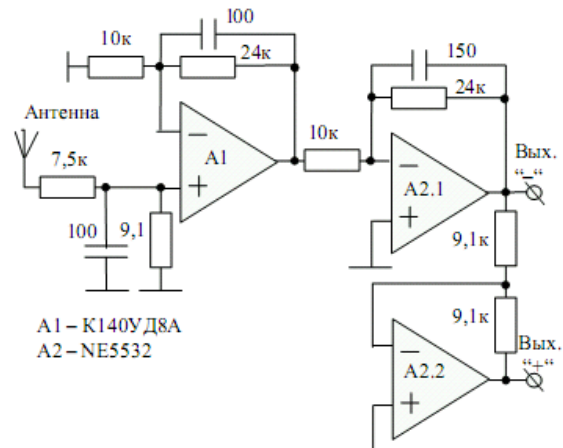


Рис.4. Принципиальная схема антенного усилителя электрической антенны

Принципиальная схема антенного усилителя для канала приема электрической компоненты, обеспечивающего частотную характеристику по полю идентичную магнитному каналу приведена на рис. 4. Для согласования парафазного сигнала с выхода

антенного усилителя и кабеля с входом АЦП используется основной усилитель идентичный каналу магнитной компоненты.

Калибровка магнитной антенны с помощью излучателя – воздушной рамки

Для абсолютной калибровки по полю используется калибровочная рамка, размещенная коаксиально приемной рамке. Напряжение, наводимое однородным полем B , перпендикулярным плоскости рамки площадью A_2 , имеющей N_2 витков:

$$v = j\omega A_2 N_2 B. \quad (25)$$

В случае использования калибровочной рамки, размещенной на малом расстоянии z от приемной рамки неоднородность поля можно учесть, вычисляя их взаимный импеданс, имеющий только индуктивную составляющую [5]:

$$v = Ij\omega L_m N_1 N_2, \quad (26)$$

$$L_m = \frac{2\mu_0}{k} (r_1 r_2)^{\frac{1}{2}} k^3 \left[\frac{2-k^2}{2} K(k^2) - E(k^2) \right] = \\ = \frac{\pi\mu_0}{16} (r_1 r_2)^{\frac{1}{2}} k^3 \left[1 + \frac{3}{4} k^2 + \frac{75}{128} k^4 + \dots \right], \quad (27)$$

где L_m – взаимная индуктивность двух круговых витков, $K(k^2)$ и $E(k^2)$ – полные эллиптические интегралы первого и второго рода

соответственно, $k^2 = \frac{4r_1 r_2}{(r_1 + r_2)^2 + z^2}$, N_1 и N_2 ,

r_1 и r_2 – количество витков и радиус излучающей и приемной рамки соответственно.

Приравнивая правые части (25) и (26), можно получить эффективную величину поля,

$$B = \frac{IL_m N_1}{A_2}. \quad (28)$$

Приближенное выражение в формуле (27) с учетом первых трех членов разложения с точностью лучше 1% может использоваться при значениях параметра $k \leq 0,52$.

Схема абсолютной калибровки магнитной круговой рамки представлена рис. 5.

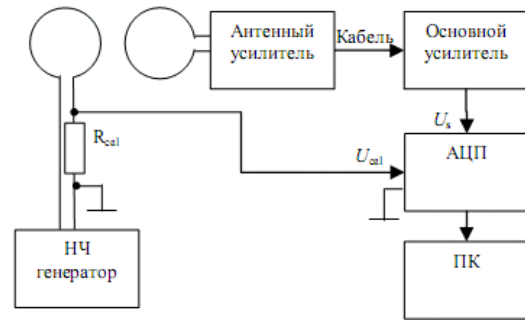


Рис.5. Схема абсолютной калибровки канала магнитной компоненты

В качестве излучателя использовалась круговая рамка диаметром 55 см, содержащая 9 витков медного провода диаметром 1,2 мм. Напряжение с калибровочного сопротивления $R_{cal} = 8,8$ Ом пропорционально току в излучающей рамке: $I_{cal} = U_{cal}/R_{cal}$, следовательно, с учетом (28) можно записать следующее выражение для коэффициента передачи канала магнитной компоненты по полю:

$$G_B(f) = \frac{U_s}{B_{cal}} = \frac{U_s R_{cal} A_2}{U_{cal} L_m N_1} = G_U(f) K_{cal}, \quad (29)$$

$$K_{cal} = \frac{R_{cal} A_2}{L_m N_1}$$

где K_{cal} – постоянный коэффициент, определяемый параметрами системы калибровки и приемной антенны, $G_U(f)$ – измеряемая передаточная функция, определяемая отношением напряжений сигналов на входах АЦП.

