

II. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

Научная статья

УДК 621.3.095.3

РАСЧЁТ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУВОЛНОВЫХ ВИБРАТОРОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ СООТВЕТСТВИЯ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ ПЛОЩАДОК ДЛЯ КАЛИБРОВКИ АНТЕНН ЭМС

Максим Сергеевич Шкуркин^{1✉}, Денис Владимирович Логутов²

^{1,2} ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия

¹ shkurkin@vniiftri.ru✉, РИНЦ AuthorID: 602167

² dv_logutov@vniiftri.ru, SPIN-код: 5240-3170

Аннотация. В статье обоснована необходимость учёта механических деформаций антенных элементов полуволновых резонансных диполей при выполнении измерений вносимых потерь испытательных площадок для калибровки антенн, применяемых в процессе испытаний технических средств на электромагнитную совместимость класса CALTS, а также опорных испытательных площадок класса REFTS.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, калибровка антенн, пластина заземления, измерения над пластиной заземления, площадка для калибровки антенн, SIL, CALTS, REFTS, вносимые потери площадки

Для цитирования: Шкуркин М.С., Логутов Д.В. Расчёт характеристик полуволновых вибраторов для оценки соответствия испытательных площадок для калибровки антенн ЭМС // Альманах современной метрологии. 2026. № 2 (46). С. 47–69.

II. Antennas, microwave devices and their technologies

Original article

COMPUTATION OF HALF-WAVE PRECISION DIPOLE ANTENNAS FOR CALIBRATION TEST SITE VALIDATION

Maxim S. Shkurkin^{1✉}, Denis V. Logutov²

^{1,2} FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region, Russia

¹ shkurkin@vniiftri.ru✉, RSCI AuthorID: 602167

² dv_logutov@vniiftri.ru, SPIN-code: 5240-3170

Abstract. The article substantiates the need to take into account the mechanical deformations of antenna elements of half-wave resonant dipoles when measuring site insertion loss of test sites for antenna calibration CALTS and reference test sites REFTS.

Keywords: electromagnetic compatibility, antenna calibration, ground plane, measurements above the ground plane, antenna calibration test site, SIL, CALTS, REFTS, site insertion loss

© Шкуркин М.С., Логутов Д.В., 2026

Almanac of Modern Metrology № 2 (46) 2026

For citation: Shkurkin M.S., Logutov D.V. Computation of half-wave precision dipole antennas for calibration test site validation. *Almanac of Modern Metrology*. 2026; 46 (2): 47–69.

Введение

В мировом сообществе испытательные площадки, применяемые для решения задач обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС), принято разделять на классы. Наиболее распространённой является классификация по международным стандартам CISPR 16-1-5:2014¹ и CISPR 16-1-6:2014², а именно:

- Compliance Test Site (COMTS) — площадки для испытаний на ЭМС. Это основной вид площадок, которыми оснащены испытательные лаборатории по всему миру;
- Calibration Test Site (CALTS) — площадки для измерений коэффициента калибровки антенн, используемых в качестве измерительных при проведении испытаний на помехоэмиссию и помехоустойчивость. Это площадки эталонного класса, которыми оснащаются национальные метрологические институты, ведущие испытательные и калибровочные лаборатории;
- Reference Test Site (REFTS) — опорные испытательные площадки. Это тоже площадки эталонного класса, но применяют их для оценки соответствия площадок для испытаний на ЭМС, то есть площадок типа COMTS;
- Ideal Open Area Test Site (Ideal OATS) — идеальная открытая испытательная площадка. Эта площадка — математическая абстракция, представляющая собой бесконечно тонкую идеально плоскую абсолютно отражающую поверхность неограниченных размеров. На практике стремятся, чтобы характеристики CALTS и REFTS максимально приближались к характеристикам идеальной площадки.

Общим признаком для всех указанных площадок является наличие металлической подстилающей поверхности — пластины заземления (рис. 1), которая позволяет обеспечить единство и воспроизводимость результатов измерений на этих площадках в диапазоне частот от 30 до 1000 МГц. На площадки класса CALTS и REFTS распространяются более жёсткие требования — поблизости не должны присутствовать здания, сооружения, деревья и иные токопроводящие конструкции (включая защиту от атмосферных осадков), искажающие интерференционную картину формирующегося в рабочей зоне площадки электромагнитного поля.

¹ CISPR 16-1-5:2014. Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods — Part 1-5: Radio disturbance and immunity measuring apparatus — Antenna calibration sites and reference test sites for 5 MHz to 18 GHz.

² CISPR 16-1-6:2014. Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods — Part 1-6: Radio disturbance and immunity measuring apparatus — EMC antenna calibration.



Рис. 1. Испытательная площадка для калибровки антенн на примере CALTS, развёрнутой в ETS-Lindgren, Сидар-Парк, Техас, США

Fig. 1. Example of antenna calibration test site in ETS-Lindgren, Cedar Park, Texas, USA

Основной нормируемой характеристикой CALTS и REFTS являются вносимые потери площадки (Site Insertion Loss, SIL) — это ослабление между парой согласованных по поляризации антенн, полученное в условиях, когда прямое электрическое соединение между выходом измерительного генератора и входом измерительного приёмника (посредством радиочастотных кабельных сборок и аттенюаторов) замещают парой антенн — излучающей и приёмной, размещённых определённым образом на площадке. Аналитически это представлено в виде:

$$A_i = U_{\text{DIRECT}} - U_{\text{SITE}}, \quad (1)$$

где A_i — вносимые потери площадки, дБ; U_{DIRECT} — напряжение на входе измерительного приёмника при его подключении напрямую к генератору, дБ (мкВ); U_{SITE} — напряжение на входе измерительного приёмника при его подключении к выходу приёмной антенны, дБ (мкВ).

По своей сути вносимые потери площадки эквивалентны коэффициенту передачи системы «вход излучающей антенны — среда распространения — выход приёмной антенны» с учётом потерь в тракте.

Требования к допустимым значениям вносимых потерь площадки классов CALTS и REFTS регламентированы CISPR 16-1-5 и описаны ниже. Соответствие (аттестация) площадки установленным требованиям оценивается на основе расчётно-экспериментального подхода с применением специальных антенн, в качестве которых в большинстве случаев используют прецизионные полуволновые резонансные диполи. Пара таких антенн устанавливается

на аттестуемой площадке на определённую высоту, связанную с контрольной частотой, и выполняются измерения U_{SITE} . Таким образом определяют значения вносимых потерь площадки с учётом всех влияющих на неё факторов — кривизна и ограниченные размеры пластины заземления, влияние антенных мачт и сторонних предметов и т. д. Расчётная часть этого подхода заключается в определении теоретических значений вносимых потерь площадки для той же пары антенн, но «размещённых» на идеальной площадке Ideal OATS. «Размещение» осуществляется математически, но характеристики математической модели антенн должны быть идентичны характеристикам реальных образцов, используемых на этапе измерений. Это касается как радиотехнических характеристик антенн, так и механических.

Настоящая статья посвящена оценке и учёту именно механических свойств дипольных антенн как одного из доминирующих источников неопределённости измерений вносимых потерь площадки SIL, особенно в низкочастотной области. Обусловлено это, прежде всего, тем, что плечи полуволновых дипольных антенн имеют достаточно большие линейные размеры (около 2,5 м каждое) и подвержены механическим деформациям типа «изгиб», что влияет на комплексное сопротивление антенн, меняя характеристики согласования, амплитудные характеристики, и в конечном счёте приводит к некорректному расчёту вносимых потерь площадки SIL. Применение систем обезвешивания диполей, диэлектрических подставок под диполи, блоков и иных конструктивных мер для «выпрямления» вибраторов лишь усложняет и без того трудоёмкий процесс измерений SIL. В статье предложено использовать среды электродинамического моделирования для расчёта SIL идеальной площадки с учётом действительных характеристик дипольных антенн, включая деформационные изменения их конструкции, а также приведены результаты такого расчёта, выполненного для одного коммерчески доступного комплекта прецизионных полуволновых вибраторов.

Критерий соответствия площадок CALTS и REFTS и расчётно-экспериментальный подход к оценке их характеристик

Площадки для калибровки антенн и опорные испытательные площадки могут быть применены по назначению, в случае если их характеристики удовлетворяют требованиям стандарта CISPR 16-1-5, а именно — если на всех частотах, используемых для калибровки антенн, выполняется условие согласно (2):

$$|A_{ic}(f) - A_{im}(f)| < \Delta \text{SIL}(f) - \Delta A_{im}(f), \quad (2)$$

где $A_{ic}(f)$ — расчётное значение SIL на определённой частоте дБ; $A_{im}(f)$ — измеренное значение SIL на определённой частоте, дБ; $\Delta A_{im}(f)$ — неопределённость измерений SIL ($k = 2$), дБ; $\Delta \text{SIL}(f)$ — допустимое отклонение SIL,

равное 1,0 дБ для площадок класса CALTS и REFTS на горизонтальной поляризации, равное 1,5 дБ для площадок класса REFTS на вертикальной поляризации.

