

Д. т. н. Э. М. ГРУДЗИНСКИЙ, П. Б. ДУБ, д. т. н. В. А. НИЧОГА,
к. т. н. О. В. САМСОНЮК

Польша, Технический ун-т „Вроцлавская политехника”;
Украина, г. Львов, Физико-механический ин-т им. Г. В. Карпенко,
Нац. ун-т „Львовская политехника”
E-mail: eugeniusz.grudzinski@pwr.wroc.pl, nich@ipm.lviv.ua

Дата поступления в редакцию
30.01—02.07 2007 г.
Оппонент к. т. н. Ю. Н. МАКСИМЕНКО
(ЗАО «Укрналит», г. Киев)

ПРОБЛЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ АППАРАТУРНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ТЕХНОГЕННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Показана необходимость согласования параметров измерительной аппаратуры с действующей нормативной базой, определяющей предельно допустимые уровни электромагнитных полей.

Быстрое развитие систем электроэнергетики, телекоммуникаций, телевидения, радиолокации, а также большое количество электронных устройств в медицине, промышленности и домашнем хозяйстве, привели к постепенному росту интенсивности техногенных электромагнитных полей (ЭМП) на рабочем месте, в быту и в окружающей среде [1—3]. Это привело к необходимости, с одной стороны, определить безопасные для человека уровни техногенных ЭМП и, с другой стороны, обеспечить удовлетворительный их контроль.

Влияние техногенных ЭМП на человеческий организм изучено недостаточно [1]. В связи с этим еще более актуальной становится проблема корректного измерения этих ЭМП, разработки и применения соответствующей электрорадиоизмерительной аппаратуры. Одновременно актуальным остается вопрос состояния действующей нормативной документации (НД), которая регламентирует предельно допустимые уровни (ПДУ) полей с точки зрения их безопасности [3—5].

Задачей настоящей работы является рассмотрение вопросов, связанных с особенностями измерения ЭМП в непосредственной близости от источника излучения. При этом особое значение имеет интерпретация результатов измерений и согласование параметров измерительной аппаратуры с действующей нормативной базой, определяющей ПДУ поля с точки зрения его безопасности.

Проведение этих измерений является сложной задачей по нескольким причинам. Одной из них является то, что очень часто неизвестны параметры источника излучения, а иногда даже его местонахождение. Причиной, существенно осложняющей процесс измерения и интерпретацию результатов, является влияние предметов и условий внешней среды.

Специфика измерений заключается еще и в том, что источники излучения очень часто находятся непосредственно возле человека, т. е. в ближней зоне (зоне индукции) [6]. Следует отметить также, что во многих случаях излучение источника связано с про-

хождением в нем сильных токов, т. е. поле по своему характеру преимущественно магнитное, а из-за пониженного (в сравнении с дальней зоной) значения характеристического импеданса среды в поле индукции адсорбируемость мощности органическим материалом (оператором-человеком) увеличивается [1, 2, 5].

Характеристика датчиков ЭМП

Большинство измерителей электрической и магнитной составляющих поля, которые рекомендуются НД для определения уровней полей, используют датчики или зонды, которые должны отвечать определенным требованиям. Основными из них являются: 1) чувствительность, 2) полоса частот, 3) динамический диапазон, 4) точность.

Для минимизации погрешностей измерения или исследования влияния поля на биологические или технические объекты сейчас везде применяют малые электрические зонды с линейной, круговой или сферической характеристиками по схемам, которые показаны на рис. 1.

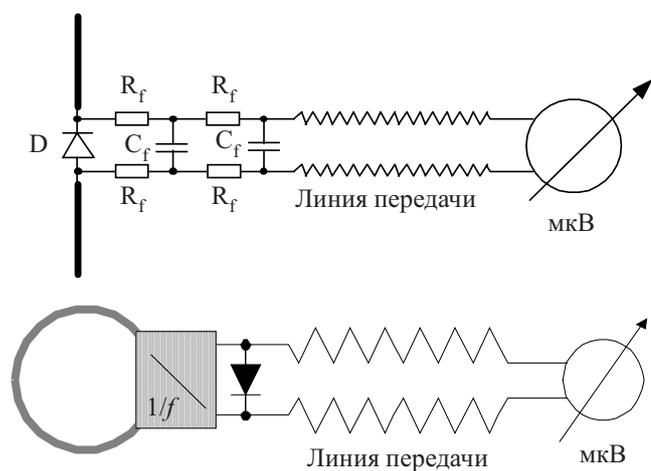


Рис. 1. Примеры самых простых схем линейных зондов напряженности электрического и магнитного полей