Результат измерения амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик канала магнитного датчика приведен на рис.6 а, б соответственно. Черная линия на графиках – расчет, голубая линия – измерения. В рабочем диапазоне частот расхождение с расчетом по амплитуде составило не более 3%, расхождение по фазе – не более 3 градусов. Выбросы на измеренных кривых вызваны помехами от силовой сети.

При выполнении калибровки расстояние между антеннами было равным $z = 1,88$ м, следовательно, при выбранных параметрах калибровочной системы и приемной рамки коэффициент для пересчета амплитуды передаточной характеристики, представленной на рис. 6 а, $K_{cal} = 7$ нТл/В.

Кроме передаточной функции и абсолютной калибровки канала магнитной компоненты поля, при исследованиях сигналов помех важной является такая характеристика, как диаграмма направленности магнитного датчика, использование которой позволяет определять направление на источник помехи. Результат измерения диаграмм направленности двух магнитных датчиков, приведенный на рис. 7, показывает хорошее совпадение с теоретической зависимостью, описываемой кардиоидой.

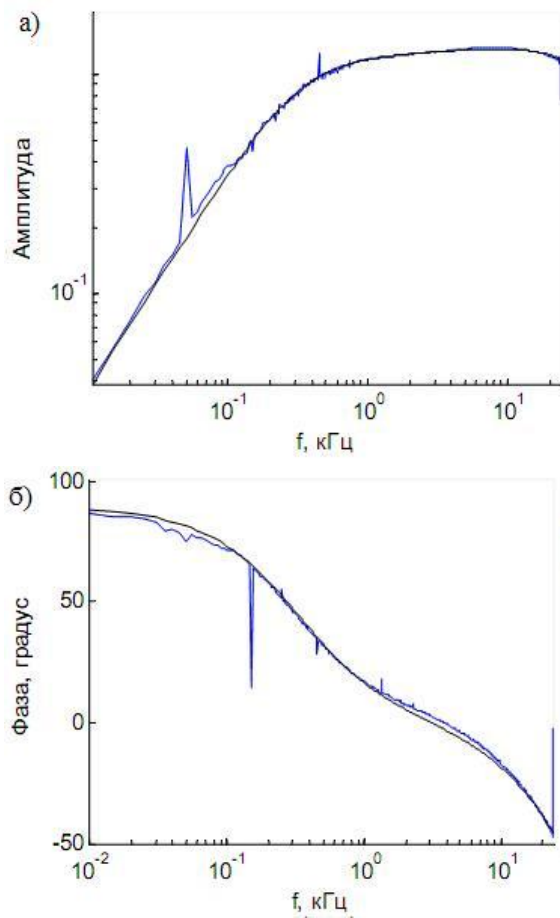


Рис. 6. Расчетная и измеренная амплитудно- (а) и фазочастотные (б) характеристики канала магнитной компоненты

Аппаратура и программное обеспечение для измерений и сбора данных

Приемно-регистрирующий комплекс для регистрации импульсных сигналов естественного и искусственного происхождения включает датчики трех компонент

электромагнитного поля, аналоговую часть, аналого-цифровой преобразователь и программное обеспечение для предварительной обработки и записи сигналов.

