

УДК 538:621.396.6

## ТРАНСПОРТАБЕЛЬНЫЕ ИМИТАТОРЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА ОСНОВЕ МАГНИТОКУМУЛЯТИВНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

А. С. Борискин, В. А. Золотов, А. С. Кравченко,  
Л. Н. Пляшкевич, В. А. Терехин

Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, 607188 Саров

Для испытания стойкости различных крупномасштабных объектов к воздействию электромагнитных импульсов разработаны транспортабельные установки — имитаторы электромагнитных импульсов, которые могут быть доставлены непосредственно к местам расположения испытываемых объектов. В качестве источников энергии выбраны взрывные магнитокумулятивные генераторы. От последствий их взрыва испытываемые объекты защищаются с помощью простейших защитных сооружений. Проведены эксперименты по созданию импульсных магнитных полей в объемах до 100 м<sup>3</sup>. Для получения быстро нарастающего поля применялась схема формирования токового импульса. С помощью воздушно-полосковой линии, питаемой от генераторов, создавались плоские электромагнитные волны. Моделировалось воздействие электромагнитных импульсов на заглубленные кабельные линии. Созданы экспериментальные образцы имитаторов воздействия электромагнитных импульсов и тока молнии.

В связи с усложнением элементов радиоэлектронной аппаратуры, широко используемой в настоящее время в системах связи, контроля и управления различных объектов, возникает опасность поражения или сбоя работы этой аппаратуры в результате воздействия электромагнитного импульса (ЭМИ) [1]. Достоверные данные о стойкости аппаратуры к воздействию импульсных электрических и магнитных полей могут быть получены только при сочетании расчетных и экспериментальных методов оценки [2]. При этом результаты испытаний являются основным аргументом, подтверждающим предъявляемые к аппаратуре требования стойкости.

Работы по созданию транспортабельных установок для испытаний на воздействие ЭМИ (имитаторов ЭМИ) были начаты во Всероссийском научно-исследовательском институте экспериментальной физики (ВНИИЭФ) по инициативе и под руководством академика А.И. Павловского в конце 70-х гг. В качестве источника энергии для них был выбран магнитокумулятивный генератор (МКГ), в котором преобразование энергии взрывчатого вещества в электромагнитную осуществлялось при быстрой деформации взрывом токонеющего контура. Сочетание высоких энергетических характеристик с возможностью вариации в широких пределах величины энергии и времени ее ввода в нагрузку, транспортабельность и автономность, простота обслуживания, возможность хранения и использования в полевых условиях, дешевизна обуславливают целесообразность использования МКГ в качестве мощного источника энергии для транспортабельных имитаторов ЭМИ.

Для решения ряда научно-технических задач создан широкий класс МКГ, позволяющих генерировать энергию до 100 ÷ 1000 МДж при различном времени ее ввода в нагрузку [3]. Серийные образцы магнитокумулятивных генераторов имеют следующие характеристики: МКГ-80 генерирует энергию около 200 кДж в нагрузку с индуктивностью примерно 6 мкГн при начальной энергии 1 ÷ 2 кДж; МКГ-160 генерирует энергию при-



Рис. 1. Установка для получения магнитных полей в больших объемах:

- 1 — каскад генераторов МКГ-80, МКГ-160 и МКГ-320; 2 — согласующий трансформатор;  
3 — МК-батарея; 4 — защита; 5 — соленоид

близительно 2 МДж в нагрузке с индуктивностью около 15 мкГн; МКГ-320 генерирует энергию  $10 \div 15$  МДж в нагрузке с индуктивностью  $0,1 \div 1,0$  мкГн. Из указанных генераторов может быть образована каскадная система.

Из магнитокумулятивных генераторов можно создавать (подобно конденсаторным батареям) системы из большого числа одновременно работающих на единую нагрузку МКГ (МК-батареи) [3]. Это позволяет получать большие значения энергии и мощности, а также изменять вводимую в нагрузку энергию за счет изменения числа генераторов в МК-батареях.

Большая энергоемкость источников на базе МКГ позволяет создавать в объемах около  $100 \text{ м}^3$  достаточно сильные импульсные магнитные поля с напряженностью до 1 МА/м, что дает возможность исследовать их воздействие на аппаратуру крупногабаритных объектов [4].