Анализируя формулу (2), легко сделать вывод, что критерий соответствия площадки CALTS и REFTS достаточно жёсткий. В практических случаях при значении неопределённости измерений $\Delta A_{im}(f)$ на уровне 0,35 дБ [1] оставшийся «допуск» составляет 0,65 дБ для горизонтальной и 1,15 дБ для вертикальной поляризаций. В бюджет этого «допуска» входит:

- неточность расчёта $A_{ic}(f)$;
- неидеальность самой площадки, то есть кривизна пластины заземления и её ограниченные размеры;
- влияние сторонних предметов, включая антенные мачты, штативы, кабельные сборки;
- прочие факторы.

Как было отмечено во введении, оценка соответствия той или иной испытательной площадки выполняется на основе расчётно-экспериментального подхода, в соответствии с которым необходимо максимально точно определить теоретическое значение SIL $A_{ic}(f)$ идеальной площадки с размещёнными на ней моделями реальных антенн и достоверно измерить SIL испытательной площадки $A_{im}(f)$. Схематично это показано на рис. 2.

Измерения SIL включают три последовательных этапа. На первом этапе проволочные элементы дипольных антенн отсоединяют от симметрирующих устройств. Фланцы симметрирующих устройств приёмной и передающей антенн с помощью перемычек соединяют для измерений опорного напряжения U_{r1} , дБ (мкВ), на фиксированной частоте.

Измерив опорное напряжение U_{r1} , переходят ко второму этапу. Симметрирующие устройства антенн отсоединяют друг от друга и подключают к ним антенные элементы (вибраторы). Далее антенны устанавливают в требуемое положение на площадке и измеряют напряжение U_{SITE} , дБ (мкВ), на той же частоте и с теми же настройками измерительного генератора и измерительного приёмника.

Третий этап аналогичен первому, но результатом измерений является значение напряжения U_{r2} , дБ (мкВ). Разница между значениями напряжений U_{r1} и U_{r2} не должна превышать 0,2 дБ; в противном случае необходимо проверить стабильность системы и повторить все три этапа.

Значения измеренных SIL $A_{im}(f)$, дБ, рассчитывают по формуле 3:

$$A_{im} = U_{DIR} - U_{SITE}, \quad (3)$$

где U_{DIR} — среднее арифметическое между U_{r1} , U_{r2} , дБ (мкВ).

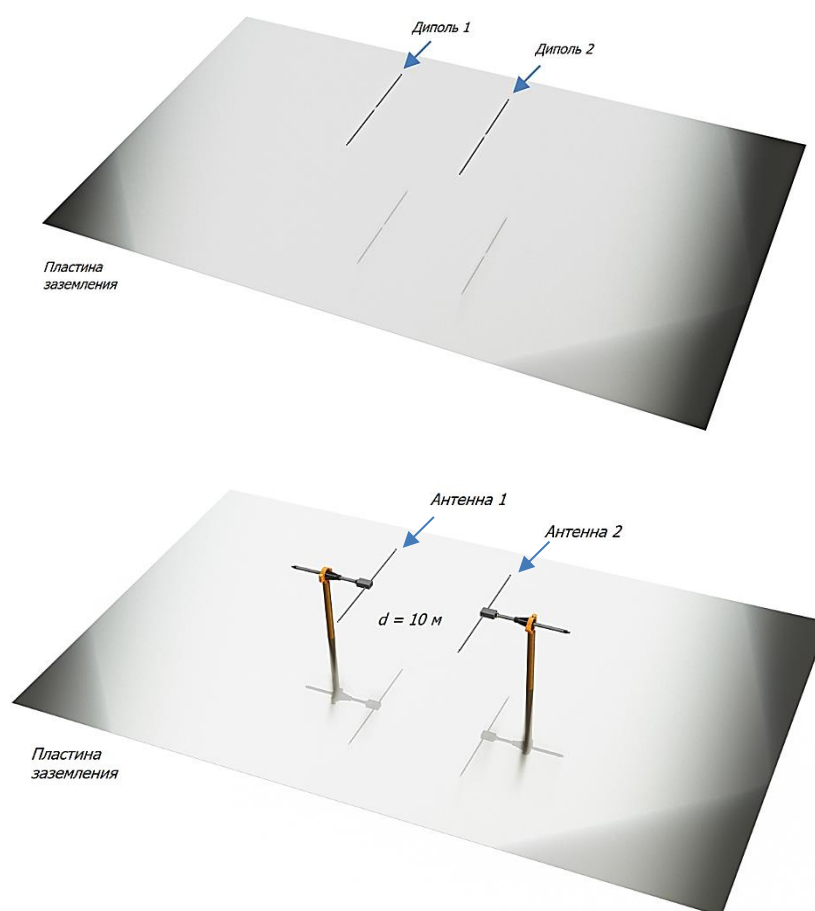


Рис. 2. Модели идеальной площадки с размещёнными на ней полуволновыми диполями (вверху) и реальной площадки с установленными на мачтах измерительными антеннами (внизу) (d — измерительное расстояние)

Fig. 2. Models of an ideal site with half-wave dipoles placed on it (above) and a real site with measuring antennas mounted on masts (below) (d — measurement distance)

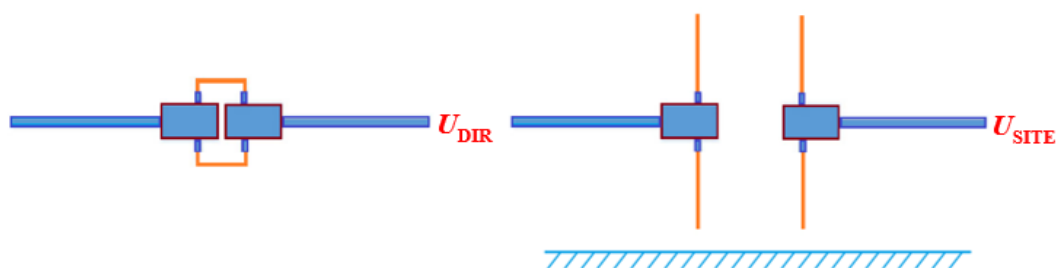


Рис. 3. Этапы измерений вносимых потерь площадки SIL:
слева — этапы 1 и 3; справа — этап 2

Fig. 3. The steps of SIL measuring: on the left — steps 1 and 3; on the right — step 2

Измерения $A_{im}(f)$ выполняют на всех частотах в пределах 30–1000 МГц, на которых планируется калибровка антенн. Как правило, это 24 номинала частоты, неравномерно распределённые по указанному выше диапазону. Для случая полуволновых резонансных диполей, используемых при измерениях $A_{im}(f)$, это означает 24 номинала длины плеч диполя, на которых он резонирует. При этом симметрирующие трансформаторы антенн являются устройствами широкополосными, не требуют такой тонкой настройки и юстировки, как вибраторы, и измерения U_{DIR} могут быть выполнены достаточно оперативно, особенно при использовании вместо приёмника и генератора сигналов векторного анализатора цепей.

Выполнив измерения вносимых потерь площадки $A_{im}(f)$, переходят к расчётам теоретических значений вносимых потерь $A_{ic}(f)$ в тех же частотных точках, в которых были выполнены измерения. Для этого на основе подхода, предложенного в [2], необходимо рассчитать коэффициент передачи площадки, представленной в виде эквивалентной модели двухпортового устройства (рис. 4, верхняя схема). Последнее представляет собой каскадное соединение четырёхполосников, каждый из которых эквивалентен:

- выходному порту измерительного генератора;
- кабельной сборке излучающей антенны;
- симметрирующему устройству излучающей антенны;
- испытательной площадке с антенными элементами излучающей и приёмной антенн;
- симметрирующему устройству приёмной антенны;
- кабельной сборке приёмной антенны;
- входному порту измерительного приёмника.

Стандарт CISPR 16-1-5 предполагает упрощение этой каскадной схемы до эквивалентного четырёхполосника (на рис. 4 внизу). При этом теоретическое значение вносимых потерь площадки SII A_{ic} на каждой частоте рассчитывается следующим образом:

$$A_{ic} = \frac{(Z_{AB} + Z_1 + Z_3)(Z_{CD} + Z_2 + Z_3) - Z_3^2}{Z_3(Z_{AB} + Z_{CD})}, \quad (4)$$

где Z_1 , Z_2 , Z_3 — комплексные сопротивления четырёхполосника, эквивалентного испытательной площадке с установленными на ней антенными элементами дипольных антенн, Ом; Z_{AB} , Z_{CD} — комплексные сопротивления симметричных портов, вносимые схеме симметрирующими устройствами излучающего и приёмного диполей соответственно, Ом.

