

УДК 621.3.082.63

М.Е. Комнатнов, Т.Р. Газизов

О совместных климатических и электромагнитных испытаниях радиоэлектронной аппаратуры

Выдвинута идея проведения совместных испытаний на температурные и электромагнитные воздействия радиоэлектронной аппаратуры, применяемой в жестких условиях эксплуатации. Собраны данные исследований, показывающие целесообразность проведения подобных испытаний. Рассмотрены возможные механизмы возникновения естественных и искусственных электромагнитных помех в северных широтах. На простом примере гармонического воздействия частотой 1 МГц на диод 1N4148 вычислены амплитуды спектра выходного напряжения при температурах -60 , $+25$, $+200$ °С. Показано изменение амплитуды до 3 раз. Представлены уровни напряженности поля, излучаемого диполем при возбуждении этим напряжением. Выявлен максимум излучения на третьей гармонике.

Ключевые слова: испытания на электромагнитную совместимость, климатические испытания, бортовая радиоэлектронная аппаратура.

Обеспечение жизни и безопасности на территориях Крайнего Севера и Арктики, в силу своей специфики – довольно непростая задача, которая требует проработки многих вопросов. Её решению может помочь внедрение современных технологий и новых конструктивных решений. Например, создание перспективных роботизированных устройств для работы в условиях Севера поможет при исследовании арктических регионов, что сведет к минимуму риск для человека. Разрабатываются различные роботизированные устройства, которые способны выполнить сложные работы в опасных или труднодоступных местах для человека, а также на больших глубинах в подводной акватории океана [1, 2]. В подобных условиях эксплуатации необходимо обеспечить не только проходимость, автономность движения и управления оборудованием робототехнического устройства, но и нормальную работу в заданном диапазоне температур, влажности и заданной электромагнитной обстановке всех радиотехнических блоков и узлов, отвечающих за приемопередачу информации и сигналов управления. На подобных устройствах имеются также и чувствительные к электромагнитному полю (ЭМП) узлы, например видеокамера, которая, как правило, служит для управления и захвата изображения и является «глазами» для человека с пункта управления. Силовых источников возбуждения ЭМП у подобного устройства может быть много, например антенны для передачи и управления, источники вторичного электропитания, устройства индукционного нагрева для стабильной работы критичного к температуре узла и пр. Таким образом, устройство может быть подвержено интенсивным внешним климатическим, а также искусственным и естественным электромагнитным воздействиям, что в отсутствие защиты может вызвать сбой, вывести критичный узел или устройство из строя. Поэтому важно на этапе проектирования выявить особенности конструкции и электро-радиоизделий устройства, которые могут быть излучателями или приемниками ЭМП и одновременно рассеивать тепловую энергию или быть чувствительными к температуре.

Цель работы – привести результаты исследований, показывающих целесообразность проведения совместных климатических и электромагнитных испытаний радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), применяемой в жестких условиях эксплуатации.

Источники возбуждения ЭМП в арктических регионах могут быть как естественные, так и искусственные. Морская вода и лед как естественные источники возбуждения ЭМП издавна изучаются. Из [3, 4] известно, что течения и волны создают ЭМП, которые в морях и океанах представляют собой совокупность полей различных источников (магнитотеллурических, гидродинамических, физико-химических, грозových) со сложным распределением амплитуд во времени и пространстве. Наличие специфических электрических и магнитных полей обусловлено гидродинамическими, физико-химическими и биоэлектрическими процессами. Особенность морских ЭМП обусловлена тем, что морская вода является хорошим проводником электричества и представляет собой совершенный экран для высокочастотных колебаний. Морской лед по своим электрофизическим свойствам не

может быть строго отнесен к чистым диэлектрикам и представляет собой сочетание диэлектрических кристаллов и проводящей жидкой фазы в межкристаллических прослойках. Электрофизические эффекты, близкие к эффектам в чистых диэлектриках, но со специфическими особенностями, возникают при пластической деформации с формированием внутрикристаллических микротрещин. Способность возбуждения морским льдом естественных ЭМП радиодиапазона при деформационных процессах, в частности при упругой деформации льда, может происходить вследствие так называемого параметрического механизма. Кроме параметрического механизма возбуждения естественных ЭМП, в процессе образования микротрещины действует механизм, связанный с дискретным характером ее роста. Каждая микротрещина образуется в результате последовательности актов микроразлома, при этом для разделенных зарядов обеспечивается движение с ускорением и за счет этого возбуждается переменное (импульсное) ЭМП преимущественно большей мощности по сравнению с другими типами возбуждения. Путем синхронной регистрации импульсов (акустической эмиссии, оптической эмиссии, естественных ЭМП, сигнализирующих о возникновении микротрещины) экспериментально подтверждено существование искровых электрических разрядов при образовании микротрещин во льду. Например, с высоты 100 м по маршруту полета, пересекающему участок припайного льда и кромку припая, зарегистрировано возрастание напряженности естественных ЭМП от 3 до 5 мВ/м с приближением к кромке припая (рис. 1) [4].