Техногенное ЭМП фактически выступает как индукционное ближнее поле. Здесь электрическую и магнитную составляющие необходимо измерять отдельно — в отличие от дальнего поля, где по одной измеренной составляющей можно через волновой импеданс среды Z найти другую. Вектор Пойнтинга в ближнем поле является комплексной вели-

чиной, его направление и значение зависят от структуры источника излучения и расстояния от источника. В ближнем поле имеются сложные фазовые зависимости между электрической E и магнитной H составляющими. В зависимости от отношения E/H ближнее поле может быть высокоимпедансным (электрическим, $Z_E = E/H > 120\pi$) или низкоимпедансным (магнитным, $Z_E = E/H < 120\pi$).

Точность измерения определяют не только малые размеры датчика (зонда) по отношению к длине волны, но и наименьшее расстояние от источника, на котором выполняется измерение. Погрешность измерений зависит также от согласования датчика (зонда) измерительного устройства с источником, от присутствия вокруг измерителя и датчика различных предметов с изменяющейся формой, от других факторов, например, многолепестковости диаграммы направленности зонда. Влияние разных факторов приводит к существенной (около 50%) [6—8] погрешности измерений в ближнем поле.

Измерение техногенных ЭМП может проводиться как селективными, так и широкополосными измерителями. Широкополосные измерения очень просты, быстры и в большинстве случаев не вызывают серьезных затруднений. Значительные трудности может вызывать интерпретация результатов измерений, особенно при сравнении их с ПДУ на границах диапазонов частот, где значения ПДУ могут сильно отличаться [3, 5, 9—11], и это является одним из недостатков метода.

Селективные измерения сложнее, и не всегда по их результатам можно оценить соответствие измеренных E или H значениям ПДУ, нормируемым в определенных границах или участках частотного диапазона.

В [10] приведен перечень приборов, рекомендуемых в Украине для измерения уровней ЭМП, основными из которых являются:

- 1) измеритель напряженности поля ближнего NFM-1 (ФРГ), частотный диапазон по E : 50 Гц, 60 кГц...350 МГц, по H : 10 кГц...10 МГц;
- 2) измерители напряженности ПЗ-15, -16, -17, -21 (Россия), частотный диапазон по E : 10 кГц...300 МГц, по H : 100 кГц...10 МГц;
- 3) измеритель напряженности радиопомех FSM-6 (ФРГ), частотный диапазон по E и H : 0,1...30 МГц;
- 4) измеритель напряженности радиопомех FSM-8 (ФРГ), частотный диапазон по E : 30...1000 МГц.

Следует отметить, что указанные приборы не покрывают весь диапазон частот, особенно начиная с 2 Гц до 10 кГц, по электрической и магнитной составляющим. Погрешность каждого из них различна, не говоря уже о суммарной погрешности измерений на рабочем месте.

Как показано в [8], селективные измерения техногенных ЭМП неприемлемы при сравнении результатов измерений с нормативной базой, в которой ПДУ излучений нормируются по диапазонам частот [3, 5, 6, 9, 10].

Пространственное распределение поля неизвестного источника может существенно отличаться от

образцового поля плоской волны, в котором, например, был прокалиброван датчик измерителя. По этой причине погрешность большинства прецизионных измерителей поля в дальней зоне (зоне излучения) не превышает 10%, в то время как при измерении в ближнем поле (зоне индукции) погрешность измерений может составить 20...50% [6].