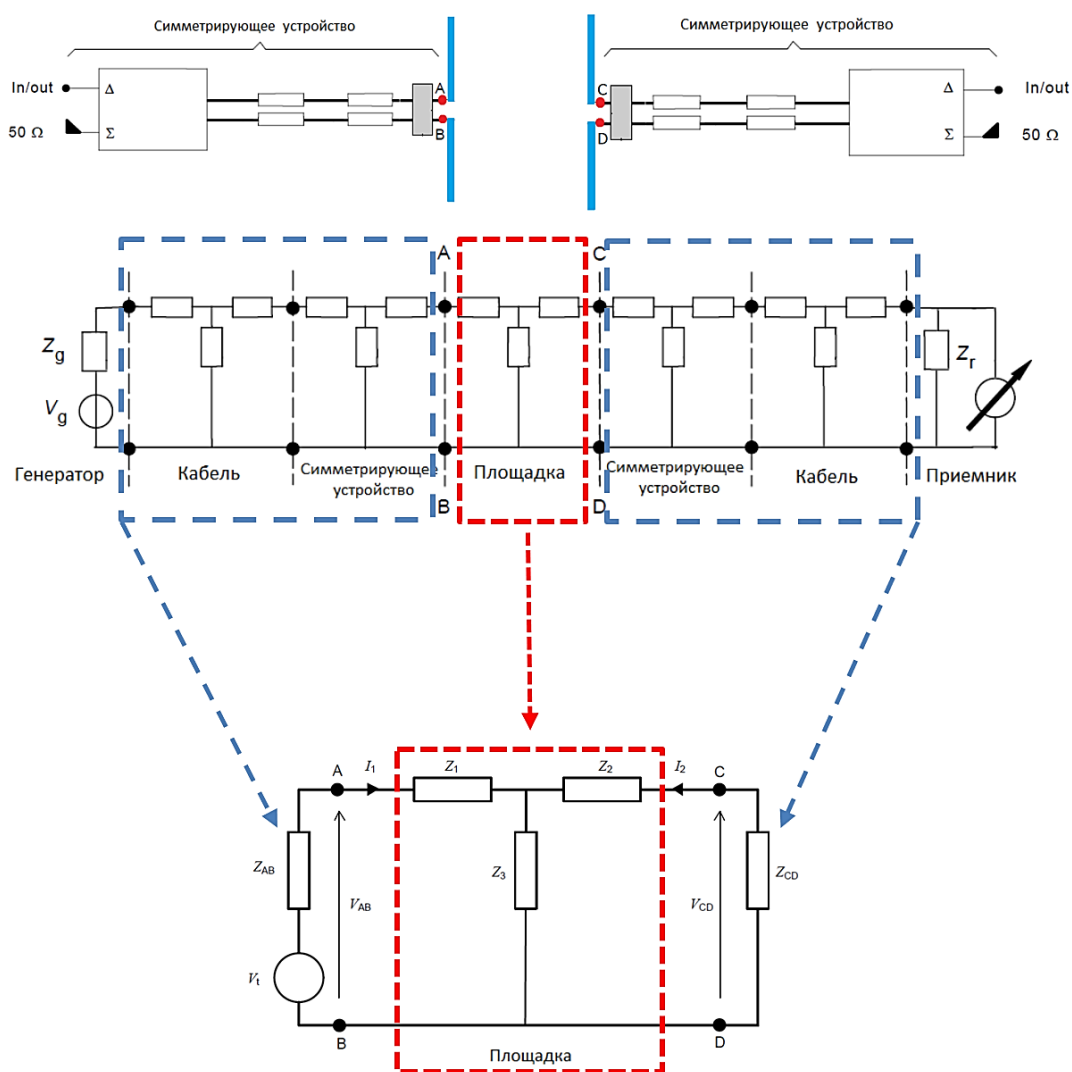


Рис. 4. Эквивалентные схемы, используемые для расчёта вносимых потерь площадки SIL (обозначения см. в стандарте CISPR 16-1-5)

Fig. 4. Equivalent networks used to SIL calculate (see the CISPR 16-1-5 standard for the legend)

Комплексные сопротивления Z_{AB} , Z_{CD} определяются по результатам прямых измерений симметрирующих трансформаторов (устройств) антенн, как правило, до начала измерений SIL. На практике вместо Z -матрицы комплексных сопротивлений более удобно использовать матрицу рассеяния, то есть матрицу S -параметров, описывающую свойства каждого двухпортового устройства. Тогда функциональная схема последовательного соединения двухпортовых устройств и соответствующие им S -матрицы будут выглядеть, как на рис. 5.

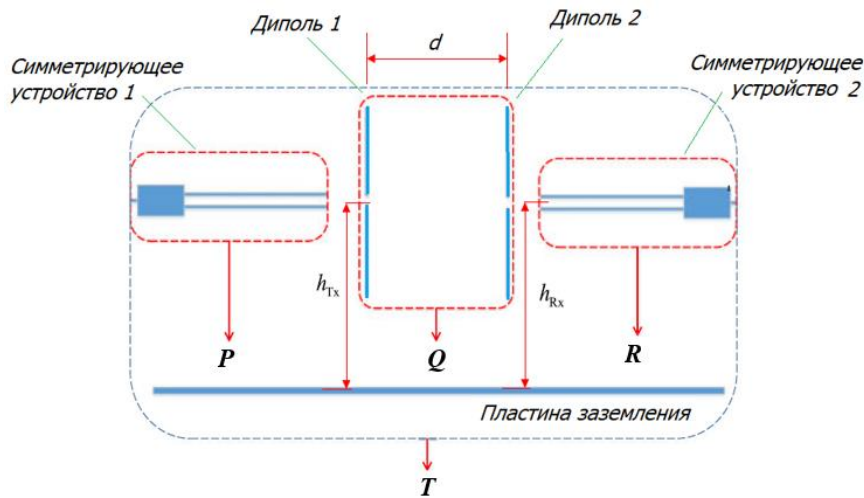


Рис. 5. К расчёту теоретического значения вносимых потерь площадки:
 P и R — матрицы рассеяния симметрирующего устройства излучающей и приёмной антенн соответственно; Q — матрица рассеяния площадки с антенными элементами диполей;
 T — матрица рассеяния, описывающая свойства идеальной площадки с учётом действительных характеристик измерительных антенн; d — измерительное расстояние;
 h_{tx} и h_{rx} — высоты подъёма излучающей и приёмной антенн

Fig. 5. To calculate the theoretical Site Insertion Loss: P and R are the scattering matrices of the balun of the transmit and receive antennas, respectively; Q is the scattering matrix of the site with antenna elements of dipoles; T is the scattering matrix describing the properties of the ideal site, taking into account the actual characteristics of the measuring antennas; d is the measuring distance; h_{tx} and h_{rx} are the heights of the transmit and receive antennas

В этом случае S -параметры симметрирующих устройств дипольных антенн (P — излучающая; R — приёмная) описываются матрицами:

$$P = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{21} & p_{22} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Матрица S -параметров четырёхполосника, эквивалентного антенным элементам прецизионных полуволновых резонансных диполей, взаимодействующих друг с другом над металлической пластиной заземления идеальной открытой испытательной площадки Ideal OATS (матрица Q), представляется в виде:

$$Q = \begin{pmatrix} q_{11} & q_{12} \\ q_{21} & q_{22} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

S -параметры каскадного соединения симметрирующего устройства излучающей антенны, площадки и симметрирующего устройства приёмной антенны (матрица T) описываются как:

$$T = \begin{pmatrix} t_{11} & t_{12} \\ t_{21} & t_{22} \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Тогда вносимые потери площадки (в логарифмическом масштабе) A_{ic} вместо выражения (4) будут определяться модулем комплексного коэффициента передачи, а именно:

$$A_{ic} = 20 \lg \left(\left| \frac{1}{t_{21}} \right| \right) = 20 \lg \left(\left| \frac{(1 - p_{11}q_{11})(1 - q_{22}r_{11}) - p_{11}q_{12}q_{21}r_{11}}{p_{12}q_{21}r_{21}} \right| \right). \quad (9)$$

В этой статье объектом исследований является именно матрица Q и прежде всего коэффициенты передачи $q_{21} = q_{12}$, которые определяют вносимые потери идеальной площадки с размещёнными на ней дипольными элементами измерительных антенн без учёта характеристик их симметрирующих устройств.