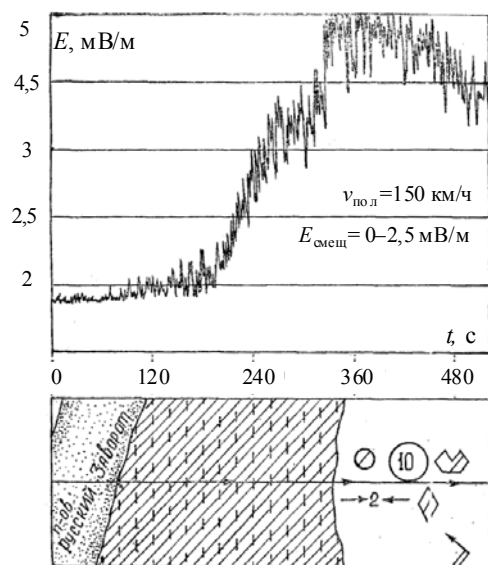


Рис. 1. Возрастание напряженности естественных ЭМП (от 3 до 5 мВ/м) с приближением к кромке припая (сжатие в районе кромки 2 балла) [4]

Таким образом, естественные ЭМП в арктических регионах возникают, но амплитуды их воздействия на чувствительные узлы критичной РЭА недостаточны для вывода их из строя. Однако подобные явления могут проявляться в виде шумов, добавляющихся к полезному сигналу. Это может потребовать дополнительной защиты от естественных ЭМП или их фильтрации, например в высокочувствительной приемной или измерительной аппаратуре.

Источником искусственного возбуждения ЭМП в арктических регионах может являться радиосвязь. Применение комбинированной СВ-КВ-УКВ-радиосвязи с глобальной навигационной спутниковой системой способно решить практически все задачи мониторинга сухопутного и водного транспорта Крайнего Севера и Арктики РФ [5, 6]. Применение радиосвязи может быть очень интенсивным в связи со сбоями навигаторов. Действительно, глобальная навигационная система состоит из группы спутников, располагающихся на круговой орбите (высота около 19100 км). Исследования в США ещё в 1969 г. показали, что на космических аппаратах (КА) могут возникнуть электрические потенциалы высокого уровня за счет взаимодействия элементов конструкции КА с горячей разреженной плазмой [7]. При этом накапливается заряд на различных частях КА в зависимости от его конструкции и материала, который перераспределяется с возможным возникновением электростатического разряда (ЭСР), в зависимости от внешних условий: температуры, концентрации плазмы и солнечного освещения. Оснащенные чувствительной электроникой, современные КА подвержены уязвимости со стороны излучаемых и кондуктивных электромагнитных помех, созданных ЭСР. При этом разряды, возникающие на внешней поверхности, могут наводить помехи на внутренние элементы, что может вызвать катастрофический отказ в работе бортовой РЭА. Причинами отказа многих зарубежных КА называли ЭСР, который мог происходить в период сильной геомагнитной возмущенности магнитосферы при высокой солнечной активности. Результаты (таблица) аномалий на зарубежных КА из-за ЭСР приведены в работе [8]. Примечательно, что на круговой орбите в арктических регионах такая активность может особенно сильно проявляться, а переход к компонентной базе, использующей более низкие уровни напряжений сигнала, обостряет эту проблему.

