



УДК 533.9

**Выборнов Федор Иванович**, доцент, д.ф.-м.н., профессор кафедры физики  
Волжский государственный университет водного транспорта  
603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5.

**Котик Дмитрий Самойлович**, с.н.с, к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник  
Научно-исследовательский радиофизический институт ННГУ им. Н.И. Лобачевского  
603950, г. Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, 25/12а.

**Ройзен Александр Моисеевич**, ведущий научный сотрудник  
Научно-исследовательский радиофизический институт ННГУ им. Н.И. Лобачевского  
603950, г. Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, 25/12а.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МОЛНИИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫМ ИМПУЛЬСНЫМ ГЕНЕРАТОРОМ ГИН500

*Аннотация.* Приводятся описание и технические характеристики макета высоковольтного импульсного генератора ГИН500, предназначенного для моделирования электромагнитного излучения молнии. Приводятся первые результаты измерений электромагнитного поля искусственной молнии, выполненные на полигоне НИРФИ вблизи п.г.т. Васильсурск Нижегородской области.

*Ключевые слова:* высоковольтный импульсный генератор, генератор Маркса, моделирование, электромагнитное излучение, молния, антенна.

#### Введение

Весьма актуальной является задача физического моделирования явлений, происходящих при молниевом разряде. Естественно, что на современном уровне развития техники невозможно создать полномасштабную искусственную молнию, но представляется возможным создать достаточно мощный электромагнитный импульс (ЭМИ), имитирующий электромагнитную составляющую молнии.

Применение устройств, создающих мощный электромагнитный импульс, очень актуально для экспериментального решения вопросов электромагнитной совместимости (см. например, [1-3]).

Существуют теоретические модели генерации некоторых переходных световых событий или возмущения электронной плотности в нижней ионосфере, связывающие их появление с воздействием на атмосферу ЭМИ молнии. Для физического моделирования ЭМИ молнии предлагается использование генератора импульсного напряжения (ГИН) нагруженного на соответствующую излучающую антенну.

Поскольку разряд молнии происходит каскадным образом, то полномасштабный имитатор ЭМИ молнии должен состоять из 8–10 модулей ГИНов, каждый из которых нагружен на свой участок антенны и запускается поочередно от импульса предыдущего каскада с соответствующей задержкой.

## Описание экспериментальной установки

Целью разработки макета генератора электромагнитного излучения молнии (МГЭМИМ) являлось создание технического средства для физического моделирования электромагнитных процессов, возникающих при разряде молнии в атмосфере Земли. В основу проекта макета была положена схема генератора высоковольтного напряжения (генератора Маркса) с максимальной амплитудой импульса 500 кВ (далее ГИН500). ГИН500 через главный коммутатор подключен к антенне в виде геофизического диполя длиной 650 м, подвешенного на асбоцементных столбах на высоте 6 м. Во время разряда антенна со стороны генератора через плазменную среду подключается к контуру заземления технологического здания нагревного стенда СУРА. С другой стороны антенна через сопротивление нагрузки подключена к трубе скважины с глубиной водоносного слоя 8 м.

Общий вид генератора показан на рисунке 1, а антенны – на рисунке 2. В таблице 1 приведены основные технические характеристики генератора.



*Рис.1. Общий вид генератора ГИН500.*

Генератор высоковольтных импульсов состоит из шкафа питания, блока высоковольтного источника и из стойки ГИН. Блок высоковольтного питания содержит: высоковольтный трансформатор ЗНОМ-35, высоковольтный выпрямитель-удвоитель, конденсаторов схемы удвоения ИК-100/0,25, балластных резисторов зарядки.

Стойка ГИН содержит: высоковольтные конденсаторы ИК-100/0,2-6 шт., конденсатор запуска главного коммутатора, пять шарообразных разрядников (неуправляемых), разрядника запуска ГИН (управляемого), ограничительных зарядных резисторов ТВО-10, главного коммутатора, несущую платформу разрядников, комплект системы заполнения коммутатора азотом (баллон, редуктор, соединители, вентили) и защитный заземленный экран установки.