В стандарте CISPR 16-1-5 в качестве примера приведены значения A_{ic} для идеального проволочного диполя, свойства которого на практике не достижимы. Использовать эти значения при оценке соответствия реальной площадки CALTS или REFTS не представляется возможным. Единственным выходом из данной ситуации является поиск оптимального для этих задач программного продукта для электродинамического расчёта матрицы Q с учётом действительных механических характеристик прецизионных дипольных антенн, используемых при фактических измерениях вносимых потерь SIL.

Выбор программных продуктов для моделирования

Стандарт CISPR 16-1-5 рекомендует применение численного электромагнитного кода (Numerical Electromagnetics Code, NEC) для расчёта теоретического значения вносимых потерь площадки SIL $A_{ic}(f)$. Расчёты в программе NEC основаны на решении интегрального уравнения электрического поля для тонких проводов и интегрального уравнения магнитного поля для замкнутых проводящих поверхностей методом моментов (Method of Moments, MoM). Начиная с 1970-х годов программа NEC была общедоступна, но пользование последней генерацией этой программы¹ происходит на платной основе. Тем не менее предыдущие генерации программы остаются в свободном доступе и весьма популярны среди как профессионалов, так и радиолюбителей. Стоит отметить, что пример расчёта значений SIL, приведённый в CISPR 16-1-5, также выполнен на основе кода NEC, который реализует программа CAP2010². В настоящей работе была использована программа 4nec2³ (рис. 6).

¹ NEC, v5.0 / IPO. Innovation and Partnership Office. URL: <https://softwarelicensing.llnl.gov/product/nec-v50> (дата обращения: 15.05.2026).

² Calculable Antenna Processor (CAP2010) / National Physical Laboratory (NPL). URL: www.npl.co.uk/resources/software/antenna-processor-cap2010 (дата обращения: 15.05.2026).

³ 4nec2. URL: <https://www.qsl.net/4nec2/> (дата обращения: 15.05.2026).

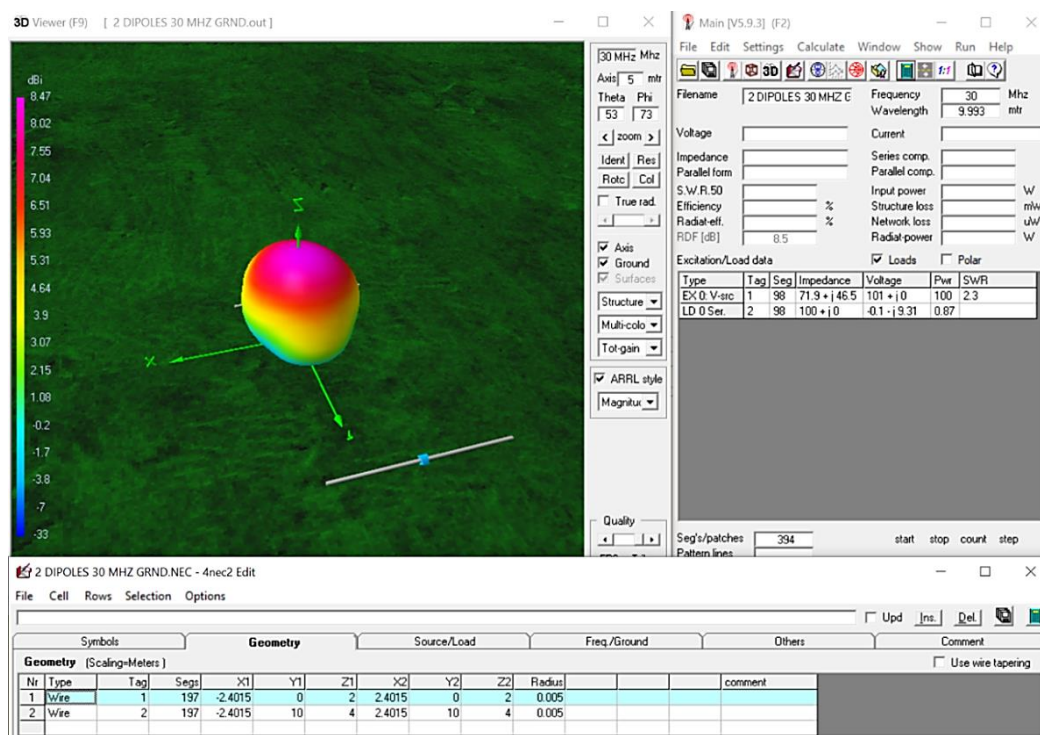


Рис. 6. Рабочие окна программы 4nec2, включая геометрию двух диполей с визуализацией амплитудной диаграммы направленности одного из них, а также результаты расчёта подводимой и принимаемой мощностей

Fig. 6. Interface of the 4nec2 program, including the geometry of two dipoles with visualization of the amplitude pattern of one of them, as well as the results of calculating the input and received power

У программы 4nec2 нет возможности напрямую определить SIL, поэтому использовались расчётные значения мощности, подводимой к излучающему диполю, и мощности в согласованной нагрузке, на которую нагружен приёмный диполь, и далее вычислялся коэффициент передачи между антеннами. Модели антенн создавались с помощью встроенного в 4nec2 редактора.

На основе кода NEC специалистами из турецкого Национального метрологического института ТУБИТАК (TÜBİTAK National Metrology Institute) в 2024 году была разработана и представлена программа “SIL” для расчёта вносимых потерь площадки (рис. 7). Программу отличает дружелюбный интерфейс и, что более важно, возможность учёта матрицы рассеяния симметрирующих устройств дипольных антенн при вычислениях значений SIL [3]. “SIL” находится в свободном доступе и также использовалась для расчёта теоретического значения $A_{ic}(f)$. В отличие от 4nec2 она позволяет напрямую оценить значения SIL без промежуточных расчётов.

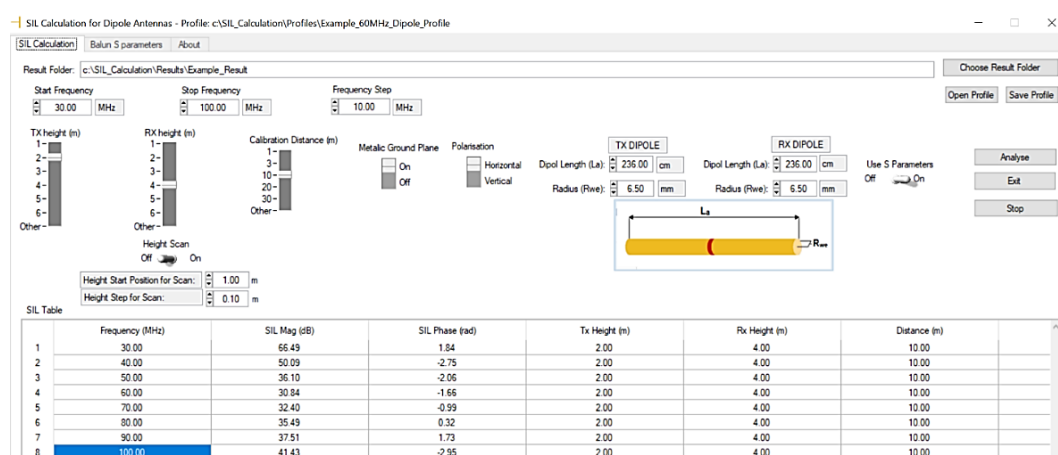


Рис. 7. Рабочее окно программы “SIL” от института ТУБИТАК для расчёта вносимых потерь площадки

Fig. 7. Interface of the “SIL” program from the TÜBITAK for Site Insertion Loss calculating

Обе программы, 4нес2 и “SIL”, используются для расчёта вносимых потерь $A_{ic}(f)$ идеальной площадки Ideal OATS, то есть площадки с бесконечной пластиной заземления и идеальными диполями, однако их применение для расчёта SIL между двумя антеннами с механическими деформациями (провисанием диполей) весьма затруднительно или, как в случае с программой “SIL”, невозможно.

Третьей рассмотренной программой стал продукт компании Ansys для выполнения электродинамического моделирования HFSS (рис. 8), обладающий чрезвычайно широкими функциональными возможностями и позволяющий выполнять расчёты характеристик электромагнитного поля и токов в трёхмерном пространстве методом конечных элементов (Finite Element Method, FEM), методом моментов, а также методом трассировки лучей (Shooting and Bouncing Rays Method, SBR). Метод SBR рекомендован для анализа моделей с большими геометрическими размерами. Многообразие ядер вычислителя (solver) и отсутствие чётких методических рекомендаций по их использованию для решения задачи оценки взаимодействия двух антенн над металлической пластиной заземления привело к необходимости дополнительных исследований этой программы с целью выбора её оптимальных настроек для получения наиболее корректного результата моделирования¹. Так, при моделировании одной и той же пары антенн, выполненного в HFSS при разных настройках, отличия в результатах расчёта SIL превышали 2 дБ относительно результатов, полученных в 4нес2 и “SIL”.