Результаты аномалий на зарубежных КА [8]

Дата	Спутник	Причины неисправности	Нарушения в работе систем
02.06.1973	DSCS2/9431	Высокоэнергетический разряд после геомагнитной суббури	Связь
23.11.1974	Skynet2B	Внутренние разряды. 300 аномалий за 1975–1976 гг.	Телеметрия
19.12.1974	Symphonie A	Дуговой разряд	Модуляция
20.08.1975	Viking 1	Дуговой разряд после запуска	Программа экспериментов
27.08.1975	Symphonie	Дуговой разряд	Модуляция
17.01.1976	CTS	215 кратковременных разрядов	Система электроснабжения
23.11.1977	Meteosat FI	ЭСР, 150 аномалий к 1980 г.	Радиометр, система ориентации
29.03.1981	GOES 4	Электромагнитный импульс	25.11.1982 прекратились сигналы радиометра
15.11.1981	SBS 1	ЭСР после запуска в течение 8 лет	Устройство для контроля местонахождения спутника
27.02.1982	Marecs-A	ЭСР, поверхностный заряд	Телеметрия, система ориентации
22.09.1982	SCATHA	Зарегистрировано большое число разрядных процессов	Результаты экспериментов
05.04.1983	TDRS-A	Поверхностный разряд	Система ориентации
04.04.1984	Telecom 1A	Частые ЭСР	Трансляция данных
11.11.1984	AMPTE	ЭСР	Данные, модуляция
12.1984	GMS 3	ЭСР, также 03.04.1985	Акселерометр, радиометр
08.03.1985	Anik D2	Мощный дуговой разряд	Система контроля, антенна
15.03.1985	Arabsat 1A	ЭСР, также 01.06.1986	Система ориентации, мощность, гироскоп
17.07.1985	GPS 5118	ЭСР	Двигатель
01.1986	Aussat A1	ЭСР до 06.1989	Телеметрия, система ориентации
05.1986	Aussat A2	33 ЭСР до 06.1990	Телеметрия, система ориентации
27.09.1986	GOES 6	ЭСР, также 17.03.1987	Радиометр
11.1986	DSCS2/9442	Мощный диэлектрический разряд, также 03.1987	Компьютеры
11.1986	DSCS2/9438	Мощный диэлектрический разряд, также 12.1986	Компьютеры
12.1986	NATO 3C	Мощный диэлектрический разряд, также 09.1987	Система ориентации
02.1986	DSCS3/4524	Мощный диэлектрический разряд, также 01.1987	Тахометр
26.02.1987	GOES 7	Разряды до 1989 г.	Радиометр
11.01.1987	NATO 3A	Мощный диэлектрический разряд	Система ориентации
03.1987	DSCS2/9442	Мощный диэлектрический разряд	Компьютеры
03.1987	FlitSatcom	ЭСР	Компьютеры
15.01.1988	Telecom IB	ЭСР	Система ориентации
18.07.1988	Fengyun 1	ЭСР	Система ориентации
01.1991	GMS 4	ЭСР	Радиометр
08.1993	Intelsat 510	ЭСР	Система ориентации
08.1993	Intelsat 511	ЭСР	Система ориентации
20.01.1994	Anik E2	ЭСР, геомагнитная суббуря	Гироскопическая система
20.01.1994	Anik E1	ЭСР, геомагнитная суббуря	Гироскопическая система
20.01.1994	Intelsat K	ЭСР, геомагнитная суббуря	Гироскопическая система
22.01.1994	BS-3A	ЭСР	Телеметрия
09.10.1994	Telstar 401	ЭСР	Стабилизация
14.02.1995	GOES 8	ЭСР, геомагнитная суббуря	Телеметрия
07.11.1995	DFS 3 FM 1	Мощный разряд	Потеря спутника
26.03.1996	Anik E1	ЭСР	Солнечная батарея
11.01.1997	Telstar 401	ЭСР	Потеря спутника
01.09.1998	Sirius 2	ЭСР	Потеря работоспособности части элементов СБ
10.03.2000	ERS1	ЭСР	Потеря спутника
28.04.2000	Turksat 1C	ЭСР	Потеря связи на 55 мин
22.11.2000	Galaxy VII	ЭСР	Потеря спутника
15.12.2001	Yohkoh	ЭСР	Потеря спутника
14.07.2008	EchoStar 2	Предположительно ЭСР	Выход из строя системы энергоснабжения. Утрата КА
22.10.2008	Astra 5A	Предположительно ЭСР	Потеря контроля с последующим восстановлением

Показательно, что в период сильных геомагнитных бурь оказываются уязвимыми не только чувствительная прецизионная электроника, но и силовые цепи питания. Так, например, в работе [9] выполнена оценка стойкости сети электропитания (рис. 2) к воздействию геомагнитных бурь и подобных преднамеренных воздействий: геомагнитно наведенные токи вызвали массово зафиксированные влияния на сеть электропитания в Северной Америке (рис. 3). Как видно из рис. 3, геомаг-

нитно наведенные токи вызвали массово зафиксированные влияния на сеть электропитания в регионах, насыщенных энергетическим оборудованием. Между тем аналогичное кольцо в Арктике могло бы вызвать не меньше влияния. Поскольку в высоких широтах аналогичные явления могут происходить достаточно часто, это может повлиять на работу не только чувствительной РЭА, но и силовых цепей.

