

УДК 621.396

Установка "ТЕМ-камера Крауфорда"

Л. А. Бусыгина, В. П. Лисицын, В. М. Луговцов,
М. Г. Никифоров, А. А. Чумаков

Высоковольтный научно-исследовательский центр (ВНИЦ ВЭИ) — филиал ГУП "Всероссийский электротехнический институт им. В. И. Ленина", г. Истра, Московская обл., Россия

Разработана установка, предназначенная для проведения испытаний технических средств на электромагнитную совместимость и стойкость к электромагнитным полям. Установка состоит из "ТЕМ-камеры Крауфорда" и генератора высоковольтных импульсов и создает в рабочем объеме размерами $0,5 \times 0,5 \times 0,5$ м равномерное импульсное электромагнитное поле. Амплитуда импульса напряженности электрического поля — до 100 кВ/м; время нарастания импульса — 6 нс; длительность импульса — 100 или 300 нс. Приведены данные расчетов и измерений характеристик установки.

ТЕМ-камеры часто используются для испытаний электронной аппаратуры на электромагнитную совместимость и стойкость к воздействию электромагнитного поля [1, 2]. Особенность данной установки — создание в относительно большом рабочем объеме мощного импульсного электромагнитного поля. Амплитуда импульса напряженности электрического поля составляет 100 кВ/м, время нарастания — 6 нс.

Устройство и принцип действия установки

Конструкция установки, представленной на рис. 1, представляет собой «ТЕМ-камеру типа Крауфорда» [3], с одной стороны которой подключен генератор высоковольтных импульсов, а с другой — высоковольтная согласованная нагрузка. Генератор высоковольтных импульсов содержит в себе зарядное устройство, накопительную емкость и газонаполненный разрядник. Накопительная емкость и трансформаторно-выпрямительный блок зарядного устройства размещаются в маслonaполненном баке.

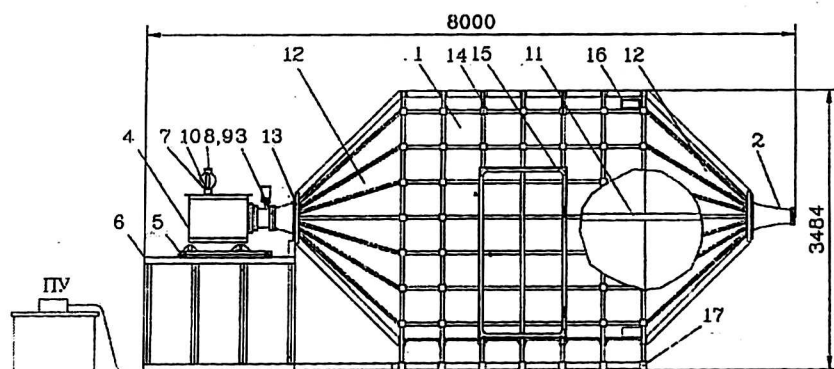


Рис. 1. Установка "ТЕМ-камера Крауфорда":

1 — внешний проводник ТЕМ-камеры; 2 — нагрузка; 3 — разрядник; 4 — бак накопительной емкости; 5 — тележка; 6 — подставка; 7 — маслорасширитель; 8, 9 — клапаны; 10 — масловыпускатель; 11 — внутренний проводник; 12 — пирамидальные сужения; 13 — коаксиально-полосковой переход; 14 — разборный каркас; 15 — дверь; 16 — панели ввода; 17 — подставка

ТЕМ-камера представляет собой отрезок прямоугольной коаксиальной линии с плоским внутренним проводником. С обоих концов линии имеются пирамидальные сужения, которые с одной стороны подсоединяются с помощью высоковольтного коаксиально-полоскового перехода к высоковольтному источнику, а с другой стороны — к согласованной нагрузке. В регулярной части камеры поперечное сечение имеет размеры 3000×3000 мм, а расстояние между внешним и внутренним проводниками составляет 1460 мм. Внутренний проводник удерживается в регулярной части камеры на диэлектрических растяжках. Высоковольтные вводы камеры выполнены таким образом, чтобы, не изменяя конфигурацию внутреннего проводника, можно было подключать низковольтный источник питания.