¹ Ansys. URL: <http://ansys.com/Products/Simulation+Technology/Electronics/Signal+Integrity/ANSYS+HFSS> (дата обращения: 15.05.2026).

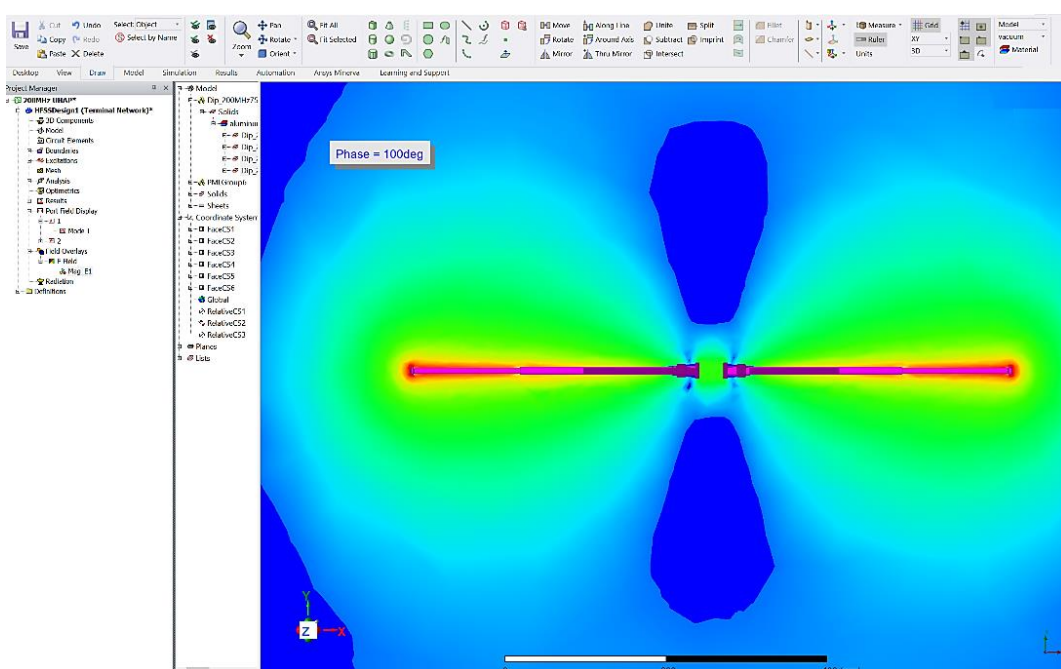


Рис. 8. Рабочее окно программы HFSS с моделью дипольной антенны и визуализацией формируемого ею электрического поля

Fig. 8. Interface of the HFSS program with a model of a dipole antenna and visualization of the electric field generated by it

Результаты расчётов SIL, выполненные тремя разными программами — 4nec2, “SIL”, HFSS — для пары антенн, размещённых в условиях идеальной площадки Ideal OATS, сравнивались между собой и сличались с результатами расчёта SIL, приведёнными в качестве примера в CISPR 16-1-5. Для адекватной оценки результатов расчётов на каждой частоте моделировались антенны в виде полуволновых резонансных диполей с размерами, указанными в CISPR 16-1-5. При этом в каждой из программ параметры антенны были идентичными, включая длину (в зависимости от номинала резонансной частоты), диаметр (1 см на частотах до 160 МГц и 3 мм на частотах свыше 160 МГц), зазор между вибраторами (9 мм), а также комплексное сопротивление имитируемого симметрирующего устройства антенны: $100 + j0$ Ом. При этом вибраторы антенн были прямыми без изгибов (провисаний).

Валидация электродинамической модели антенн и площадки

Главная задача этапа валидации — убедиться в том, что одна и та же модель с идеальной пластиной заземления решается одинаково всеми тремя алгоритмами (программами) и соответствует результатам расчёта, приведённым

в CISPR 16-1-5. Одинаково — это отличие значений SIL не более 0,1 дБ. Если результат расчёта какой-либо программой превышает значение 0,1 дБ, то этот результат из оценки исключается и рассматривается оставшееся большинство.

В качестве контрольных частот взяты номиналы 30, 50, 100, 200 и 300 МГц, исходя из чего длины полуволновых диполей составили 4803, 2870, 1425, 716 и 476 мм. Результаты моделирования систематизированы в таблице 1.

Таблица 1

Результаты расчёта вносимых потерь площадки SIL,
полученные при валидации модели

	“SIL” TÜBİTAK	4nec2	CISPR 16-1-5	HFSS + IGP
	Значения SIL, дБ			
30 МГц	$l = 4803$ мм, $r = 5$ мм, $gap = 9$ мм, $h_1 = 2$ м, $h_2 = 4$ м, $d = 10$ м, горизонтальная поляризация			
	21,05	20,6	21,03	21,04
50 МГц	$l = 2870$ мм, $r = 5$ мм, $gap = 9$ мм, $h_1 = 2$ м, $h_2 = 4$ м, $d = 10$ м, горизонтальная поляризация			
	21,11	21,08	21,12	21,1
100 МГц	$l = 1425$ мм, $r = 5$ мм, $gap = 9$ мм, $h_1 = 2$ м, $h_2 = 4$ м, $d = 10$ м, горизонтальная поляризация			
	22,94	22,68	22,97	22,94
200 МГц	$l = 716$ мм, $r = 1,5$ мм, $gap = 9$ мм, $h_1 = 2$ м, $h_2 = 2$ м, $d = 10$ м, горизонтальная поляризация			
	29,35	29,21	29,37	29,37
300 МГц	$l = 476$ мм, $r = 1,5$ мм, $gap = 9$ мм, $h_1 = 2$ м, $h_2 = 1,5$ м, $d = 10$ м, горизонтальная поляризация			
	32,4	32,2	32,47	32,4

Примечание: l — длина дипольной антенны, включая зазор между вибраторами, мм; r — радиус вибратора, мм; gap — зазор между вибраторами, мм; h_1 — высота излучающей антенны, м; h_2 — высота приёмной антенны, м; d — расстояние между антеннами; HFSS + IGP — решение HFSS методом конечных элементов с идеальной пластиной заземления (Perfect E + Infinite Ground Plane).

Значения SIL в столбцах «“SIL” TÜBİTAK», «4nec2» и «HFSS + IGP» получены для случая идеальной пластины заземления.

Анализ результатов показывает, что:

- на всех частотах моделирования результаты расчёта SIL для площадки с идеальной пластиной заземления, выполненные программами HFSS + IGP и “SIL”, и значения CISPR 16-1-5 практически идентичные. Максимальный разброс составил 0,08 дБ, средний — 0,02 дБ, что является очень хорошим результатом;

- программа 4nec2, как правило, рассчитывала SIL, значительно (до 0,45 дБ) отличающийся от результатов расчёта остальных программ и значений SIL, указанных в CISPR 16-1-5;
- решение HFSS методом конечных элементов с идеальной пластиной заземления (Perfect E + Infinite Ground Plane) с настройками решения — количество проходов 15, максимальное отличие матрицы S -параметров — 0,01 (в таблице 1 обозначено как «HFSS + IGP») было выбрано в качестве инструмента для расчёта SIL, учитывающее в том числе механические деформации антенн.

Помимо указанных типов вычислительного ядра и настроек HFSS, для решения задач расчёта теоретического значения SIL был исследован метод SBR. При этом для достижения максимальной точности расчётов модели антенн сначала были определены методом конечных элементов, а затем импортированы (так называемый link) в модель площадки (рис. 9). Сопоставление результатов моделирования методом SBR с результатами расчёта HFSS + IGP, то есть идеальной площадки с бесконечной пластиной заземления, показало отклонение SIL порядка 0,3 дБ, что для решения поставленной задачи считается неприемлемым. Тем не менее метод SBR может быть применён в схожих задачах по оценке электродинамических характеристик протяжённых объектов, где не требуется прецизионная точность расчётов.