Измеритель типа МЕН для определения интенсивности техногенного излучения

С учетом отмеченных выше особенностей в лаборатории эталонов и метрологии ЭМП Технического университета „Вроцлавская политехника” был разработан [8] ряд широкополосных специализированных зондов для измерения составляющих электрического и магнитного поля на основе использования малых дипольных электрических и рамочных магнитных антенн с непосредственным детектированием сигнала на зажимах измерительного зонда (датчика) и передачей постоянной составляющей непосредственно на измеритель типа МЕН-1. В этом случае измерение ЭМП в заданных диапазонах частот проводится одним измерителем МЕН-1 и несколькими сменными антеннами (фактически “точечными” зондами), предназначенными для определенных полос частот, на которых регламентированы ПДУ излучения в НД Польши [9]. Такой подход позволяет избежать многих погрешностей, возникаю-

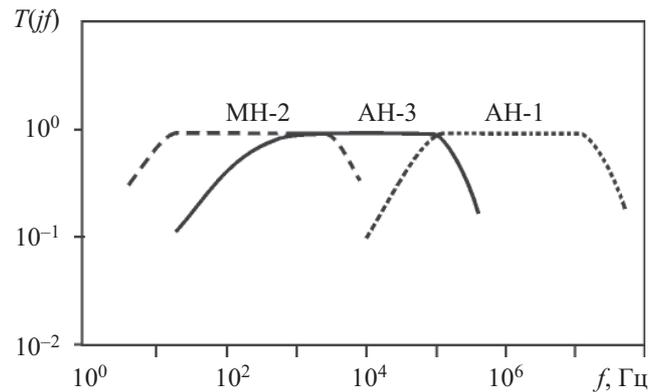


Рис. 2. Нормированные частотные характеристики измерителя типа МЕН-1 с зондами магнитного поля типа МН-2 (20...2000 Гц), АН-3 (1...100 кГц) и АН-1 (0,1...10 МГц)

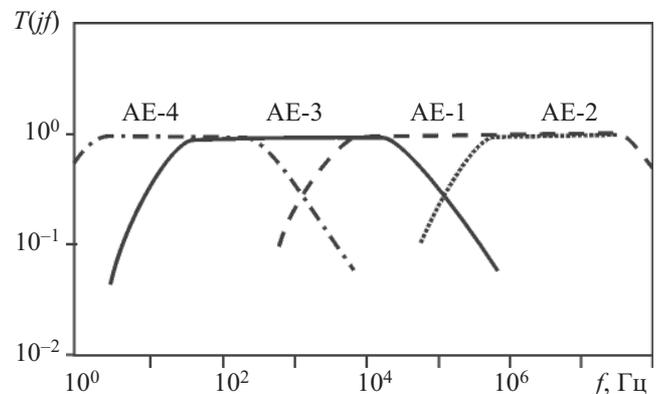


Рис. 3. Нормированные частотные характеристики измерителя типа МЕН-1 с зондами электрического поля типа АЕ-4 (20...1000 Гц), АЕ-3 (1...100 кГц), АЕ-1 (0,1...300 МГц) и АЕ-2 (10...300 МГц)

ших как из-за усреднения поля на измерительной антенне, так и из-за искажений измеряемого поля, вызванных этой антенной.

На рис. 2 и 3 показаны нормируемые АЧХ, т. е. приведенные к значению АЧХ в области ее уплощенной части, $T(f)$ нескольких электрических и нескольких магнитных антенн-зондов, которые работают с измерителем типа МЕН-1. В табл. 1 представлены параметры некоторых зондов электрического и магнитного полей [8]. Зонды типа AS предназначены для измерения плотности потока энергии ЭМП S .

Таблица 1

Параметры зондов для измерительного прибора МЕН-1

Тип зонда	Измеряемое поле	Диапазон частот	Диапазон измеряемых ЭМП
АЕ-НР	E	0,1—30 МГц	0,1—10 В/м
АЕ-1	E	0,1—300 МГц	2—1000 В/м
АЕ-2	E	10—300 МГц	0,5—25 В/м
АЕ-3	E	1—100 кГц	5—1000 В/м
АЕ-4	E	10—1000 Гц	1—30 кВ/м
AS-1	S	0,3—3 ГГц	0,05—100 Вт/м ²
AS-3	S	0,3—38 ГГц	0,05—10 Вт/м ²
АН-1	H	0,1—10 МГц	1—250 А/м
АН-2	H	10—30 МГц	1—250 А/м
АН-3	H	1—100 кГц	1—250 А/м
АН-27	H	10—60 МГц	0,1—20 А/м
МН-2	H	20—2000 Гц	0,2—300 А/м