Внешний проводник представляет собой замкнутый экран, который выполнен из разборного каркаса, обшитого с внутренней стороны стальными листами. Каркас собирается из стальных труб прямоугольного сечения. В одной из боковых сторон камеры установлена дверь размерами 2000×1000 мм. По всему периметру дверного проема имеется электромагнитное уплотнение. Для ввода световолоконных и коаксиальных кабелей, а также цепей питания в правом нижнем и верхнем углах лицевой стороны и в центре нижней стороны предусмотрены панели ввода. На последних также имеются электромагнитные уплотнения.

Согласованная нагрузка является одновременно делителем напряжения. Верхнее плечо делителя выполняется из параллельно-последовательных цепочек резисторов ТВО-10. Суммарное сопротивление нагрузки — 50 Ом, нижнего плеча — 0,074 Ом. Внешний проводник нагрузки имеет форму усеченной пирамиды с квадратным основанием и выполняется из стальных листов.

Принцип действия установки (рис. 2) заключается в следующем. Напряжение сети 220 В, 50 Гц в силовом блоке зарядного устройства преобразуется в напряжение с частотой 25 кГц и амплитудой 300 В, которое подается на повышающий трансформатор. С выхода последнего напряжение амплитудой 10 кВ подается на первую ступень умножителя. В трансформаторно-выпрямительном блоке напряжение повышается до максимальной амплитуды 180 кВ. Через зарядный резистор накопительная емкость заряжается до напряжения заданной величины. После того как установится необходимая амплитуда напряжения, подается сигнал управления на разрядник. Катушка привода разрядника обесточивается, и подвижный электрод разрядника начинает двигаться на сближение с неподвижным электродом. На расстоянии, соответствующем пробивному напряжению, происходит пробой промежутка.

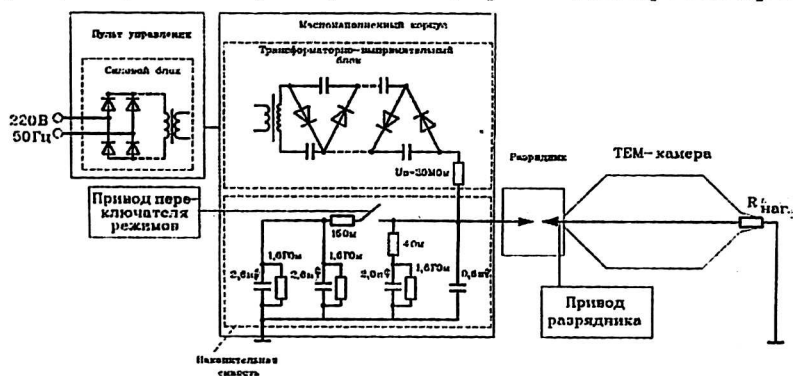


Рис. 2. Блок-схема установки

Импульс напряжения прикладывается между внешним и внутренним проводниками ТЕМ-камеры. В рабочем объеме камеры формируется импульсное электромагнитное поле с требуемыми параметрами, которое затем поглощается согласованной нагрузкой.

Запуск и отключение генератора управляющих импульсов, а также установка опорного напряжения осуществляются с пульта управления, размещенного в отдельном блоке и который может быть установлен на расстоянии 3 м от ТЕМ-камеры. В схеме силового блока предусмотрена блокировка, которая исключает подачу высокого напряжения при замкнутых электродах разрядника.

Емкостный накопитель энергии состоит из шести цепочек последовательно соединенных конденсаторов типа К15-10. Конструктивно цепочки объединены попарно в три отдельных блока. Один блок обеспечивает импульс напряжения длительностью 100 нс и постоянно подключен к разряднику через резистор сопротивлением. Два других блока служат для получения импульса напряжения длительностью 300 нс и подключаются к первому блоку через резистор с помощью переключателя. В каждом блоке параллельно конденсаторам включены выравнивающие резисторы.

Разрядник относится к типу искровых газонаполненных управляемых разрядников с соосно расположенными электродами. Электрод со стороны ТЕМ-камеры имеет подвижный узел, приводимый в движение электромагнитом с помощью гибкой диэлектрической тяги. Корпус разрядника представляет собой цилиндрическую оболочку, в которой для подключения манометра и газового шланга в цилиндрической оболочке корпуса имеются два штуцера. Корпус разрядника к внешнему проводнику камеры подключается через коаксиально-полосковый переход. Внутренний проводник подключается с помощью высоковольтного штекерного разъема.