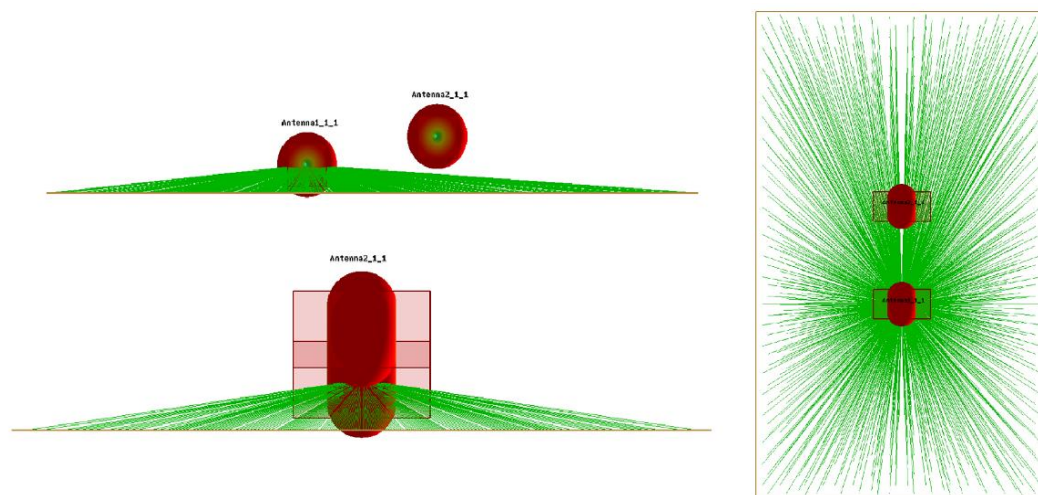


Рис. 9. Модель площадки размерами 50×40 м при её решении методом трассировки лучей SBR с импортированными боксами с дипольными антеннами (на рисунке представлены в виде двух прямых параллелепипедов), визуализацией амплитудных диаграмм направленности антенн и самих трассирующих лучей

Fig. 9. A 50×40 m site model when solved using SBR ray tracing with imported boxes with dipole antennas (shown in the figure as two straight parallelepipeds), visualization of the directivity patterns of the antennas and the tracer rays themselves

Одним из объяснений такого отклонения SIL при решении задачи методом SBR является отсутствие учёта электродинамического взаимодействия между антеннами, то есть импортированные боксы с заранее рассчитанными диполями рассматриваются как независимый источник и приёмник трассирующих лучей без учёта их взаимного влияния друг на друга.

Модель прецизионного полуволнового резонансного диполя

Приведённые в настоящей статье результаты расчётов получены для имеющих в распоряжении ФГУП «ВНИИФТРИ» прецизионных полуволновых резонансных диполей UHAP и VHAP (рис. 10), разработанных с учётом требований CISPR 16-1-5 компанией Schwarzbeck Mess-Elektronik. Практика их применения представлена, например, в [4]. Настройки антенн и результаты расчётов могут быть использованы метрологическими институтами, центрами стандартизации и метрологии, а также калибровочными лабораториями при оценке соответствия (аттестации) площадок класса CALTS и REFTS с помощью таких же антенн UHAP и VHAP. В случае использования других типов антенн при оценке соответствия (аттестации) площадок теоретические значения вносимых потерь нужно будет пересчитать самостоятельно или обратиться во ВНИИФТРИ.

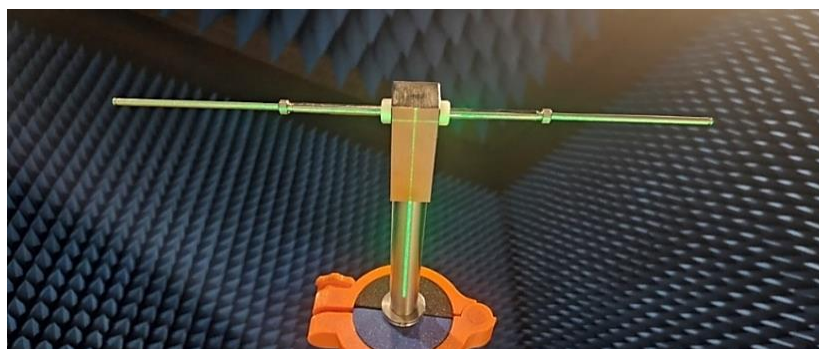


Рис. 10. Юстировка антенны UHAP перед измерением её геометрических размеров и деформаций

Fig. 10. Alignment the UHAP antenna before measuring its geometric dimensions and deformations

Диполи UHAP и VHAP представляют собой телескопические вибраторы, нагружаемые на согласующее устройство, симметричные входы которого имеют номинальное сопротивление 73 Ом, а несимметричный выход — 50 Ом. Длины вибраторов устанавливаются в соответствии с номиналом контрольной частоты, на которой выполняются измерения и расчёты, с помощью линейки, входящей в комплект поставки антенн, с учётом информации из сопроводительной технической документации компании-разработчика.

Для построения цифровой модели прецизионных полуволновых резонансных диполей геометрические размеры вибраторов антенн УНАР и VНАР были тщательно измерены на каждом из 24 номиналов контрольной частоты с помощью оптических и линейно-угловых средств измерений, причём как с деформациями вибраторов, так и без них (рис. 11). При этом деформации с амплитудой менее 0,5 мм (частоты свыше 300 МГц включительно) не учитывались.

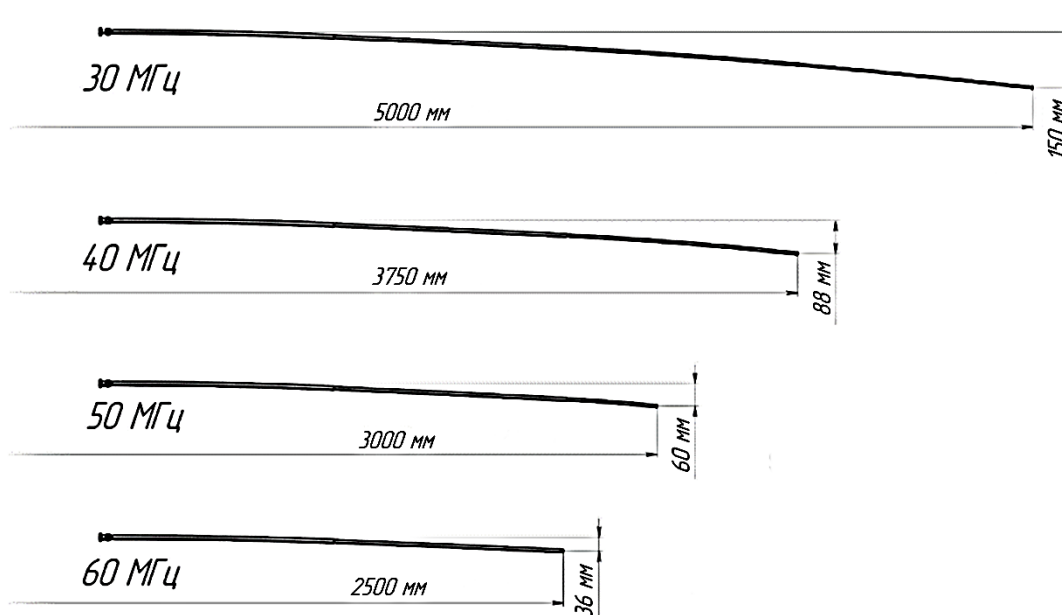


Рис. 11. Амплитуда деформаций для диполей, резонирующих на частотах 30, 40, 50 и 60 МГц (показана половина диполя)

Fig. 11. Amplitude of deformations for dipoles tuned to frequencies of 30, 40, 50 and 60 MHz (half of the dipole is shown)

В результате измерений были получены амплитуды деформаций изгиба, представленные в таблице 2.

Таблица 2

Амплитуда деформаций изгиба на концах диполя

Частота, МГц	30	35	40	45	50	60	70	80
Деформация изгиба на концах диполей, мм	150	113	88	73	60	36	21	17
Частота, МГц	90	100	120	140	160	180	200	250
Деформация изгиба на концах диполей, мм	14	13	3	2	1	1	0,5	0,5

Результаты расчётов

После определения типа вычислительного ядра HFSS и его настроек (см. раздел «Валидация электродинамической модели антенн и площадки») были проведены расчёты элементов матрицы Q (формула (9)), то есть коэффициентов передачи между двумя типами антенн UHAP или VHAP — цифровой модели без механических дефектов и цифровой модели антенн, подверженных деформации изгиба, которые определяют теоретическое значение вносимых потерь площадки SIL.