### Основные технические характеристики ГИН500

№	Наименование	Значение
1.	Энергия в импульсе (не менее)	4,8 КДж
2.	Амплитуда импульса (не менее)	480 кВ
3.	Ёмкость при разряде	0,042 мкФ
4.	Длительность импульса (измеренная на нагрузке, по уровню 0,7)	~ 1,2 мксек
5.	Частота повторения (не более)	4 Гц
6.	Потребляемая мощность (не более)	1,0 кВт
7.	Напряжение питания	220 В, 50Гц
8.	Вес установки, включая шкаф питания	500 кг.

Генератор высоковольтных импульсов построен по схеме Маркса и состоит из шести ступеней, в каждой из которых применён конденсатор ИК-100/0,25. В целях обеспечения надёжности генератора и недопущения пробоя изоляции конденсаторов зарядное напряжение ограничено значением 80 кВ.



*Рис.2. Антенна ГИН.*

Планировалось, что генератор будет управляться внешними командами и обеспечивать режим с заданным периодом повторения в пределах 2-10 с. В этой связи разрядник первой ступени сделан управляемым. Разрядный промежуток выбран вблизи критической точки пробоя, но с таким расчётом, чтобы самопроизвольный пробой был исключён. Управление осуществляется со стороны заземлённого электрода разрядника. Сквозь этот электрод проходит трубка из оргстекла, которая выступает за пределы сферы электрода. Выступающая часть трубки не нарушает электрическую прочность разрядного промежутка. В момент подачи управляющего импульса амплитудой 20 кВ между торцом электрода и сферой первого электрода происходит электрический разряд, инициирование которого облегчается за счёт того, что электрическая прочность пути вдоль диэлектрика значительно (втрое) меньше аналогичного для сухого воздуха. В результате этого в

разрядный промежуток вносится плазменный шнур, что приводит к пробое воздуха и запуску ГИН.

Поскольку нагрузка ГИНа носит индуктивный характер, передний фронт несколько затягивается. С целью передачи импульса в нагрузку с максимальной амплитудой между нагрузкой и последней ступенью ГИНа установлен коммутатор (главный коммутатор). Коммутатор должен срабатывать в момент достижения амплитуды импульса последней ступени максимального значения. Такой режим достигается установкой ещё одной ступени, напряжение которой подаётся на управляющий электрод главного коммутатора. Импульс управления возникает с небольшим запаздыванием, которое определяется скоростью распространения волны разрядного процесса вдоль ступеней ГИН. Управляющий электрод главного коммутатора создаёт искажение поля в разрядном промежутке, что способствует высокой скорости срабатывания главного коммутатора (около 3 нсек).

Антенна была выполнена из двух алюминиевых проводов диаметром 15 мм и общей длиной 650 м, подвешенных на изоляторах. Расстояние между проводами составляло 20 см. Такая конструкция антенны позволяла получить малые значения сопротивления по постоянному току и компенсировать индуктивность линии емкостью системы проводников. Для ограничения максимальных токов разряда через антенну имелась возможность включения дополнительного сопротивления.

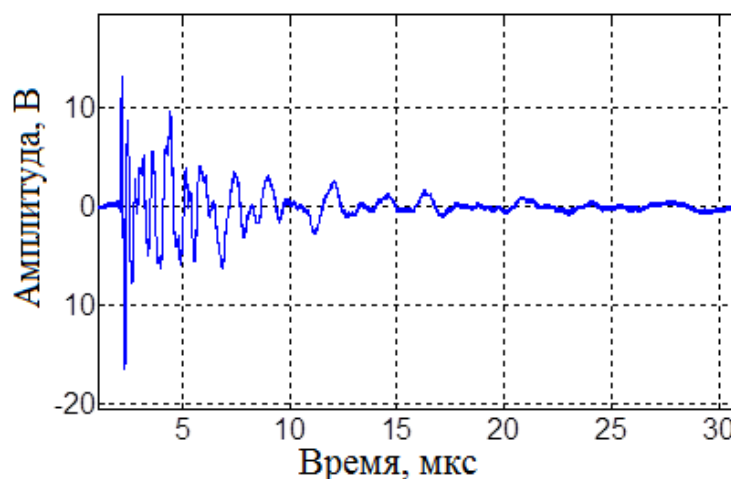


Рис.3. Осциллограмма импульса МГЭМИМ.

