

УДК 616.24+621.039.553.5 (575.2) (04)

РАЗРАБОТКА АППАРАТУРНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ДИАПАЗОНА ВЫСОКИХ И НИЗКИХ ЧАСТОТ

А.М. Скрынников – зав. лаб.,

А.Э. Кучук – зав. лаб.,

Э.М. Кучук – канд. мед. наук, доц.,

Ю.Д. Суродин – канд. техн. наук, проф.

Apparatus complex was made up and worked out for provision of electro-magnetic monitoring of environment ranging from low to high frequencies.

Постоянно растущая насыщенность производства и быта электроаппаратурой неизбежно ведет к серьезной экологической проблеме электромагнитного фона, в который погружены существование и деятельность человека. Эта проблема много лет остается предметом интенсивного внимания как с технической, так и медицинской точек зрения [1–3].

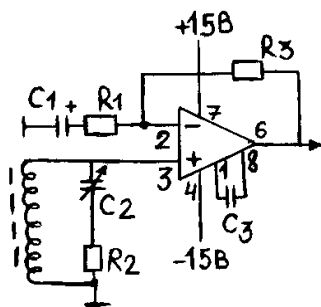
Учитывая недостаточную изученность воздействия естественных и искусственных электромагнитных излучений на биологические объекты, а также тенденции развития космических систем связи в Кыргызстане, следует отметить, во-первых, необходимость проведения электромагнитного мониторинга окружающей среды с целью контроля над теми процессами жизни общества, которые могут получить развитие в период активного ввода в действие новых систем связи и устройств, генерирующих электромагнитные излучения; во-вторых, необходимость изучения данной проблемы определяется задачами обеспечения безопасности жизнедеятельности человека, задачами защиты живого организма от негативного воздействия ЭМП, для чего планируется создание аппаратного комплекса и службы экологического электромагнитного мониторинга окружающей среды в период активного

ввода в действие новых систем связи и устройств, генерирующих электромагнитное излучение (ЭМИ).

Измеритель интенсивности электромагнитного поля, создаваемого промышленными и бытовыми установками. При разработке аппаратуры для измерения интенсивности электромагнитного поля, создаваемого различными промышленными и бытовыми установками, прежде всего необходимо выбрать частоту, на которой она будет работать. Известно, что частота электромагнитного поля промышленных и бытовых установок составляет 50 Гц. Индукционные датчики, обладающие достаточной чувствительностью на этой частоте, весьма громоздки, требуют большого количества витков обмотки и материала сердечника. Кроме того, при измерении малых интенсивностей поля становится существенной задача защиты датчика от всевозможных вибраций и микросейсмических колебаний его в постоянном магнитном поле Земли, так как при этом возникает сторонняя помеха. Максимум различных вибропомех лежит в области 40 Гц. Бывают случаи, когда амплитуда этой помехи становится соизмеримой или даже больше измеряемой величины напряженности электромагнитного поля. По-

этому представляется оптимальным использование второй или третьей гармоники промышленной частоты: во-первых, датчики с достаточной чувствительностью на этих частотах получаются значительно меньших размеров; во-вторых, так как рабочая частота не совпадает с частотой вибропомех, датчик оказывается более помехозащищенным. Но в этом случае для предупреждения наложения друг на друга различных гармоник необходимо ставить заградительный фильтр на частоту 50 Гц.

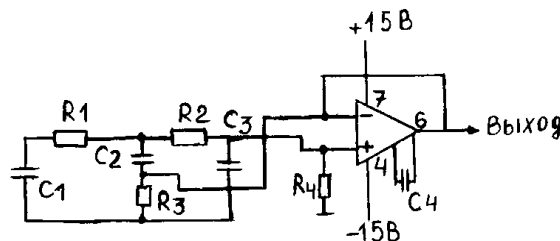
Таким образом, датчики электромагнитного поля на третью гармонику промышленной частоты представляют собой катушку из медного провода диаметром 0,05 мм с 20000 витками, одетую на ферритовый сердечник с магнитной проницаемостью $\mu = 4000$, длиной 180 мм и диаметром 20 мм. Катушка с сердечником помещается в кожух из винипластовой трубы, поверх которой в один слой с шагом 3–5 мм наматывается обмотка электростатического экрана, один конец ее соединяется с общей шиной усилителя. Ее назначение – убрать возможные электростатические наводки в датчике. Параллельно катушке включается набор конденсаторов и последовательно соединенное с ним сопротивление, образующие вместе колебательный контур. Набором емкостей контур настраивается на рабочую частоту, а величина сопротивления дает необходимую добротность контура. Колебательный контур включается на неинвертирующий вход операционного усилителя типа К140УД14 по следующей схеме:



Сопротивления R_1 , R_3 обеспечивают необходимый коэффициент усиления. Набором конденсаторов C_2 контур настраивается на рабочую частоту, сопротивлением R_2 устанавливается необходимая добротность контура.