Следует отметить, что полосы пропускания всех отмеченных зондов типа АН и АЕ отвечают полосам пропускания, в которых НД Польши нормируют ПДУ ЭМП [9]. Чувствительность по магнитному полю G измерителя типа МЕН-1 на частотно-независимой “плоской” части АЧХ с зондом типа МН-2 составляет 0,5 В/А/м, АН-3 — 0,2 В/А/м, АН-1 — 0,2 В/А/м. Чувствительность по электрическому полю (т. е. действующая высота h) с зондом типа АЕ-4 составляет 0,002 м, АЕ-3 — 0,1 м, АЕ-1 — 0,1 м и АЕ-2 — 0,4 м.

Анализ проведенных в [6, 8] исследований показывает, что одним из основных требований метрологии полей близких источников является независимое измерение обеих составляющих поля — E и H . Кроме того, измерения должны быть “точечными”.

На рис. 4 приведены результаты измерения электрической составляющей произвольного источника ЭМП на низких частотах разными измерителями при изменении расстояния от источника [8]: кривая 1 отвечает результатам измерения измерителем типа МЕН-1 с электрическим зондом типа АЕ-НР и длиной диполя ≈ 20 см (Польша); кривая 2 — измерителем типа ADA-120 (США) с электрической штыревой антенной; кривая 3 — измерителем типа ВВН-1100 производства США с ферритовой антенной длиной около 60 см; кривая 4 — измерителем типа LZM-5 с рамочным зондом RAL-5 и диаметром рамки ≈ 60 см (Польша—Германия).

Все четыре измерителя были прокалиброваны в образцовом электрическом поле волновода с поперечной электромагнитной волной (линии ТЕМ) напряженностью E (измерители 1 и 2) и в соответств-

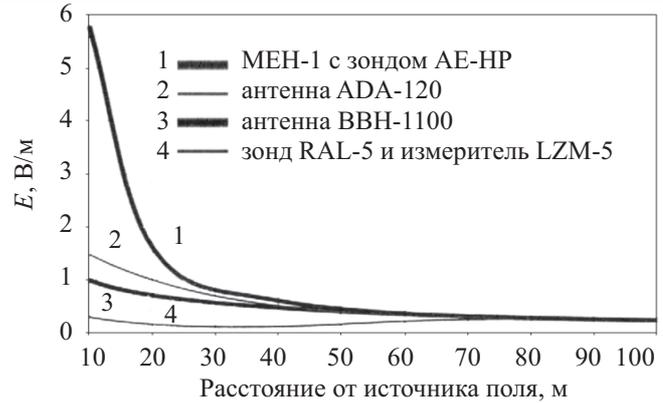


Рис. 4. Результаты измерения электрической составляющей произвольного источника ЭМП на низких частотах разными измерителями при различном расстоянии от источника ющем образцовом магнитном поле напряженностью $H=E/120\pi$ (измерители 3 и 4).

Анализ результатов, представленных на рис. 4, показывает, что измерители 3 и 4 (с магнитными зондами) демонстрируют существенно меньшие значения напряженности поля по сравнению с измерителями 1 и 2. Объясняется это тем, что в ближнем электрическом поле $E/H > 120\pi$, а в ближнем магнитном поле $E/H < 120\pi$. На первый взгляд, измеритель типа ADA-120 (кривая 2 на рис. 4) должен был бы показать измеренное значение напряженности электрического поля, близкое к показаниям прибора МЕН-1 (кривая 1). Но в силу того, что зонд измерителя 2 имеет значительно большую длину, чем зонд прибора 1, и интегрирует значение E по своей длине, его показания существенно меньше. Самыми точными будут значения напряженности поля, полученные прибором МЕН-1 с коротким электрическим зондом [8]. Все эти особенности должны учитываться при измерениях ЭМП на близких расстояниях от источника.

Учитывая, что рынок измерительных приборов для метрологии ЭМП очень насыщен, измерительные приборы имеют разнообразные схемные решения, измеряют разные параметры поля и проходят калибровку в различных условиях, добиться существенного снижения погрешности измерений, особенно в ближнем поле, довольно сложно. Чтобы обеспечить правильность и сравнимость результатов измерений ЭМП, необходимо было бы оснастить все службы и метрологические лаборатории одинаковыми измерительными приборами. К сожалению, как видно из приведенных выше сведений, приборы, которыми сейчас пользуются не только в Украине, но и вне ее, имеют разные технические характеристики и не всегда отвечают существующим нормативным документам — как отечественным, так и международным.