В качестве приемных измерительных антенн использовались вертикальный металлический штырь высотой 2 м и горизонтальный провод длиной 12 м с высотой подвеса 1,5 м над плоской крышей здания на удалении 400 м от установки.

Первые испытания МГЭМИМ проводились без системы управления разрядом в режиме автозапуска (в 2012–2014 годах). Испытания модернизированного варианта МГЭМИМ были проведены на полигоне НИРФИ вблизи п.г.т. Васильсурск Нижегородской области как в сухую, так и дождливую погоду летом 2019 г. Осциллограмма импульса, принятого на вертикальный штырь на расстоянии 400 м от МГЭМИМ приведена на рисунке 3. Кроме испытаний самого ГИН500 был проведен анализ различных режимов работы средств моделирования возмущений атмосферного электрического и геомагнитного полей и функционирования радиоэлектронных систем, разработаны принципы формирования (на основе анализа геофизических и электромагнитных полей) базы признаков возмущений атмосферного электрического и геомагнитного полей.

Регистрация проводилась цифровым осциллографом DS1102E фирмы RIGOL, работающим в ждущем режиме.

Проведенные испытания показали:

- Длительность импульса, измеренного на вертикальный штырь высотой 2 м и горизонтальный провод длиной 12 м с высотой подвеса 1,5 м над плоской крышей не превышает 3 мкс (по уровню 0,7) с частотой заполнения осцилляций 1,2 МГц, период колебаний «хвоста импульса» составлял около 75 мкс.

- Напряженность поля, измеренная на расстоянии 400 м от средней части антенны МГЭМИМ, составляет около 10 В/м.

- Резонансная частота антенной системы при замкнутых разрядных промежутках составляла 11.5 МГц.

- Время заряда конденсаторов МГЭМИМ не превышало 2 с.

### **Заключение**

В результате выполненной работы был разработан и испытан макет высоковольтного импульсного генератора, который может использоваться для моделирования ЭМИ молнии, проведения испытаний различных изделий на электрическую прочность и электромагнитную совместимость.

Испытания показали возможность выполнения ряда технических доработок, которые позволят улучшить технические параметры установки. В дальнейшем планируется проведение измерений на значительных дальностях от установки МГЭМИМ. На заключительном этапе работ предстоит усовершенствовать изготовленный макет ГИНа (обеспечить возможность дистанционного управления параметрами импульса разряда) и перейти к регулярным экспериментам по моделированию ЭМИ молнии.

Работа поддержана грантом Министерства науки и высшего образования РФ, полученным в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы». Уникальный идентификатор проекта RFMEFI62020X0003. Номер соглашения 075-15-2020-529.

### **Список литературы:**

1. Шваб А. Й. Электромагнитная совместимость. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 4880 с.
2. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и радиоконтроль. Методы оценки и эффективность. Монография / Под ред. П.А. Сая. – М.: Радиотехника, 2015. – 400 с.
3. Гуревич В.И. Защита оборудования подстанций от электромагнитного импульса. – М.: Инфра-Инженерия, 2016. – 302 с.

## **MODELING OF ELECTROMAGNETIC RADIATION OF LIGHTNING BY A HIGH VOLTAGE PULSE GENERATOR GIN500**

Fedor I. Vybornov, Dmitry S. Kotik, Alexander M. Royzen

*The description and technical characteristics of the model of the high-voltage pulse generator GIN500, designed to simulate the electromagnetic radiation of lightning, are given. The first results of measurements of the electromagnetic field of artificial lightning are presented, made at the NIRFI training ground near the urban settlement. Vasilsursk Nizhny Novgorod region.*

*Keywords: high-voltage pulse generator, Marx generator, modeling, electromagnetic radiation, lightning, antenna.*