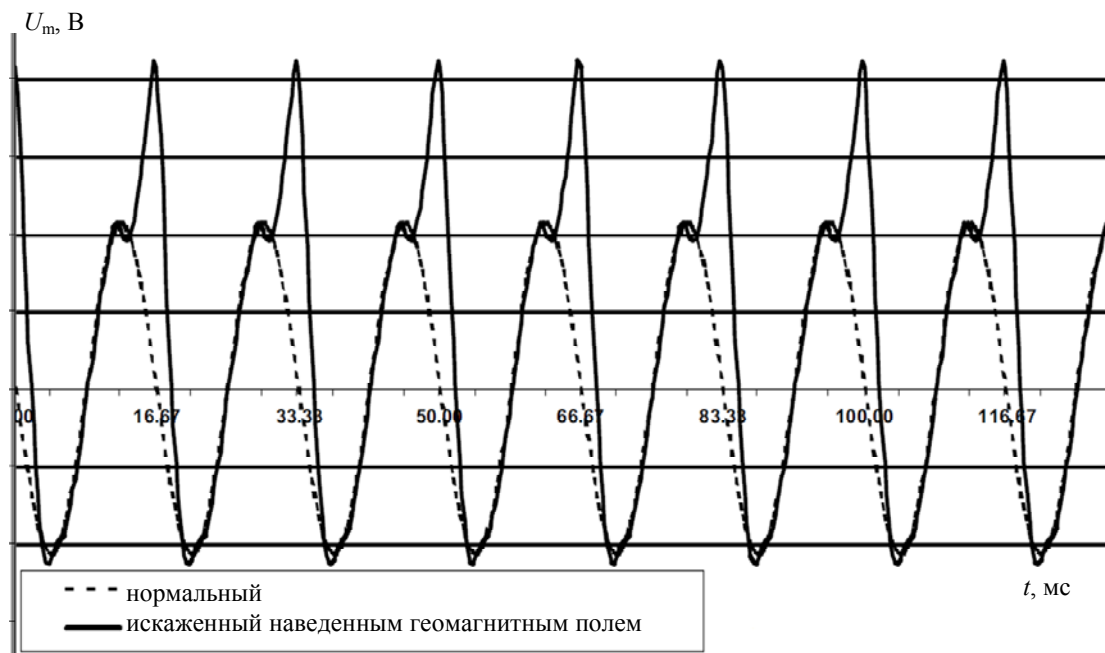


Рис. 2. Трансформатор 500 кВ: нормальный переменный ток (---); переменный ток, искаженный четными и нечетными гармониками из-за полупериодного насыщения трансформатора, вызванного геомагнитно наведенными токами (—) [9]