Вышеупомянутый универсальный широкополосный измеритель напряженности поля типа МЕН-1 дает возможность проводить дистанционное измерение горизонтальной и вертикальной составляющих электрических и магнитных полей, а также исследовать влияние на структуру поля таких факторов как погода, здания, деревья, линии электропередач и т. п. С помощью такого измерителя на частоте

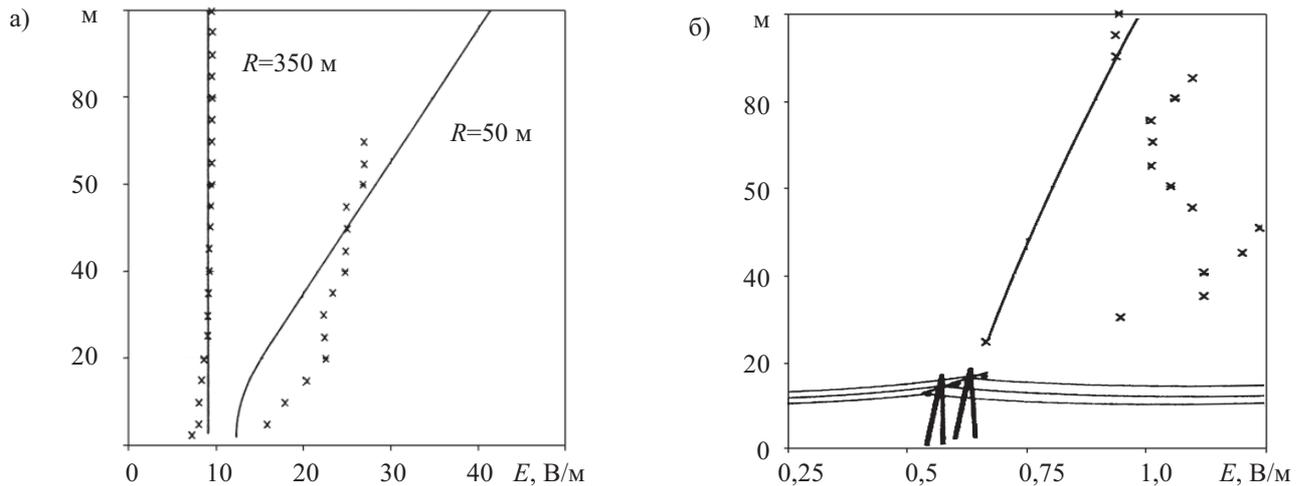


Рис. 5. Сравнение теоретических расчетов и экспериментальных измерений ЭМП для двух различных случаев конфигурации окружающей среды

200 кГц были измерены техногенные поля вблизи радиостанций. Электрические зонды поднимались на воздушном шаре на высоту до 100 м, а универсальный измеритель МЕН был расположен на земле. Передача измерительного сигнала от зонда к прибору МЕН осуществлялась по кабелю. Измерения проводились на двух вертикальных профилях на расстояниях R 50 и 350 м от антенной мачты радиостанции (рис. 5, а), а также на другом вертикальном профиле вблизи высоковольтной линии электропередачи (рис. 5, б).

На рис. 5 линии отвечают теоретическим расчетам напряженности ЭМП, а точки — результатам измерений. На расстояниях порядка 350 м (рис. 5, а) расчетные и экспериментальные данные близки между собой. На малом расстоянии от передающей антенны (50 м) наблюдается отличие между расчетом и измерением. Здесь влияние поверхности земли вызвало наклон кривой.

Влияние линии электропередачи на результаты измерений видно из рис. 5, б, на котором наблюдается существенный (в 1,5—2 раза) разброс результатов измерений по сравнению с теоретическими расчетами.

Аппаратурные возможности и нормативные документы

Безопасные для человека уровни техногенных электромагнитных полей определяются предельно допустимыми значениями. При этом существуют значительные отличия в значениях ПДУ в различных странах, в том числе в странах Восточной Европы [4]. Пример таких отличий для одной только сотовой телефонии, которая сейчас применяется повсеместно в мире, дан в табл. 2.