Конденсатор C_3 (15–30 пф) снимает самовозбуждение схемы на высоких частотах. Датчик включен непосредственно на высокоомный неинвертирующий вход усилителя. При этом низкоомное омическое сопротивление датчика фиксирует рабочую точку усилителя и обеспечивает низкий уровень тепловых шумов на входе усилителя. А реактивное сопротивление датчика наилучшим образом согласуется с высоким входным сопротивлением усилителя.

Для устранения наложения друг на друга первой и третьей гармоники принимаемого сигнала последовательно с усилителем включается режекторный фильтр на 50 Гц, представляющий собой повторитель напряжения на базе микросхемы К140УД14 с двойным Т-образным мостом в цепи обратной связи, собранный по схеме:

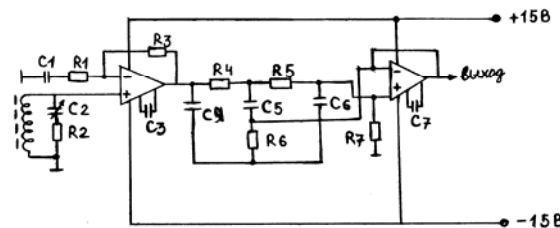


Расчет элементов моста производится по формулам:

$$f_p = \frac{1}{2\pi R_1 C_1}; R_1 = \frac{1}{2\pi f_p C_1}; R_1 = R_2; R_3 = \frac{R_1}{2};$$

$$C_2 = 2C_1; C_1 = C_3$$

Хорошие результаты получаются при выборе следующих элементов: $C_1 = C_2 = 1100$ пф; $C_3 = 2C_1 = 2200$ пф; $R_1 = 3,0$ Мом; $R_3 = 1,5$ Мом. Для сохранения высокоомного входа микросхемы выбирается $R_4 = 4,7$ Мом. Тогда весь канал получается в виде:



Усилитель подключается к источнику питания ВИП-10, а его выходное напряжение

измеряется цифровым вольтметром типа В7-27А.

Если заранее определен коэффициент передачи усилителя K , то, зная чувствительность датчика, можно рассчитать уровень электромагнитного поля:

$$H = \frac{U}{S \cdot K},$$

где H – напряженность электромагнитного поля (А/м); U – напряжение на выходе усилительного тракта (в); K – коэффициент усиления усилителя, безразмерная величина; S – чувствительность датчика (вм/А)э.

Для измерения уровня напряженности электромагнитного поля необходимо определить чувствительность датчика. Следует отметить, что все расчеты параметров датчика дают только прикидочные величины. Действительно, при выполнении датчика в виде многослойной катушки появляется межвитковая емкость, влияющая на собственную резонансную частоту датчика. Для увеличения чувствительности желательно иметь большее число витков, при этом увеличивается межвитковая емкость и снижается собственная резонансная частота датчика. Необходимо еще учесть, что для стабильности параметров датчика величина настроечной емкости не должна быть очень малой, так как незначительное изменение собственной межвитковой емкости из-за сотрясения датчика приводит к значительному изменению его рабочей частоты. Есть два варианта уменьшения межвитковой емкости. Первый – намотка катушки выполняется не “виток к витку”, а “внавал”. При этом межвитковая емкость уменьшается, но намотка получается рыхлой и подвержена деформации при сотрясениях. Второй – секционирование обмотки. Здесь из-за последовательного соединения секций обмотки, т.е. последовательного соединения емкостей, общая емкость уменьшается, но теряется чувствительность датчика. Действительно, чувствительность датчика определяется его индуктивностью, а она в свою очередь пропорциональна квадрату числа витков катушки. Сравним два случая. В первом обмотка состоит из двух секций с числом витков в каждой w . При этом $L_{\text{общ}} = L_1 + L_2$,

т.е. индуктивность пропорциональна величине $w_1^2 + w_2^2 = 2w_1^2$.

Во второй обмотка состоит из одной секции, а число витков равно удвоенному числу витков одной из секций, как и в первом случае. И тогда индуктивность будет пропорциональна $(w_1 + w_2)^2 = 4w_1^2$. Следовательно во втором случае датчик будет иметь более высокую чувствительность.