К установке предъявлялись жесткие требования по эффективности экранирования электромагнитного поля, формируемого внутри камеры, высоковольтного источника и нагрузки. Конструкция установки и способы электромагнитного уплотнения позволили получить коэффициент эффективности экрана на расстоянии 1 м от установки во всем рабочем диапазоне более 60 дБ.

Расчет электромагнитных полей в ТЕМ-камере

Электромагнитное поле в ТЕМ-камере рассчитывалось в два этапа. На первом этапе поле в камере аппроксимировалось полем ТЕМ-волны. Это приближение допустимо, поскольку основной спектр возбуждающего импульса лежит ниже резонансных частот ТЕМ-камеры, и высшие моды почти не резонируют. Поле ТЕМ-волны рассчитывалось из решения соответствующей статической задачи методом интегральных уравнений. При этом одновременно подбирались ширина и конфигурация внутреннего проводника камеры по всей длине камеры и, в районе высоковольтного ввода, обеспечивающие требуемое волновое сопротивление 50 Ом. Для согласования камеры подбирались геометрия внешнего проводника в районе нагрузки. Кроме того, геометрия входного узла камеры и ее нагрузка выбирались с учетом оценок пробивных напряжений, полученных в электростатическом приближении.

На втором этапе расчета временной формы импульсов электромагнитного поля в ТЕМ-камере выбранной геометрии использовалась разработанная нами программа, основанная на численном решении уравнений Максвелла методом конечных разностей во временной области. С учетом двух плоскостей симметрии решение проводилось в четверти внутреннего объема камеры,

т. е. в области, имеющей размеры примерно $6,0 \times 1,5 \times 1,5$ м. Пространственная дискретизация этой области выполнялась с шагом $0,015$ м по всем трем направлениям, что привело к расчетной сетке размерами $102 \times 102 \times 400$ ячеек. Нагрузка камеры предполагалась коаксиальной и идеально согласованной. Камера возбуждалась согласованным генератором, который создавал во входной 50-омной коаксиальной линии импульсную ТЕМ-волну с амплитудой напряжения 1 В и с временной формой в виде Гауссова импульса. С одной стороны, такая форма импульса удобна для наблюдения его трансформации при распространении методами компьютерной графики, с другой стороны — интегрирование вычисленных полей по времени дает временную форму импульсов поля в камере при возбуждении ее напряжением в виде гладкой ступенчатой функции с заданной длительностью фронта.

На рис. 3 построены распределения поперечного магнитного поля в вертикальном продольном сечении камеры для ряда последовательных моментов времени t . Видны искажения формы импульса, возникающие при прохождении импульсом изломов внешнего проводника камеры и остаточные колебания после прохождения импульса. Расчеты показали, что длительность импульсов полей в камере определяется только длительностью подаваемого напряжения, наличие высших мод и небольшая несогласованность нагрузки практически не влияют на ее значение. В рабочем объеме размерами $0,5 \times 0,5 \times 0,5$ м расчетная неоднородность поля не превышает $\pm 0,52$ дБ. Длительность фронта не превышает $6,0$ нс при фронте возбуждающего импульса напряжения не более 5 нс.