В Физико-механическом институте НАН Украины им. Г. В. Карпенко (ФМИ НАНУ) на протяжении последних 45 лет проводятся работы по созданию высокочувствительных датчиков для измерения преимущественно низкочастотных и инфранизкочастотных ЭМП применительно к задачам геофизики, космических исследований, технической диагностики объектов, прогнозу землетрясений по электромагнитным предвестникам, измерению техногенных полей

[12, 13]. Одной из последних разработок было создание информационно-измерительной системы „Каскад” для диагностики низкочастотных магнитных полей на пилотируемых космических станциях [14, 15].

Институт телекоммуникаций, телеинформатики и акустики (ИТГА) „Вроцлавской политехники” в течение свыше 30 лет занимается метрологией электромагнитных полей в широких частотном и динамическом диапазонах. Изначально было принято измерять в широкой полосе напряженность электрического поля электрически короткими симметричными дипольными антеннами, а напряженность магнитного поля — электрически малыми рамочными антеннами с детектированием сигнала на зажимах антенны или в непосредственной близости к ней [8].

Плодотворное сотрудничество ФМИ НАНУ, «Львовской политехники» и «Вроцлавской политехники» привело к разработке и созданию целого ряда приборов, устройств, первичных преобразователей, датчиков.

Однако, как было показано выше, корректное проведение измерения электромагнитного поля является вопросом сложным и требует специальных знаний не только в области метрологии, электродинамики и распространения волн, а также в области электромагнитной безопасности биоэкосистем.

Таблица 2

Значения ПДУ напряженности ЭМП для сотовой телефонии, принятые в некоторых странах (организациях)

Страна (организация), год	ПДУ, Вт/м ²	
	900 МГц	1800 МГц
Великобритания, 1993	33	100
Канада, 1993; США, 1997	6	10
Международная комиссия по радиационной защите населения от неионизирующих излучений (ICNIRP), 1998	4,5	9
Австралия, 1998	2	2
Россия, 1988; Италия, 1999; Польша, 1998, 2003	0,1	0,1

При измерении напряженности ЭМП в условиях естественной среды важным является не только выбор методики измерений, измерительной аппаратуры, времени и условий измерений, но и интерпретация результатов измерений в соответствии с существующей нормативной базой, регламентирующей электромагнитную безопасность человека и окружающей среды. Поэтому отдельным направлением работы является разработка методических рекомендаций и проектов нормативной документации, которые позволяют эффективно проводить исследования техногенного электромагнитного загрязнения окружающей среды [4, 8, 11, 12, 14—16].

Вопросы определения ПДУ и методики измерения ЭМП расплывлены в многочисленных стандартах, нормативных актах, санитарных нормах и т. д. При проведении измерений, анализе полученных результатов приходится пользоваться большим количеством разных по содержанию НД, что часто приводит к неоднозначной интерпретации результатов измерений. Условия проведения измерений и их специфика не регламентированы в полной мере существующей НД, в особенности если речь идет о проведении измерений в непосредственной близости от источников ЭМП.

Выводы

Представленные материалы показывают, что теоретические расчеты параметров ЭМП вблизи источников не всегда совпадают с экспериментальными результатами, и поэтому окончательная оценка техногенного загрязнения рабочего места или окружающей среды возможна лишь на основе тщательных и корректных измерений специальной аппаратурой с учетом отмеченных выше особенностей.

Результаты измерений свидетельствуют о возможных значительных расхождениях при измерениях поля на близких от источника ЭМП расстояниях при использовании различных измерителей. По этой причине такие измерения должны проводиться специальными измерительными приборами, снабженными «точечными» датчиками *E*- и *H*-типа с полосами пропускания, соответствующими тем полосам, в которых нормативные документы регламентируют ПДУ ЭМП.

Такие измерители ЭМП должны иметь унифицированный измерительный канал (для уменьшения погрешностей измерения), специальный набор широкополосных датчиков *E*- и *H*-компонент ЭМП для каждого задаваемого диапазона частот и проходить метрологическую аттестацию в образцовом магнитном и электрическом полях.