Таким образом, учитывая сказанное выше, для определения чувствительности датчика остается один путь – экспериментальный. Для этого обычно используют так называемые “катушки Гельмгольца”, представляющие собой два или более квадратных контура со сторонами “ $2a$ ”, расположенные на общей оси параллельно друг другу на расстоянии “ a ”. В этом случае напряженность переменного магнитного поля на оси, проходящей через центр катушек, рассчитывают так [1]:

$$H = \frac{4a^2 w \cdot I}{\pi(a^2 + d^2)\sqrt{a^2 + d^2}} = K_r I(a/m),$$

где I – ток в катушках Гельмгольца, А; w – число витков в катушках Гельмгольца (суммарное); K_r – постоянная коэф. Гельмгольца; H – напряженность магнитного поля, А/м.

Задавая ток через катушки на той или иной частоте один и тот же, можно рассчитать напряженность поля на оси катушек и, поместив на ось катушек датчик, определить его чувствительность.

В катушках Гельмгольца датчик настраивается на рабочую частоту подбором емкости C_2 , резистором R_2 устанавливается его добротность. Под добротностью понимается отношение полосы пропускания датчика на уровне 0,707 от максимальной амплитуды к величине центральной частоты:

$$Q = \frac{2\Delta f}{f}.$$

Обычно берется $Q = 10$, т.е. на уровне 0,707 при $f_{\text{рез}} = 150$ Гц, $2\Delta f = 15$ Гц.

Следует отметить, что индукционный датчик имеет диаграмму направленности в виде восьмерки, и поэтому для получения достоверно воспроизводимой информации о напряженности электромагнитного поля в данном

месте его необходимо располагать каждый раз строго по одному и тому же направлению.

Был изготовлен датчик (рис. 1) для измерения низкочастотного электромагнитного поля в виде ферритового стержня с магнитной проницаемостью 4000 длиной 180 мм и диаметром 10 мм, на который была намотана катушка провода диаметром 0,05 мм в количестве 15000 витков. Датчик помещен в кожух из винипласта, поверх которого в один слой с шагом 5 мм намотан электростатический экран проводом 0,3 мм, один конец его соединялся с общим выводом. Чувствительность и добротность датчика определялась по изложенной выше методике. При токе в кольцах Гельмгольца 0,2 миллиампера поле на оси колец Гельмгольца оказывается равным 0,03 А/м. При этом сигнал на выходе предусилителя был без нелинейных искажений и равен 6,42 В. Коэффициент усиления усилителя 30. Тогда чувствительность датчика получается 7,18 Вм/А. Было проведено измерение напряженности электромагнитного поля на месте, где сидит настройщик радиоаппаратуры и на его рабочем столе. В первом случае напряжение на выходе усилителя датчика было 1,72 В, что соответствует напряженности электромагнитного поля 0,008 А/м. На рабочем столе оператора при включенной настроечной аппаратуре сигнал на выходе усилителя датчика был с нелинейными искажениями и оценен по напряженности поля как 0,04 А/м.



Рис. 1. Датчик для измерения низкочастотного ЭМП.

Отметим, что данные о напряженности поля получены с помощью датчика, настроенного в резонанс на частоту 150 Гц с добротностью 10.

Измеритель интенсивности электромагнитного поля в диапазоне высоких частот и измерение плотности потока энергии ЭМП. В качестве измерителя интенсивности электромагнитного поля (ЭМП) применен прибор ПЗ-18, предназначенный для измерения средних значений плотности потока электромагнитного поля в дальней зоне СВЧ-источников излучений и непосредственно на рабочих местах персонала, обслуживающего радиотехнические установки. Диапазон частот измерителя от 0,3 до 39,65 ГГц, пределы измерения плотности потока энергии от 0,32 мкВт/см² до 3,2 мВт/см² (рис. 2).



Рис. 2. Измеритель интенсивности ЭМП в диапазоне высоких частот.

Измеритель ПЗ-18 состоит из антенны-преобразователя АП-ППЭ-1 и индикатора ЯВП-110. Работа измерителя основана на приеме и преобразовании СВЧ-сигналов в постоянный или квазипостоянный ток антенной-преобразователем и отсчета значений постоянного тока, пропорциональных интенсивности ЭМП, цифровым индикатором. Отсчет измеряемой величины производится в децибелах (дБ).