В качестве примера влияния деформаций изгиба антенны на значения элементов матрицы рассеяния эквивалентного четырёхполюсника с резонансной частотой 30 МГц на рис. 12 приведён график частотной зависимости S -параметров системы из двух диполей без деформаций и деформированных диполей. Так, значение коэффициента передачи из-за провисаний вибраторов на 150 мм на частоте 30 МГц изменяется на 0,55 дБ, что с учётом выкладок в разделе «Критерий соответствия площадок CALTS и REFTS и расчётно-экспериментальный подход к оценке их характеристик» настоящей статьи является существенным и пренебрегать этим эффектом нельзя.

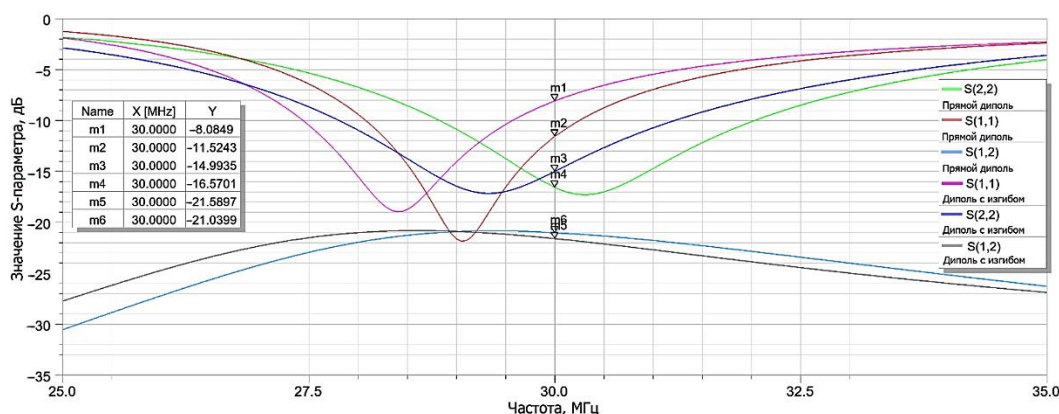


Рис. 12. Отличия S -параметров системы из двух полуволновых диполей, резонирующих на частоте 30 МГц, без дефектов изгиба от S -параметров системы из диполей с механическими деформациями

Fig. 12. The difference between the S -parameters of a network of two half-wave dipoles resonating at a frequency of 30 MHz without bending defects from the S -parameters of a network of dipoles with mechanical deformations

Показательно влияние металлической пластины заземления на амплитудно-частотные характеристики самой антенны, смещающее её резонанс в область более низких частот относительно резонансной частоты в свободном пространстве (рис. 13). Безусловно, это влияние зависит от частоты, высоты подъёма, амплитуды деформаций.

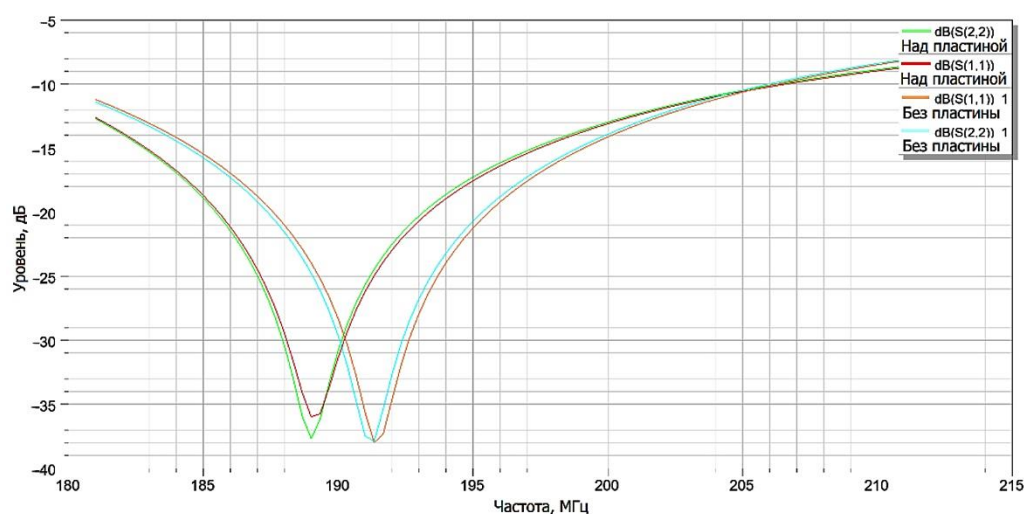


Рис. 13. Частоты резонанса пары полуволновых диполей, настроенных на частоту 200 МГц, размещённых в свободном пространстве (графики «Без пластины») и над металлической пластиной заземления (графики «Над пластиной») на высоте 2 м

Fig. 13. Resonance frequencies of a pair of half-wave dipoles tuned to a frequency of 200 MHz, placed in free space (graphs “Without a plane” (“Без пластины”)) and above a metal ground plan (graphs “Above the plane” (“Над пластиной”)) at a height of 2 m

Структура поля излучения прецизионного диполя, резонирующего на частоте 500 МГц, показана на рис. 14. На нём отчётливо видно влияние металлической пластины заземления на амплитудное распределение напряжённости электрического поля излучающей антенны.

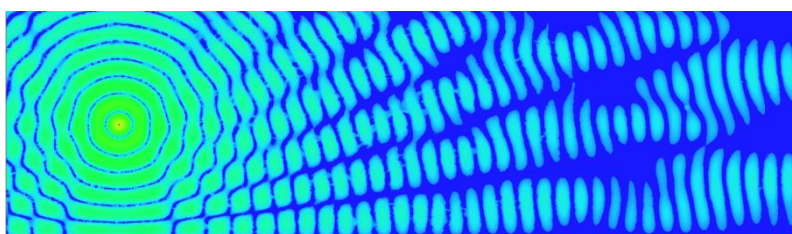


Рис. 14. Амплитудное распределение электрического поля полуволнового диполя, резонирующего на частоте 500 МГц (в правой части рисунка виден второй диполь)

Fig. 14. Electric field strength distribution of a half-wave dipole resonating at a frequency of 500 MHz (the second dipole is visible on the right side of the figure)

Результаты расчёта теоретических значений вносимых потерь площадки SIL с учётом механических деформаций прецизионных дипольных антенн типа VНАР (до 300 МГц включительно) и УНАР (свыше 300 МГц) сведены в таблицу 3. Там же указаны номиналы длин диполей, диаметр их телескопических элементов.

Таблица 3

Результаты расчёта вносимых потерь площадки SIL
с учётом механических деформаций
прецизионных дипольных антенн

f , МГц	h_r , м	L_a , мм	R_{we} , мм	A_{ic} , дБ
30	4,00	5000	10 / 8 / 6 / 4	21,59
35	4,00	4286	10 / 8 / 6 / 4	21,12
40	4,00	3750	10 / 8 / 6 / 4	20,72
45	4,00	3333	10 / 8 / 6 / 4	20,9
50	4,00	3000	10 / 8 / 6 / 4	21,35
60	4,00	2500	10 / 8 / 6 / 4	22,54
70	4,00	2143	10 / 8 / 6 / 4	21,68
80	4,00	1875	10 / 8 / 6 / 4	20,55
90	4,00	1667	10 / 8 / 6 / 4	21,5
100	4,00	1500	10 / 8 / 6 / 4	23,42
120	4,00	1250	10 / 8 / 6	25,1
140	2,00	1071	10 / 8 / 6	27,04
160	2,00	938	10 / 8 / 6	26,14
180	2,00	882	10 / 8 / 6	28,97
200	2,00	750	10 / 8 / 6	29,64
250	1,50	600	10 / 8 / 6	30,68
300	1,50	500	10 / 8 / 6	32,35
400	1,20	375	6 / 4	34,74
500	2,30	300	6 / 4	37,47
600	2,00	250	6 / 4	38,35
700	1,70	214	6 / 4	39,59
800	1,50	188	6 / 4	40,91
900	1,30	167	6 / 4	41,84
1000	1,20	150	6 / 4	42,72

Примечания: f — номинал контрольной частоты; h_r — высота подъёма приёмной антенны; L_a — общий размер диполей антенны с учётом симметрирующего устройства; R_{we} — радиус телескопических элементов вибратора; A_{ic} — расчётное значение вносимых потерь площадки SIL. Высота передающей антенны — 2 м для всех номиналов частот.

Также были рассчитаны отклонения вносимых потерь площадки SIL между антеннами с механическими деформациями от значений SIL между идеальными антеннами без механических деформаций изгиба (рис. 15), показывающие необходимость учёта связанных с этим эффектом изменений радиотехнических характеристик антенн при оценке соответствия (аттестации) площадок класса CALTS и REFTS, особенно в низкочастотной области.