С помощью МКГ удобнее получать магнитные поля со временем нарастания, равным времени нарастания тока в генераторе ( $10 \div 100$  мкс). Получение таких магнитных полей представляет интерес, например, при испытании аппаратуры объектов, защищенных толстыми сплошными проводящими экранами, на стойкость к воздействию быстро нарастающего импульсного магнитного поля, где форма импульса на внутренней поверхности экрана не зависит от времени нарастания поля на внешней. Поэтому, если время нарастания импульса тока от источника питания много меньше времени его спада, применение дополнительных коммутирующих устройств для формирования более коротких фронтов не обязательно. Получив за счет увеличения амплитуды необходимые спектральные характеристики импульса и скорость нарастания поля внутри экрана, можно дать оценку работоспособности аппаратуры испытываемого объекта в условиях воздействия быстро нарастающего ЭМИ.

Проведена серия экспериментальных работ по созданию в больших объемах сильных импульсных магнитных полей. В качестве источника энергии в экспериментах использовались МКГ различных типов. В одном из экспериментов решена задача создания в объеме около  $200 \text{ м}^3$  импульсного магнитного поля напряженностью примерно 1 МА/м. Общий вид установки для получения таких магнитных полей представлен на рис. 1. В качестве источника энергии использовались батарея МКГ из четырех серийных генераторов МКГ-320. Соленоид, в котором создавалось импульсное магнитное поле, выполнен одновитковым из 50 проводов БПВЛ-70, уложенных параллельно на деревянный каркас квадратного сечения размером  $4 \times 4 \times 12$  м. Индуктивность соленоида составляла 1,6 мкГн. Для защиты соленоида от взрыва МКГ сооружена земляная насыпь.

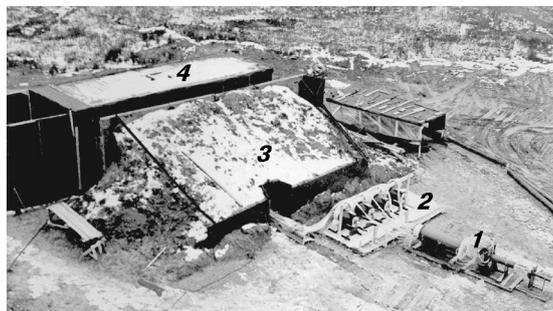


Рис. 2. Установка для получения импульса магнитного поля с коротким передним фронтом:

1 — каскад генераторов МКГ-80, МКГ-160 и МКГ-320; 2 — МК-батарея из коротких спиральных генераторов; 3 — защита; 4 — соленоид

В соленоиде создавалось магнитное поле с максимальным значением напряженности  $0,5 \text{ МА/м}$ . В течение почти всего периода работы МК-батареи скорость нарастания напряженности магнитного поля по времени была постоянной ( $4 \text{ ГА}/(\text{м} \cdot \text{с})$ ). Время нарастания магнитного поля составляло  $100 \text{ мкс}$ , характерное время затухания —  $10 \text{ мс}$ . Магнитная энергия в рабочем объеме соленоида составляла примерно  $35 \text{ МДж}$ , генерируемая МК-батареями магнитная энергия —  $55 \text{ МДж}$ . В этом эксперименте не ставилась задача формирования более короткого фронта нарастания импульсного магнитного поля, время нарастания поля определялось временем работы единичного генератора МК-батареи. Однако и в этом случае параметры импульса магнитного поля по спектральным характеристикам значительно превосходили задаваемые требования стойкости к действию импульсного магнитного поля грозового разряда. Отметим, что испытание аппаратуры в условиях воздействия сильных импульсных электромагнитных полей, по амплитудным и спектральным характеристикам превосходящих заданные, позволяет получить более надежные данные о стойкости аппаратуры, ограничить объем испытаний и уточнить нормы и методы испытаний.

Меньшим временем нарастания тока характеризуются спиральные МКГ с осевым иницированием [3]. В эксперименте с использованием батареи МКГ из коротких спиральных генераторов с осевым иницированием, питаемых от генератора МКГ-320 (рис. 2), в объеме  $100 \text{ м}^3$  создавалось магнитное поле напряженностью  $0,1 \text{ МА/м}$  со временем нарастания  $10 \text{ мкс}$  и временем затухания порядка  $1 \text{ мс}$ . Максимальная скорость нарастания поля составила  $10 \text{ ГА}/(\text{м} \cdot \text{с})$ .