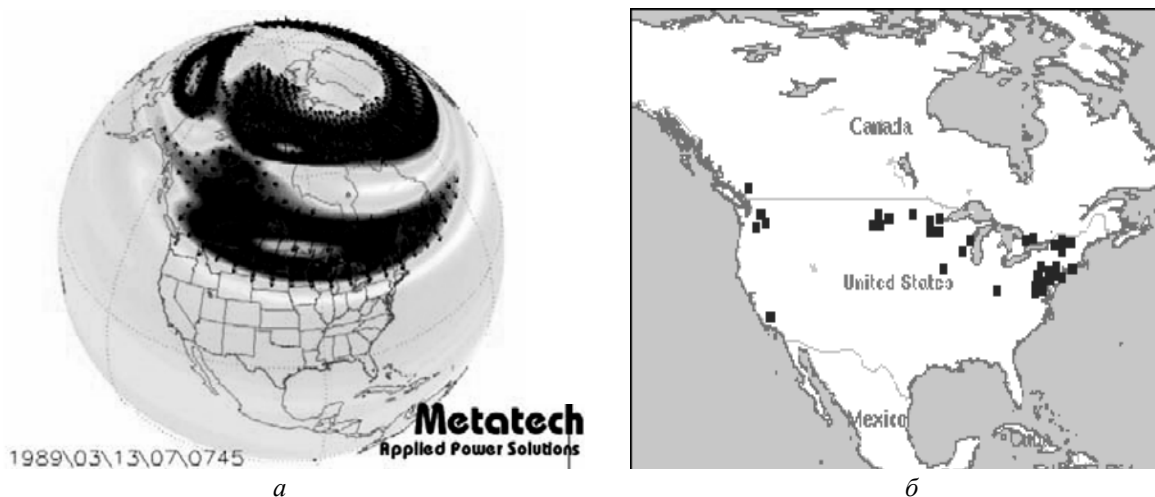
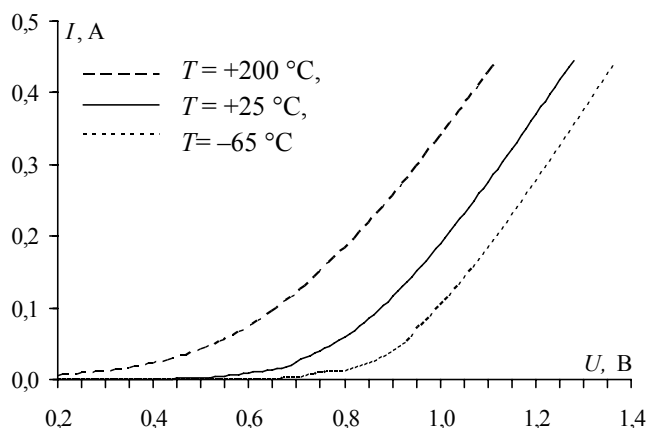


Рис. 3. Карта погоды, с контурами производной от магнитных полей в момент аварии сети питания (Hydro-Quebec, 7:45 UT or 2:45 EST, March 13, 1989) (а). Зафиксированные влияния (■) на сеть питания в Северной Америке, March 13, 1989 time 16:00–17:23 EST (21:00–22:23 UT) (б) [9]

Исследования, связанные с взаимными электромагнитными и температурными влияниями, могут быть полезны не только в части испытаний отдельных радиоэлектронных блоков и узлов бортовой и наземной РЭА, но также помогут в понимании процессов взаимовлияния электромагнитного и температурного полей, которые откроют перспективы совершенствования электронной компонентной базы, например: ПАВ фильтров в керамическом корпусе, полупроводниковых и пассивных RLC компонентов и т.д. Также могут быть получены абсолютно новые результаты исследования на основе известных. Например, в современной РЭА используется большое количество полупроводни-

ковых компонентов, требования по защите которых от ионизирующего и неионизирующего излучений ужесточаются. При этом некоторые из них, работая в активном режиме, могут нагреваться и рассеивать тепловую энергию в окружающее пространство, тем самым нагревая соседние компоненты. Известно, что вольт-амперная характеристика (ВАХ) полупроводникового диода при воздействии температуры сильно изменяется (см., например, рис. 4). Из-за этого меняется амплитуда полезного сигнала. Кроме того, изменяется амплитуда высших гармоник и комбинационных частот вследствие нелинейности ВАХ. При этом печатные проводники платы или провода (свойства которых могут также изменяться от температуры), к которым подключен полупроводниковый компонент, излучают ЭМП на всех этих частотах. Амплитуда излучаемых эмиссий в зависимости от температуры будет также изменяться, а следовательно, будет изменяться воздействие на близлежащие чувствительные цепи, что может быть критичным в случае их слабой помехозащищенности. Примечательно, что существующие стандарты по ЭМС не предусматривают измерения излучаемых эмиссий при воздействии температуры на испытуемый объект. Таким образом, результаты, полученные в ходе испытаний устройства, могут отличаться по уровням излучений и восприимчивости от существующих в реальных условиях эксплуатации.