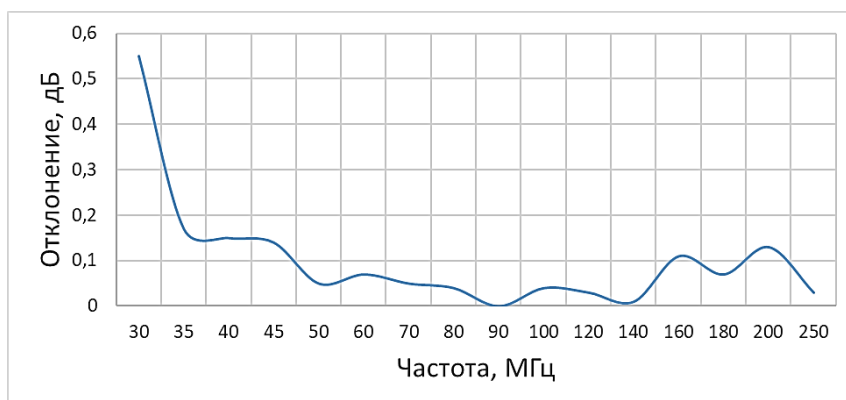


Рис. 15. Влияние деформаций изгиба дипольных антенн на значения вносимых потерь площадки SIL относительно SIL между дипольными антеннами без деформаций

Fig. 15. Impact of bending deformations of dipole antennas on the values of insertion losses of the SIL pad relative to the SIL between dipole antennas without deformations

Отличие теоретических значений вносимых потерь площадки SIL для пары антенн УНАР и VНАР, геометрия которых учитывает деформационные изменения их конструкции, от теоретических значений потерь площадки SIL, приведённых в стандарте CISPR 16-1-5, для пары диполей с классической конструкцией вибраторов (не телескопических) без дефектов и изгибов показано на рис. 16. Это отличие достигает 1,45 дБ, что свидетельствует о недопустимости использования приведённых в стандарте значений SIL для оценки соответствия площадок класса CALTS и REFTS в случае отличия характеристик и типов используемых антенн от антенн, для которых эти значения SIL были получены.

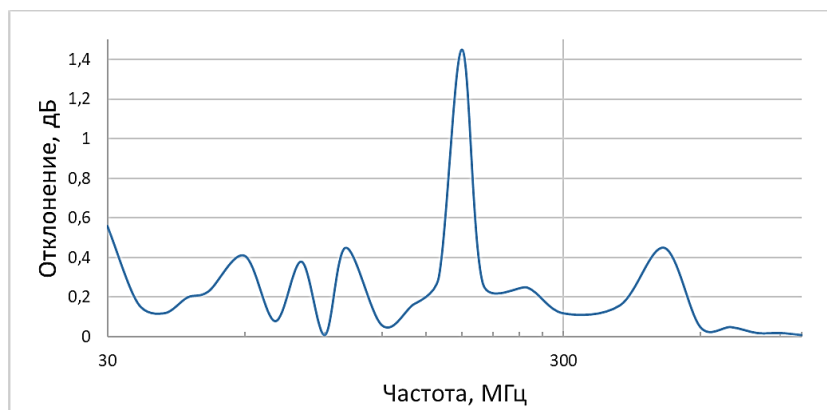


Рис. 16. Отличие теоретических значений вносимых потерь площадки SIL для пары антенн УНАР и VНАР от значений SIL, приведённых в стандарте CISPR 16-1-5

Fig. 16. The difference between the theoretical SIL pad for a pair of UHAP and VHAP antennas from the SIL values given in the CISPR 16-1-5 standard

Выводы

К основным результатам выполненной работы можно отнести следующие:

- разработаны электродинамические модели взаимодействия полуволновых резонансных диполей над металлической пластиной заземления, позволяющие вычислять теоретическое значение вносимых потерь площадки SIL в соответствии с требованиями международного стандарта CISPR 16-1-5 с достаточно высокими показателями точности;
- разработаны цифровые модели антенных элементов прецизионных полуволновых диполей UHAP и VHAP, учитывающие их фактические геометрические размеры, включая изменения их конструкции из-за деформаций изгиба;
- показана необходимость учёта деформационных процессов в прецизионных дипольных антеннах, используемых для оценки соответствия (аттестации) площадок для калибровки антенн класса CALTS и опорных испытательных площадок класса REFTS. Амплитуда деформаций вибраторов антенны VHAP достигает 150 мм на частоте 30 МГц, что приводит к изменениям вносимых потерь площадки на 0,55 дБ относительно потерь между антеннами без деформации;
- рассчитаны теоретические (референсные) значения вносимых потерь площадки SIL между двумя антеннами типа UHAP и VHAP, учитывающие деформационные изменения их геометрии. Полученные значения рекомендуется использовать метрологическим институтам, центрам стандартизации и метрологии, а также калибровочным лабораториям при оценке соответствия (аттестации) площадок класса CALTS и REFTS с помощью таких же антенн UHAP и VHAP.

Финансирование. Авторы заявляют, что во время подготовки данной статьи не было получено никаких средств, грантов или другой поддержки.

Вклад авторов. М.С. Шкуркин задумал исследование, отвечал за подготовку материала и обработку полученных результатов. Д.В. Логутов проводил эксперименты, участвовал в электродинамических расчётах, анализе и интерпретации результатов моделирования.

Конфликт интересов. Авторы заявляют, что у них нет потенциального конфликта интересов в связи с исследованием, представленным в данной статье.

Благодарности. Авторы благодарят коллектив НИО-10 ФГУП «ВНИИФТРИ» и руководство ФГУП «ВНИИФТРИ» за обеспечение возможности проведения исследования и помощь в достижении поставленной цели.

Funding. The authors declare that no funds, grants, or other support were received during the preparation of this article.

Contribution of the authors. M.S. Shkurkin conceived this research, was responsible for preparing the material and processing the results. D.V. Logutov carried out experiments, took part in electrodynamic calculations, analysis and interpretation of simulation results.

Conflict of interests. The authors declare that they have no potential conflict of interest in relation to the study presented in this article.

Acknowledgements. The authors express gratitude to the staff of NIO-10 of FSUE “VNIIFTRI” and the management team of FSUE “VNIIFTRI” for providing the opportunity to conduct research and assistance in achieving the set research goal.

Список источников

1. Михайлов М.М. Особенности измерений вносимых потерь испытательной площадки для калибровки антенн ЭМС в соответствии с CISPR 16-1-5 // Метрология в XXI веке. Материалы XIII Научно-практической конференции молодых учёных, аспирантов и специалистов, Менделеево, Московская обл., 31 марта — 1 апреля 2025 г.: сб. науч. трудов. Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2026. С. 111–127.
2. Sugiura A. Formulation of normalized site attenuation in terms of antenna impedances (EMI measurement applications) // *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 1990. V. 32. № 4. P. 257–263. <http://doi.org/10.1109/15.59884>.
3. Soydan Çakır, Osman Şen, Bahadır Tektaş, Serdar Büyük, Sibel Çimen. New SIL calculation software as per CISPR 16-1-5 // *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility — EMC Europe*. 2024. P. 479–482. <http://doi.org/10.1109/EMCEurope59828.2024.10722221>.
4. Шкуркин М.С., Логотов Д.В., Малай И.М., Храпов Ф.И. Калибровка измерительных антенн для испытаний на электромагнитную совместимость // Альманах современной метрологии. 2025. № 3 (43). С. 114–135. EDN: FTGKJH.

References

1. Mikhailov M.M. Features of measurements of Site Insertion Loss of calibration test sites for EMC antennas in accordance with CISPR 16-1-5. In: *Metrology in the XXI Century. Materials of the XIII Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Postgraduate Students, and Specialists, Mendeleevo, Moscow region, March 31 — April 1, 2025: collection of scientific works*. Mendeleevo: FSUE “VNIIFTRI”; 2026. 111–127. (In Russ.)
2. Sugiura A. Formulation of normalized site attenuation in terms of antenna impedances (EMI measurement applications). *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 1990; 32 (4): 257–263. <http://doi.org/10.1109/15.59884>.
3. Soydan Çakır, Osman Şen, Bahadır Tektaş, Serdar Büyük, Sibel Çimen. New SIL calculation software as per CISPR 16-1-5. In: *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility — EMC Europe*. 2024; 479–482. <http://doi.org/10.1109/EMCEurope59828.2024.10722221>.
4. Shkurkin M.S., Logutov D.V., Malay I.M., Khrapov F.I. EMC antenna calibration methods. *Almanac of Modern Metrology*. 2025; 3 (43): 114–135. EDN: FTGKJH. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 19.05.2026; одобрена после рецензирования 26.05.2026; принята к публикации 01.06.2026.

The article was submitted 19.05.2026; approved after reviewing 26.05.2026; accepted for publication 01.06.2026.