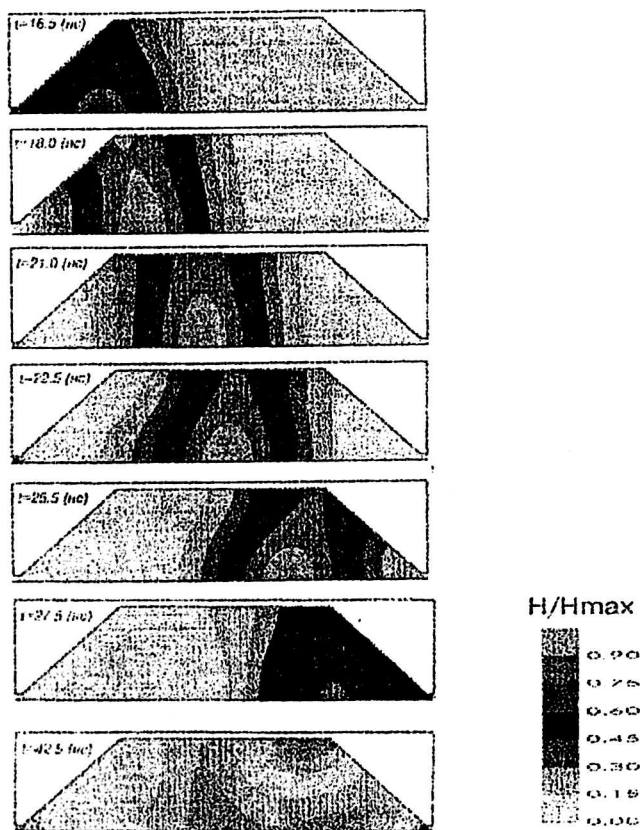


Рис. 3. Распространение Гауссова импульса в ТЕМ-камере. Рельефы поперечной составляющей магнитного поля в верхней половине продольной плоскости симметрии камеры

Результаты измерений

Были проведены испытания на предмет определения эффективности экрана камеры и определения действительных характеристик поля в рабочем объеме камеры.

На рис. 4 приведены типичные осциллограммы импульса напряженности электрического поля, измеренные в рабочем объеме ТЕМ-камеры. Осциллограммы получены на двухканальном осциллографе, на второй канал подавалось калибровочное синусоидальное напряжение. Период синусоиды равняется: 1 нс — на рис. 4, а и 20 нс — на рис. 4, б. Осциллограммы импульса напряженности магнитного поля и импульса напряжения на нагрузке камеры

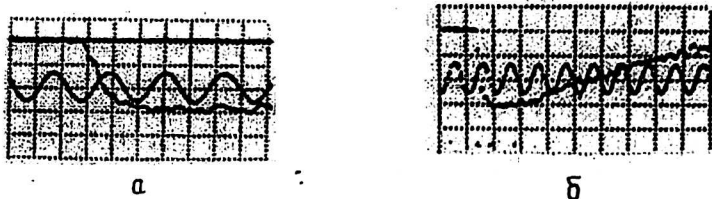


Рис. 4. Осциллограммы импульса напряженности электрического поля в центре рабочего объема камеры. Период калибровочной синусоиды: а — 1 нс; б — 20 нс

аналогичны осциллограммам, приведенным выше. Экспериментальные исследования показали хорошее совпадение измеренных значений параметров электромагнитного поля в рабочем объеме ТЕМ-камеры с расчетными значениями.

Литература

1. Бусыгина Л. А., Лисицын В. П., Никифоров М. Г., Чумаков А. А. ТЕМ-камера для испытаний на ЭМС: Тез. докл. Второй науч.-техн. конф. "Электромагнитная совместимость технических средств". — С.-Петербург, 1992. С. 64.
2. Бусыгина Л. А., Лисицын В. П. Оценка равномерности электромагнитного поля в конечной ТЕМ-камере: Тез. докл. Четвертой Российской науч.-техн. конф. "Электромагнитная совместимость технических средств и биологических объектов ЭМС-96". — С.-Петербург, 1996. С. 385.
3. Crawford M. L. Generation of standard EM fields in TEM transmission cell//IEEE transactions on electromagnetic compatibility. 1974. V. EMC-16. № 4. P. 40—46.

The "Crowford TEM cell" installation

L. A. Busygina, V. P. Lisitsyn, V. M. Lugovtsov,
M. G. Nikiforov, A. A. Tshumakov

High Voltage Scientific and Research Center, Branch of The Lenin's All-Russian Electrotechnical Institute, Istra, Moscow region, Russia

The installation intended for electromagnetic compatibility and susceptibility testing is developed. The installation consists of Crowford TEM cell and generator of high-voltage impulses and creates uniform impulse electromagnetic field in $0.5 \times 0.5 \times 0.5$ m working volume. Pulse amplitude of electric field strength is up to 100 kV/m, rise time — 6 ns, pulse duration — 100 ns or 300 ns. The results of calculations and measurements of installation characteristics are adduced.