Дальнейшее уменьшение длительности нарастания импульса магнитного поля обеспечивалось за счет применения обычных электротехнических методов обострения импульсов. В эксперименте, где использовался генератор МКГ-80 с формирующим устройством на основе электрически взрывающихся проволочек и обостряющего разрядника, в соленоиде объемом  $100 \text{ м}^3$  создавалось магнитное поле напряженностью  $10 \text{ кА/м}$  со временем нарастания  $2 \text{ мкс}$  и временем затухания порядка  $1 \text{ мс}$ . Максимальная скорость нарастания напряженности магнитного поля в соленоиде составляла  $10 \text{ ГА}/(\text{м} \cdot \text{с})$ .

Проведен также ряд экспериментов по формированию с помощью МКГ плоских электромагнитных волн [4]. В них использовалась воздушно-полосковая линия высотой  $5 \text{ м}$ , шириной  $20 \text{ м}$  и длиной  $60 \text{ м}$ . Верхнее полотно воздушно-полосковой линии состояло из  $19$  расщепленных проводов, выполненных из латунных проволочек диаметром  $3 \text{ мм}$ , распределенных равномерно по окружности колец, имеющих диаметр  $500 \text{ мм}$  (крайние расщепленные провода) и  $250 \text{ мм}$  (средние провода). Нижнее полотно представляло собой сплошную

металлическую сетку с размерами ячейки  $200 \times 200$  мм, выполненную из стального прутка диаметром  $8 \div 10$  мм. В начале и конце воздушно-полосковой линии имелись переходные секции, служащие для соединения ее с системой, формирующей электромагнитное поле, и с активным сопротивлением в конце линии, равным волновому сопротивлению линии.

Система, формирующая токовый импульс, состояла из источника энергии МКГ-80, контура накопления энергии, сетки взрывающихся проводников и узла обострения. Накопительный контур представлял собой соленоид из высоковольтного провода, индуктивность которого вместе с подводящими проводами составляла 5 мкГн. Сетка ( $5,0 \times 1,3$  м) взрывающихся проводников выполнена из 25 проводов марки МГТФ-0,07 длиной 1,3 м, распределенных равномерно. Узел обострения состоял из 6 управляемых газонаполненных разрядников, равномерно размещенных на участке длиной 5 м и включенных в цепь параллельно.

Использование нескольких параллельно включенных разрядников позволило помимо уменьшения индуктивности узла разрыва, а следовательно, и времени переброса тока в полосковую линию осуществить подачу напряжения в разных точках полосы снижения и сформировать в воздушно-полосковой линии электромагнитную волну, по пространственной структуре приближенную к плоской электромагнитной волне. В проведенных экспериментах магнитная энергия, генерируемая в накопительном контуре, составляла около 100 кДж, напряжение на сетке электрически взрывающихся проводников — примерно 500 кВ, сила тока в полосковой линии — около 6 кА. Время нарастания поля в волне составило  $20 \div 40$  нс, спада — примерно 1 мкс.

Более мощные МКГ позволят существенно увеличить размеры полосковой линии и напряжение на сетке из взрывающихся проводов. Основная трудность связана с созданием управляемых разрядников мегавольтного диапазона.

Известно, что под действием электрической составляющей ЭМИ ядерного взрыва на экранах заглубленных кабельных линий возбуждаются токи с амплитудой порядка 100 кА [5]. Эти токи могут заноситься по экранам внутрь защищенных сооружений, а также создавать наводки на внутренних элементах кабельной линии. Источники энергии на базе МКГ позволяют возбуждать в экранах кабельной линии токи с требуемыми амплитудно-временными характеристиками. На рис. 3 представлен общий вид установки для возбуждения бесконтактным (индукционным) методом в экранах кабеля длиной 30 м токов наводки. Источником энергии являлись генераторы МКГ-80 и МКГ-160 с формирующими устройствами, в качестве которых использовалась сетка электрически взрывающихся проводников и обостряющих разрядников. Магнитокумулятивные генераторы



Рис. 3. Экспериментальная установка для возбуждения индукционным методом токов в экранах кабельной линии (МКГ размещены внутри сферической взрывной камеры)

размещались во взрывной камере. Петля связи, с помощью которой осуществлялась индукционная связь МКГ с кабелем, состояла из двух проводов типа КВИ-300 с усиленной изоляцией, между которыми находился исследуемый кабель. МКГ-80 позволяет возбудить в экранах кабеля ток с амплитудой около 30 кА, временем нарастания 5 мкс и длительностью 100 мкс; МКГ-160 — ток с амплитудой 100 кА, временем нарастания 2 мкс и длительностью 1 мс.