Чтобы охрана среды от облучения техногенными ЭМП была результативной, в нормативных документах Украины должны быть однозначно сформулированы требования к оценке и интерпретации результатов измерений, к выбору методики и аппаратуры для проведения измерений. Все эти требования должны быть сосредоточены в одном документе и понятны для контрольно-инспекционных служб и других пользователей.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Григорьев Ю. Г., Степанов В. С., Григорьев О. А., Меркулов А. В. Электромагнитная безопасность человека.— М.: Рос. нац. комитет по защите от неионизирующего излучения, 1999.
2. Шевель Д. М. Электромагнитная безопасность.— Киев: Век+, НТИ, 2002.
3. Нічoga В., Сопільник Л., Дуб П. Гармонізація стандартів східноєвропейських країн по гранично допустимих рівнях електромагнітних полів // Вимірювальна техніка та метрологія.— 2002.— Вип. 61.— С. 33—43.
4. Nichoga V., Dub P., Grudziński E. Peculiarities of European Union countries and Ukraine approach to estimation of technogenic electromagnetic fields influence on biosystems // International Conf. on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET'2006).— Lviv-Slavsko, Ukraine.— 2006.— P. 11—14.
5. Нічoga В., Сопільник Л., Грудзинский Э. и др. Сравнительная оценка предельно допустимых уровней влияния техногенных электромагнитных полей, нормированных в Украине, России и Польше // V Междунар. симпозиум по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии (ЭМС-2003).— Санкт-Петербург, Россия.— 2003.— С. 381—384.
6. Grudziński E., Nichoga V., Sopilnyk L. Aspekty aparaturowe w ochronie przed polami elektromagnetycznymi // Bulletin Wojskowej Akademii Technicznej. Elektronika i Optoelektronika.— 2003.— Vol. VII, N 4.— S. 55—70.
7. Nichoga V., Grudzicki E., Dub P., Isayev I. Calculation and measuring of electromagnetic fields in near zone // VIII International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED'2003).— Lviv, Ukraine.— 2003.— P. 202—207.
8. Grudzicki E. Laboratorium wzorców i metrologii pola elektromagnetycznego w świetle nowych unormowań // Przegląd Telekomunikacyjny.— 2001.— N 8—9.— S. 541—549.
9. Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 2 stycznia 2001r. zmieniające rozporządzenie w sprawie dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy // Dziennik Urzędowy.— 2001.— N 4.— S. 36—51.
10. Державні санітарні норми і правила захисту населення від впливу електромагнітних випромінювань.— Київ: МОЗ України, 1996.
11. Нічoga В. О., Дуб П. Б., Грудзінський Е. М. Гранично допустимі рівні техногенних електромагнітних полів країн Європейського Союзу і України // Вісник НУ «Львівська політехніка». Радіоелектроніка та телекомунікації.— 2006.— Вип. 557.— С. 134—140.
12. Нічoga В. А. Измерение весьма слабых низкочастотных магнитных полей в геофизических и космических исследованиях // Отбор и передача информации. (Львов).— 1993.— Вип. 9 (85).— С. 70—77.
13. Нічoga В. О. Розвиток досліджень по створенню високочутливих давачів змінних магнітних полів у відділі відбору і обробки стохастичних сигналів Фізико-механічного інституту НАНУ // Відбір і обробка інформації. (Львів).— 2004.— Вип. 21.— С. 40—46.
14. Нічoga В., Шабельников В., Дуб П. та ін. Інформаційно-вимірювальна система «Каскад» для діагностики низькочастотних магнітних полів на космічній станції «Мир» // Там же.— 2003.— Вип. 18.— С. 46—52.
15. Nichoga V., Dub P., Sopilnyk L. et al. Usage of information-measuring system «Kaskad» for diagnostics of electromagnetic radiation of some objects // International Conf. on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET'2004).— Lviv-Slavsko, Ukraine.— 2004.— P. 536—539.
16. Нічoga В. А., Сопільник Л. И., Дуб П. Б., Грудзинский Э. Техногенные низкочастотные электромагнитные поля и аварийность на автодорогах // Мат-лы 6-го междунар. симпозиума по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии.— Санкт-Петербург.— 2005.— С. 293—296.