Рис. 4. ВАХ диода 1N4148 при температурах -60 , $+25$, $+200$ °С



Качественные оценки, приведенные выше, подтверждаются гармоническим воздействием с напряжением 1 В и частотой 1 МГц на диод (рис. 5). Напряжение на нагрузке диода показано на рис. 6. Как видно, оно уменьшается с ростом частоты. Примером для оценки излучаемого ЭМП может являться диполь длиной 10 мм (рис. 7), имитирующий, например, монтажный лепесток с печатной трассой от диода. В программе TALGAT [10] вычислена максимальная напряженность электрического поля от такого диполя, возбуждаемого полезным сигналом и его гармониками (например, диода, подключенного к лепестку) при разных температурах. Из вычисленных значений (см. рис. 6) видно, что на частоте полезного сигнала (1 МГц) уровень напряженности поля вырос в 3 раза, при температуре $+200$ °С по отношению к температуре $+25$ °С и снизился в 1,6 раза при температуре -65 °С. Дальнейшее увеличение уровня напряженности поля пропорционально амплитуде гармоник. На третьей гармонике напряженность поля достигает максимума, увеличившись в 6 раз при температуре $+200$ °С по отношению к полезному сигналу при нормальной температуре. Такой рост обусловлен повышением частоты гармоники при слабом снижении её амплитуды. На четвертой и высших гармониках наблюдается снижение уровня напряженности поля за счет резкого снижения уровня амплитуд гармоник.

Таким образом, для использования критичной РЭА в условиях Арктики и Крайнего Севера может оказаться целесообразным проведение дополнительных испытаний, предполагающих одновременное воздействие температурного и электромагнитного полей на чувствительные объекты или цепи устройства, с целью совершенствования их защиты и предотвращения сбоев. Полученные в ходе испытания знания о взаимовлиянии внутренних и внешних электромагнитных и климатических воздействий в испытуемом объекте помогут обнаружить в устройстве скрытые и уязвимые к ЭМП места, что повысит помехозащищенность устройства в целом.

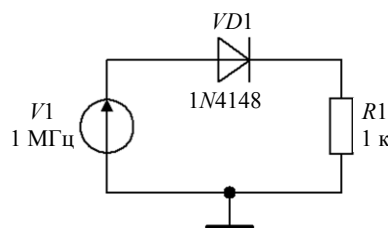


Рис. 5. Схема воздействия на диод 1N4148

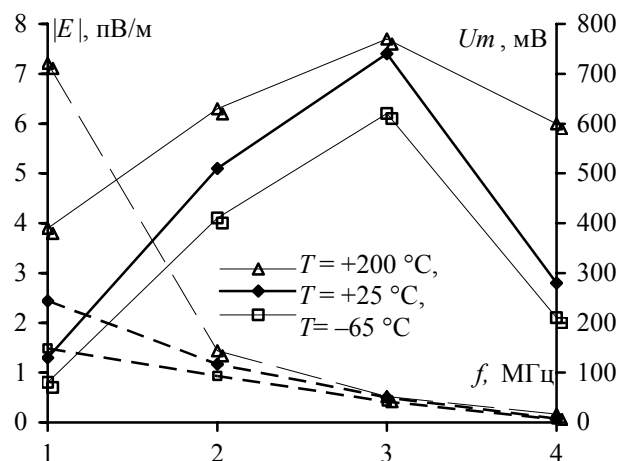


Рис. 6. Уровни напряженности поля (—), созданные диполем, возбуждаемым амплитудами U_m (---), на частотах 1, 2, 3, 4 МГц

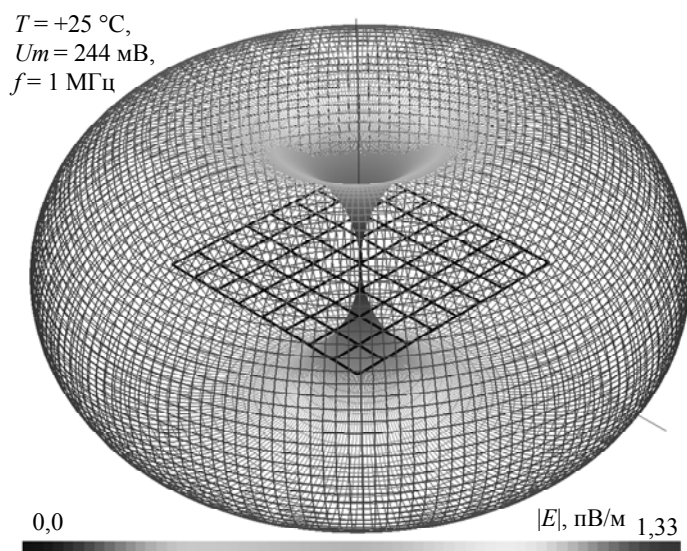


Рис. 7. Диаграмма направленности и уровень напряженности электрического поля, созданного диполем длиной 10 мм над проводной сеткой размерами 100×100 мм

Исследование проведено в рамках выполнения государственного задания №8.1802.2014/К Минобрнауки России и грантов РФФИ 13-07-98017, 14-29-09254.