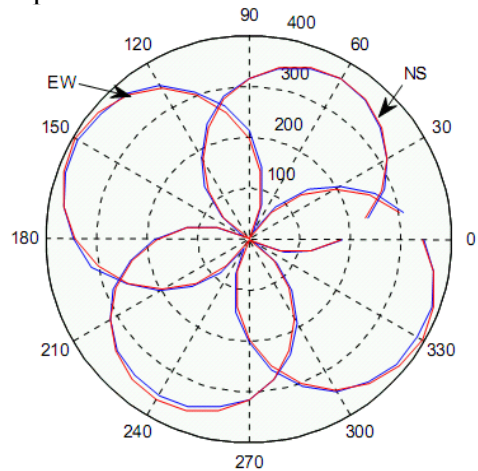


Рис. 7. Диаграммы направленности магнитных рамок, измеренные на частоте 10 кГц

В качестве датчиков используются две воздушные рамочные магнитные антенны для приема двух горизонтальных взаимно-ортогональных компонент магнитного поля и электрическая антенна для приема вертикальной компоненты электрического поля. Аналоговая часть включает антенные усилители для каждой из антенн, а также блок основных усилителей, предназначенных для согласования сигналов с выходов антенных усилителей с входами аналого-цифрового преобразователя. Конструктивные и электрические параметры приемного устройства обоснованы для регистрации атмосферных помех и описаны в предыдущих частях данной статьи. В качестве аналого-цифрового преобразователя используется внешняя четырехканальная звуковая карта MAYA44 USB, работающая с частотой дискретизации 48 кГц, которая имеет встроенный цифровой фильтр нижних частот, предназначенный для устранения эффекта наложения частот при оцифровке сигналов. Питание и передача данных звуковой карты осуществляется через USB порт компьютера. Питание всей аналоговой части приемника осуществляется двухполярным напряжением $\pm 12\text{В}$ с помощью преобразователя DC-DC P10CU-0512ZLF, подключенного к порту USB компьютера.

Программное обеспечение для сбора данных построено на основе пакета MATLAB с использованием драйвера ASIO и библиотеки Playtec [http://www.playtec.co.uk/], обеспечивающих работу многоканальных звуковых карт в среде операционной системы Windows.

Алгоритм работы программы следующий. Временные реализации трех компонент, поступают с АЦП в непрерывном режиме. В каждый момент времени в памяти хранятся три буфера длительностью 200 мс. В один буфер происходит запись. Второй, текущий, буфер анализируется с целью обнаружения импульса по превышению сигналом заданного порогового значения. Третий буфер используется для сохранения начальной части и предыстории импульсного сигнала в случае, когда его длительность не умещается полностью в текущий буфер. В памяти также хранится предыдущий буфер. Сигналы в текущем буфере анализируются и, при превышении пороговой амплитуды, импульс с предысторией длительностью 2,56 мс записывается в файл данных. В случае, когда начало импульса с учетом предыстории приходится на момент перед началом текущего буфера, используется предыдущий буфер, который хранится в памяти. Каждый принятый атмосферик, три компоненты, в виде последовательностей 16-тиразрядных двоичных чисел записывается в файл данных, который накапливается в течение одного часа. Имя файла соответствует времени начала записи и формируется в следующем формате: ггггммддчч.dat. В заголовке файла содержится информация о координатах пункта наблюдения, частоте дискретизации, количестве каналов, идентификаторе формата записи данных. Каждая запись в файле сопровождается пакетом информации, содержащим абсолютное время начала записи и длительность реализации, содержащей импульсный сигнал. В режиме обнаружения импульсных сигналов предусмотрена компенсация мощных квазигармонических сигналов, излучаемых силовой сетью на основе методики, предложенной в [6].

Кроме записи импульсных сигналов предусмотрена возможность круглосуточной записи в файлы данных и отображения параметров узкополосных и квазимонохроматических сигналов, например, излучаемых силовой сетью на основной и высших гармониках 50 Гц. Регистрация трех компонент поля позволяет кроме спектрального состава и абсолютных уровней исследовать также поляризационные характеристики, которые содержат информацию о локальной структуре поля и его источниках.

Пример экспериментальной записи вертикальной электрической и двух горизонтальных ортогональных магнитных компонент поля атмосфера приведен на рис. 8.