Апробирован также контактный метод возбуждения токов в экранах кабеля длиной около 100 м. При этом экраны кабеля с помощью специальной муфты подсоединялись к выходным концам источника энергии. МКГ-80 создает ток с амплитудой до 200 кА, временем нарастания примерно 100 мкс и спада около 1 мс; МКГ-160 увеличивает амплитуду до 300 кА со временем нарастания 200 мкс и спада примерно 2 мс. Для защиты регистрирующей аппаратуры и окружающих сооружений от поражающих факторов взрыва МКГ они помещались в простейшие защитные сооружения. На рис. 4, *а* показаны четыре защитных сооружения перед опытом. МКГ размещается в крайнем справа. Смежное с ним сооружение при взрыве МКГ сохраняется и используется во втором опыте, и т. д. Подготовка в опыту показана на рис. 4, *б*.

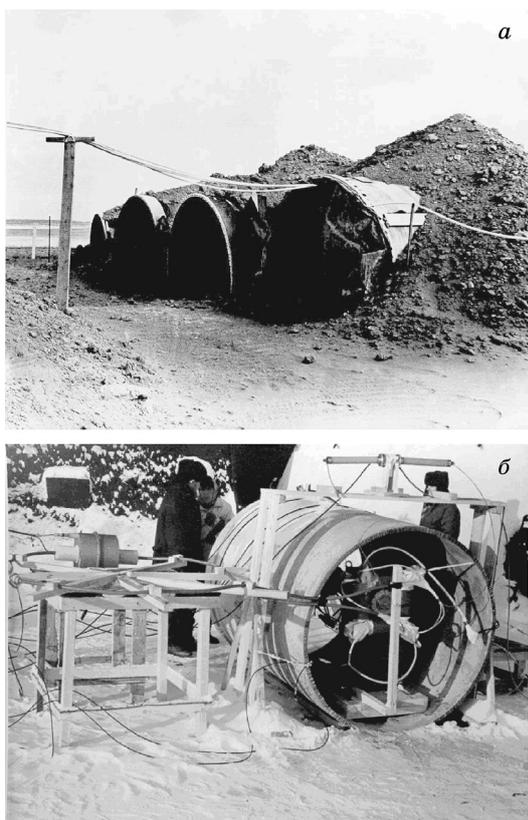


Рис. 4

Рис. 4. Четыре защитных сооружения:  
*а* — перед опытом; *б* — подготовка к опыту

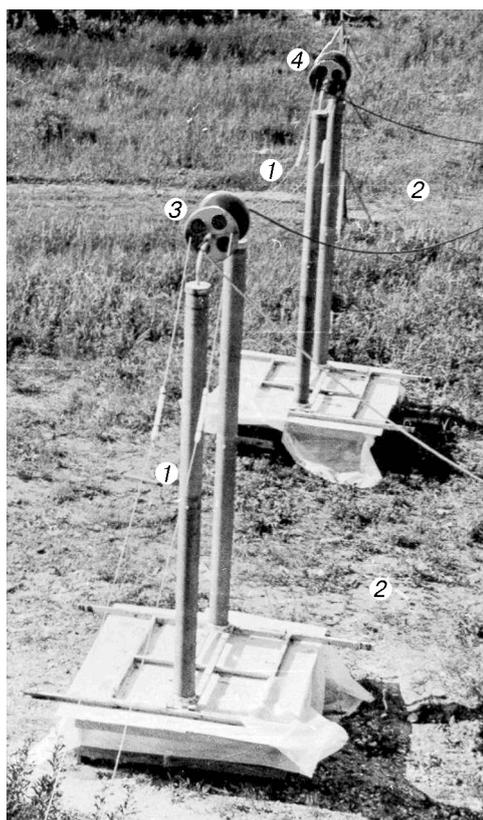


Рис. 5

Рис. 5. Фрагмент формирующего устройства из нескольких накопительных контуров со взрывающимися проводниками:

1 — взрывающиеся проводники; 2 — накопительные контуры; 3 — разрядник; 4 — разрядник-обостритель

Многие задачи исследования стойкости аппаратуры объектов к воздействию ЭМИ грозового разряда также можно решать с помощью МКГ. Воздействие молнии может привести к значительным механическим разрушениям, пожарам, нарушениям функциональных связей между определенными блоками аппаратуры, наведению тока и возникновению импульсных перенапряжений в кабельных линиях и проводах. Обычно требуется подтверждение стойкости к воздействию молнии объектов или аппаратуры непосредственно в местах их расположения и функционирования со всеми связями, заземлениями и соединениями. Для испытания таких объектов требуется транспортабельный имитатор воздействия молнии.