Литература

1. Кудряшов В.Б. Проблемы роботизации ВВТ в части наземной составляющей / В.Б. Кудряшов, В.С. Лапшов, В.П. Носков, И.В. Рубцов // Изв. ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 3. – С. 42–57.
2. Войнов И.В. Робототехника в Миасском филиале Южно-Уральского государственного университета / И.В. Войнов, Б.А. Морозов // Всерос. науч.-практ. конф. «Развитие Арктики и приполярных регионов»: сб. матер. – Екатеринбург: УРФУ, 2014. – С. 57–66.
3. Фонарев Г.А. Электромагнитное поле Мирового океана и его использование для строения дна и водной оболочки: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.12. – М., 1982. – С. 348.
4. Доронин Ю.П. Электромагнитное поле океана / Ю.П. Доронин, И.А. Степанюк. – СПб.: Изд-во РГГМИ, 1992. – 87 с.
5. Березовский В.А. Сеть автоматической комбинированной СВ-КВ-УКВ-радиосвязи для мониторинга и передачи данных сухопутного и водного транспорта Крайнего Севера и Арктики / В.А. Березовский, В.В. Фомин, В.Л. Хазан // 2-я Всерос. науч.-техн. конф. «Научное и техническое обеспечение исследований и освоения шельфа Северного Ледовитого океана»: труды конф. – Новосибирск, 2013. – С. 232–237.

6. Дулькейт И.В. Перспективы использования средневолнового диапазона для информационного взаимодействия хозяйствующих субъектов в Арктике и обеспечения безопасности мореплавания в акватории Северного морского пути / И.В. Дулькейт, С.А. Завьялов, В.Л. Хазан // Всерос. науч.-практ. конф. «Развитие Арктики и приполярных регионов»: сб. матер. – Екатеринбург: УРФУ, 2014. – С. 181–184.
7. Иванов В.А. Модельные и стендовые исследования электризации космических аппаратов / В.А. Иванов, В.Ю. Кириллов, Е.П. Морозов. – М.: Изд-во. МАИ, 2012. –168 с.
8. Соколов А.Б. Обеспечение стойкости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов к воздействию электростатических разрядов: дис. д-ра техн. наук. – М.: МИЭМ, 2009.
9. Kappenman J.G. Electric Power Grid Vulnerability to Natural and Intentional Geomagnetic Disturbances // J.G. Kappenman, W.A. Radasky, J.L. Gilbert // Proc. of the 16th Int. Zurich Symp. on EMC. – Zurich, Switzerland, 2005. – P. 447–450.
10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013619615. TALGAT 2012 / Газизов Т.Р., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Т., Куксенко С.П., Заболоцкий А.М., Аширбакиев Р.И., Лежнин Ев.В., Лежнин Ег.В., Салов В.К., Орлов П.Е., Калимулин И.Ф., Суровцев Р.С., Комнатнов М.Е., Газизов Р.Р., Ахунов Р.Р. – Заявка №2013617773. Дата поступления 29 авг. 2013 г. – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 11 октября 2013 г.

Комнатнов Максим Евгеньевич

Аспирант каф. телевидения и управления ТУСУРа

Тел.: 8-952-888-38-96

Эл. почта: maxmek@mail.ru

Газизов Тальгат Рашитович

Д-р техн. наук, ст.науч.сотрудник, профессор каф. телевидения и управления

Тел.: 8 (383-2) 41-34-39

Эл. почта: talgat@tu.tusur.ru

Komnatnov M.E., Gazizov T.R.

On joint climatic and electromagnetic testing of radioelectronic equipment

In the article we propose an idea of the relevance of joint tests on climatic and electromagnetic effects of electronic equipment used in harsh environments. Collected research data proves practicability of such tests. Possible mechanisms of natural and artificial electromagnetic interference in the northern latitudes are considered. The amplitude spectrum of the output voltage at temperatures of -60 , $+25$, $+200$ °C is calculated on a simple example of the 1 MHz harmonic excitation of 1N4148 diode. The change of the amplitude up to 3 times is shown. The radiation pattern and levels of field strength radiated by dipole when excited by these amplitudes are presented. Radiation maximum at the third harmonic is revealed at a diod temperature of $+200$ °C.

Keywords: EMC-testing, climate testing, airborne radioelectronic equipment.