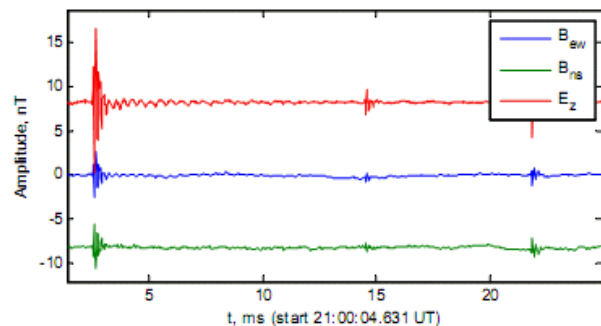


Рис. 8. Экспериментальная запись трех компонент поля атмосфера

Записи проводились на территории института в условиях достаточно мощных помех от силовых сетей и электрических машин вблизи от троллейбусной линии. Поэтому оценить расчетный порог чувствительности приемной аппаратуры не представилось возможным.

Заключение

В работе приведено описание программно-аппаратного комплекса для измерения и регистрации низкочастотных электромагнитных полей. Программная часть комплекса, реализованная на персональном компьютере, в режиме реального времени позволяет оценивать абсолютный уровень, спектральный состав, а также поляризационные характеристики регистрируемых импульсных, узкополосных и квазимонохроматических полей, и накапливать полученные данные в круглосуточном режиме.

Предложен оптимизированный метод конструирования индукционных датчиков магнитного поля, позволяющий согласовать их по уровню шума с входными цепями антенного усилителя. Данный метод позволяет упростить расчет параметров датчика и снизить требования к шумовым характеристикам входных цепей антенного усилителя при сохранении требуемой чувствительности магнетометра. Измерения параметров приемной части комплекса показали хорошее согласие с расчетом.

Таким образом, разработана система исследования импульсных и монохроматических помех, создаваемых электрическими и магнитными полями систем внешнего и тягового электроснабжения, высоковольтными линиями питания автоблокировки, технической реализацией которого стал предложенный аппаратно-программный комплекс.

Лабораторные испытания аппаратно-программного комплекса бесконтактного исследования уровней и спектра электромагнитных помех с использованием ПЭВМ, который дал возможность оперативно анализировать изменения электрического и магнитного поля, оценить их влияние на смежные устройства СЦБ и связи, а также архивировать данные были выполнены на базе Института радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины.

Библіографічний список

1. Бетче, В., Количественная оценка электромагнитных влияний в зоне электрифицированных линий [Текст] / В. Бетче, Р. Крафт Р. // Железные дороги мира. – 1992. – № 4. – С. 24–29.
2. Tumanski, S. Handbook of magnetic measurements (Series in Sensors), Ch.4 – Magnetic sensors [Текст] / S. Tumanski – CRC Press 2011.

3. Harriman, S. K., Magnetic Sensor Design for Femtotesla Low-Frequency Signals [Текст] / S. K. Harriman, E. W. Paschal, U.S. Inan – IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, Vol. 48, No. 1, January 2010, 396–402
4. Yedemsky, D. Ye., Experimental investigation of the tweek field structure [Текст] / D. Ye. Yedemsky, B. S. Ryabov, A. Yu. Shchokotov, V. S. Yarotsky – Adv. Space Res., 1992, 12, No 6. – P. 251254.
5. Jean, A. G., Calibration of Loop Antennas at VLF [Текст] / A. G. Jean, H. E. Taggart, J. R. Wait – Journal of research of the National Bureau of Standards-C. Engineering and Instrumentation, Vol. 65, No. 3, 1961, P. 189-193.
6. Сердюк, Т. Н., Выделение импульсных сигналов на фоне мощных помех от силовых сетей [Текст] / Т. Н. Сердюк, А. В. Швец, В. К. Иванов – Электромагнитная совместимость и безопасность на железнодорожном транспорте. – 2011. – №1. – Днепропетровск: Изд-во ДНУЖТ, 2011. – С. 7783.
7. Швец, А. В. Экспериментальное исследование распространения СНЧ-СДВ атмосфериков и динамика мировой грозовой активности [Текст] / А. В. Швец // Дис. на соиск. уч. ст. канд. физ. – мат. наук. – госуниверситет им. А. М. Горького. – Харьков. – 1994. – 153 с.

Ключові слова: індукційний датчик, вимірювання магнітного поля, низькочастотні перешкоди

Ключевые слова: индукционный датчик, измерение магнитного поля, низкочастотные помехи

Keywords: inductive sensor, magnetic field measurement, low-frequency noise

Поступила в редколлегию 17.03.2014