Созданы экспериментальные образцы транспортабельных имитаторов воздействия импульсного тока молнии [6, 7]. В их состав входят источник энергии на основе МКГ-80 или МКГ-160; формирующие устройства на основе электрически взрывающихся проводников и обостряющего разрядника; линия, связывающая высоковольтный конец взрывающихся проволочек через обостряющий разрядник с нагружаемым объектом, обратным токопроводом которой обычно является грунт (имитатор нагружается на реальное сопротивление заземления испытываемого объекта).

Используется два типа формирующих устройств: в виде одного накопительного контура со взрывающимся проводником или в виде нескольких идентичных накопительных контуров, подключаемых параллельно к выходу МКГ (рис. 5). В эксперименте с первым типом имитатора, когда сопротивление заземления составляет 4 Ом и длина линии, связывающей имитатор с нагружаемым объектом, равна 60 м, смоделировано воздействие тока молнии с амплитудой 50 кА. Время нарастания тока составляло 7 мкс при времени спада на полувысоте импульса 65 мкс. При этом на испытываемый объект подавался импульс напряжения с амплитудой около 1 МВ. В опыте с использованием двух накопительных контуров (второй тип имитатора) импульс с той же амплитудой тока получен при сопротивлении заземления 27 Ом. Напряжение на испытываемом объекте составило 2 МВ, время нарастания тока — 3 мкс, время спада (на полувысоте) — 30 мкс.

Предложен метод возбуждения импульсного магнитного поля в грунте с помощью магнитного диполя, питаемого от МКГ-160. Показана возможность создания магнитного диполя с моментом до  $1 \text{ ГА} \cdot \text{м}^2$ . При диаметре витка 50 м, разбитого на 4 секции, серийный генератор МКГ-160 позволяет создать магнитный момент величиной до  $0,25 \text{ ГА} \cdot \text{м}^2$ . В зависимости от требуемого времени нарастания тока в диполе могут быть использованы обострители, например из взрывающихся проводников.

Исследования, выполненные во ВНИИЭФ, показали перспективность использования МКГ для создания транспортабельных имитаторов ЭМИ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Рикетс Л. У., Бриджес Дж. Э., Майлетта Дж. Электромагнитный импульс и методы защиты. М.: Атомиздат, 1979.
2. Башурин В. П., Гайнуллин К. Г., Голубев А. И. и др. Некоторые расчетно-теоретические модели и программы для исследования электродинамических эффектов, сопровождающих ядерные взрывы // Вопросы математического моделирования, вычислительной математики и информатики: Сб. науч. тр. Арзамас-16: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 1994. С. 117–130.
3. Павловский А. И., Людаев Р. З. Магнитная кумуляция // Вопросы современной экспериментальной и теоретической физики: Сб. науч. тр. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1984. С. 206–270.

4. **Bragin Yu. B., Kravchenko A. S., Lyudaev R. Z., et al.** MCG production of electromagnetic fields in large volumes at  $10^{-4}$ – $10^{-8}$  s rise time // Megagauss magnetic field generation and pulsed power applications. N. Y.: Nova Sci. Publ., 1994. P. 75–84.
5. **Allen Y. E.** A 100 kA direct drive EMP pulser. Livermore, 1975. (Prepr. / LLNL; PEM-39).
6. **Борискин А. С., Гусев Н. И., Золотов В. А. и др.** Транспортабельные имитаторы молнии на основе магнитокумулятивных генераторов // Электричество. 1995. № 6. С. 29–32.
7. **Борискин А. С., Димант Е. М., Козлов М. Б. и др.** Транспортабельные установки для моделирования импульсной составляющей тока молнии // Электричество. 1998. № 1. С. 31–40.

*Поступила в редакцию 1/IX 1999 г.*

---