Антенна-преобразователь выполнена на основе системы последовательно соединенных резистивных тонкопленочных термопарных преобразователей, помещенных на коническую поверхность. При измерениях этот блок помещается в измеряемое ЭМП, при воздейст-

вии которого за счет поглощения энергии ЭМП на каждой из термодатчиков возникает градиент температуры, величина которого прямо пропорциональна величине плотности потока энергии ЭМП. Измерение градиента температур осуществляется путем измерения термоэдс, возникающей на термодатчиках. Суммарная термоэдс по резистивной линии связи (ЛС) передается к измерителю температуры, который состоит из линейного усилителя постоянного тока (УПТ), размещенного в ручке антенно-преобразователя, и индикатора, вход которого соединен кабелем с выходом УПТ.

В индикаторе происходит преобразование усиленного сигнала по логарифмическому закону, а затем в цифровую форму и отсчет измеряемой интенсивности ЭМП на цифровом табло в децибелах относительно нижнего предела измерений антенного преобразователя. Абсолютное значение плотности потока энергии электромагнитного поля определяется по формуле:

$$P = P_0 \cdot 10^{(A_i - K_f + K_{да})/10} \text{ мкВт/см}^{-2},$$

где P_0 – соответствует значению 1 мкВт/см⁻²; K_f – относительный коэффициент, занесенный в формуляр прибора; A_i – показание индикатора измерителя плотности потока энергии, дБ; $K_{да}$ – коэффициент ослабления сигнала на входе индикатора, равный 0 или 10 дБ, в зависимости от положения переключателя “Род работы”.

Сигнал с АП передается через фильтр нижних частот (ФНЧ) на вход логарифмического усилителя (ЛУ), где происходит сжатие динамического диапазона и формирование сигнала для отсчета измеряемой плотности потока энергии в “дБ” относительно нижнего предела измерения АП. Усиленный в (ЛУ) сигнал поступает на вход аналого-цифрового преобразователя, где он преобразуется в цифровую форму и после счетчика (СТ) поступает на индикатор (И). Питание прибора может осуществляться как от аккумуляторной батареи, так и от сети.

Отсчет показаний прибора производят при ориентировке АП на максимум показаний.

В диапазоне 0,3–25,86 ГГц можно не производить ориентацию АП на максимум приема, при этом погрешность измерений может достигать ±2,5 дБ.

Показание прибора определяется следующим образом:

$$A_{п} = A_{и} - K_f,$$

где $A_{и}$ – показание индикатора; K_f – поправочный коэффициент, обусловленный частотной зависимостью коэффициента преобразования АП, значение которого приведено в формуляре на измеритель, в таблицах и графиках поправочных коэффициентов.

Методика обследования ЭМП низкой частоты для обеспечения безопасности жизнедеятельности в различных условиях воздействия ЭМИ. Известно, что электромагнитные поля могут влиять на здоровье человека [1–3] как в низкочастотном, так и высокочастотном диапазоне. Известно также [4–8], что в образовании электромагнитного поля Земли участвует множество источников. Главные из них – грозовые молниевые разряды, источники промышленных помех, линии электропередач, эффект микрометеоров, различные промышленные и бытовые электроприборы. О структуре этих полей можно сказать следующее. Поле молниевых разрядов – это импульсные электромагнитные возмущения, называемые атмосфериками. В энергетическом спектре атмосферика есть низко- и высокочастотные части. Высокочастотная часть атмосферика формируется волнами с частотой 1–30 кГц с максимумом в области 5–10 кГц. Низкочастотная, наиболее интенсивная часть – “хвост” – формируется волнами с частотой ниже 1–2 кГц с максимумом в области 60–200 Гц. Результат наложения отдельных атмосфериков, каждый из которых имеет широкий и неравномерный амплитудно-частотный спектр, представляет собой суммарное электромагнитное поле. Характер поля в целом случайный как во времени, так и по интенсивности.

Вблизи линий электропередач (ЛЭП) действуют электромагнитные поля обусловленные токами нулевой последовательности, средние их значения от 5 до 10 А при тяговой нагрузке с ртутными выпрямителями. Эти поля содержат гармоники от 0,1 до 150 кГц с наибольшими амплитудами в спектре частот от 100 до 2400 Гц. Другие источники промышленных помех – это промышленные предприятия, различные электроустановки по-

стоянного и переменного тока как бытовые, так и промышленные. Так как подключение разных потребителей носит случайный характер, то и электромагнитное поле промышленных помех случайно как во времени, так и по интенсивности. Отметим, что максимум энергии атмосфериков лежит в области частот 60–200 Гц, а максимум энергии электромагнитного поля промышленных помех находится в области частот 100–2400 Гц. На рабочем месте, да и в быту, человек подвержен воздействию как тех, так и других. Поэтому считаем целесообразным выбор такой рабочей частоты для обследования безопасности жизнедеятельности человека, которая бы перекрывала бы оба диапазона. За такую частоту предлагаем выбрать 150 Гц. При этом датчики электромагнитного поля будут менее громоздки и значительно меньше чувствительны к вибропомехам, имеющим максимум в области 40–60 Гц.

Исследовательский комплект включает в себя индукционный датчик, представляющий собой RLC-контур, настроенный на третью гармонику электромагнитного поля промышленной частоты, а именно 150 Гц, с усилителем. Кроме того, для исключения наложения на измеряемый сигнал вибропомехи и первой гармоники поля промышленной частоты после усилителя подключен режекторный фильтр-пробка на частоту 50 Гц. Датчик подключается к источнику питания ± 15 вольт постоянного напряжения, сигнал с его выхода измеряется цифровым вольтметром, наличие или отсутствие нелинейных искажений сигнала контролируется осциллографом. При этом, если S – чувствительность датчика ВМ/А, U – напряжение на выходе усилителя, K – коэффициент усиления усилителя, тогда напряженность электромагнитного поля рассчитывается так:

$$H = U/KS \text{ (А/М)}.$$

В настоящее время в лаборатории заканчивается разработка и изготовление измерителя уровня электромагнитного поля с встроенным источником питания, расширенным диапазоном уровня измеряемого поля, где автоматически исключаются сигналы, уровень которых меньше наперед заданного порога, и те, у которых он выходит за пределы динамического диапазона измерителя. Порог измере-

ний обычно устанавливается так, чтобы обеспечить отношение сигнал/шум равное 3.

Методика обследования электромагнитного поля может осуществляться двумя вариантами. Первый – размещают датчик на рабочем месте и, поворачивая его в горизонтальной плоскости, через каждые 30 градусов последовательно измеряют уровень поля, отыскивают его максимум и фиксируют именно этот максимум в качестве параметра для дальнейшего анализа. Второй – фиксируют положение датчика (одно и тоже для всех последующих экспериментов) и измеряют уровень поля в этом направлении. Затем датчик поворачивается на 90 градусов и снова измеряется уровень поля. Затем берется среднее из этих двух измерений. Оно и является параметром для дальнейшего анализа. Учитывая случайный характер поля, каждое измерение его уровня в определенном направлении необходимо производить минимум 3 раза и брать среднее значение из этих измерений. Возможен и третий способ. Зафиксировав датчик в определенном месте по направлению, поворачивают его через 30 градусов, каждый раз измеряя среднее значение уровня поля, и по полученным данным строят годограф изменения уровня электромагнитного поля в пространстве. При этом наглядно можно выявить направление или местоположение источника максимального излучения.

Расчет уровня напряженности электромагнитного поля ведется следующим образом. Пусть U – напряжение на выходе усилителя (В), K – коэффициент усиления усилителя, S – чувствительность датчика (В/АМ), тогда напряженность электромагнитного поля H (А/М) рассчитывается по формуле: $H = U/KS$.

Литература

1. Хадарцев А.А. Новые медицинские технологии на основе взаимодействия физических полей и излучений с биологическими объектами // Вестник новых медицинских технологий. – Тула, 1999. – №1. – С. 7–14.
2. Афромеев В.И., Субботина Т.И., Яшин А.А. Корреляционный подход и роль физиологических ритмов в объяснении эффектов взаимодействия электромагнитных полей с живым организмом // Вестник новых медицинских технологий. – Тула, 1997. – №3. – С. 31–35.

3. Чернышов Е.Т., Чернышова Н.Г., Чечурин Е.Н. Магнитные измерения на постоянном и переменном токе. – М.: Стандартгиз, 1962.
4. Клейменова Н.Г. Современное представление о природе вариаций электромагнитного поля Земли (1 Гц – 1 кГц) // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. – 1963. – № 12.
5. Белянский В.Б., Михайлова Г.А. Об исследованиях свойств атмосфериков на сверхнизких частотах (ниже 1 кГц) // Геомагнетизм и аэрономия. – 1963. – Т. 1. – № 3.
6. Альперт Я.Л., Гусева Э.Г., Флигель Д.Е. Распространение низкочастотных электромагнитных волн в волноводе Земля – Ионосфера. – М.: Наука, 1967.
7. Владимиров Н.И., Клейменова Н.Г. О структуре естественного электромагнитного поля Земли в диапазоне 0,5–100 Гц // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1962. – № 10.
8. Клейменова Н.Г. Некоторые замечания о природе естественных электромагнитных вариаций в диапазоне 100–1000 Гц // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1965. – № 2.