

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОБИЛЬНЫХ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ НА
ОСНОВЕ ГЕНЕРАТОРА ИМПУЛЬСНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ ЗАДАЧ
ПОВЫШЕНИЯ ЗАЩИТЫ ОБЪЕКТОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ**

**Кандидат эконом. наук *Е.П. Грабчак*
Департамент оперативного контроля и управления в электроэнергетике
Минэнерго России**

**Доктор эконом. наук *Е.Л. Логинов*
Международного научно-исследовательского института проблем управления
(МНИИПУ)**

**Кандидат физ.-мат. наук *М.А. Шурупов*
Объединенный институт высоких температур Российской академии наук
(ОИВТ РАН)**

Рассматриваются возможности использования мобильных испытательных комплексов для полномасштабного моделирования воздействия молнии на электроэнергетические объекты. Приведены мероприятия по применению мобильных испытательных комплексов для проверки электроники оборудования электросетевых объектов на электромагнитную устойчивость к воздействию разрядов молнии, а также для исследований наведенных токов за счет индуктивных связей во вторичных цепях.

Ключевые слова: электроэнергетика, чрезвычайная ситуация, надежность, безопасность, мобильных испытательных комплексов, молнии, электромагнитная защищенность.

**THE USE OF MOBILE TEST COMPLEXES BASED
ON A PULSE VOLTAGE GENERATOR FOR THE TASKS OF INCREASING
THE PROTECTION OF POWER FACILITIES**

**Ph.D. (Econ.) *E.P. Grabchak*
Department for Operational Control and Management in the Electric Power Industry of
the Ministry of Energy of Russia**

**Dr. (Econ.) *E.L. Loginov*
Institute for Advanced Systems (IRIAS)**

**Ph.D. (Phys.-Mat.) *M.A. Shurupov*
Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences (JIHT RAS)**

The article examines the possibilities of using mobile test complexes for full-scale modeling of the impact of lightning on electric power facilities. Measures are considered for the use of mobile test complexes for checking the electronics of equipment of power grid facilities for

electromagnetic resistance to the effects of lightning discharges, as well as for researching induced currents due to inductive connections in secondary circuits.

Keywords: electric power industry, emergency situation, reliability, safety, mobile test complexes, lightning, electromagnetic immunity.

Введение

Молниезащита и проблема электромагнитной совместимости с молнией (ЭМС) характеризуются тем, что требования к их надежности возрастают по мере совершенствования технической оснащённости защищаемого объекта. Указанное обстоятельство стало особо значимым в настоящее время, когда управление транспортом электрической энергии во все более значительной степени стало осуществляться в цифровой форме, в основе которой лежит массовое использование микропроцессорной техники с рабочим напряжением в единицы вольт [1-3].

Объединенным институтом высоких температур РАН (ОИВТ РАН) были разработаны, изготовлены, и испытаны два мобильных испытательных комплекса (МИК) для полномасштабного моделирования воздействия молнии на электроэнергетические объекты: мобильный испытательный комплекс на базе взрывомагнитного генератора (ВМГ) – МИК ВМГ и мобильный испытательный комплекс на основе генератора импульсных напряжений (ГИН) – МИК ГИН [4-7].

Каждый из комплексов имеет свою область применения. В силу своих физико-технических характеристик МИК ВМГ является оптимальным источником энергии для низкоомных нагрузок, таких как контура заземления электрических подстанций. МИК ГИН предназначен для испытаний на объектах ЕНЭС в интервале сопротивлений заземления 10-50 Ом.

Технические характеристики МИК ВМГ

Принципиальная электрическая схема МИК ВМГ представлена на рис. 1.

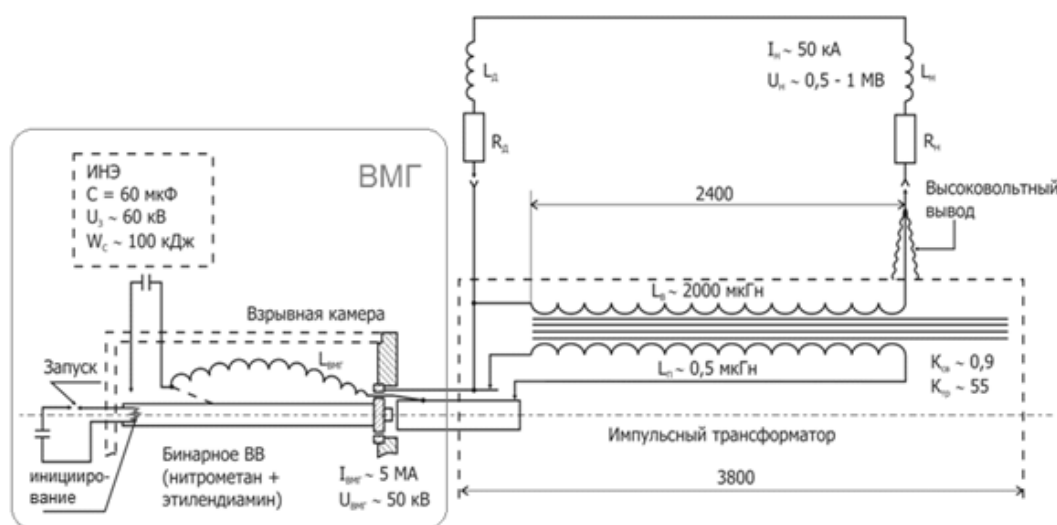


Рис. 1. Принципиальная электротехническая схема МИК ВМГ

МИК ВМГ изготовлен АО «СЭТ» и смонтирован на шасси автомобиля КАМАЗ-6350 повышенной проходимости. Генератор токов молнии располагается в кузове-контейнере. Основными элементами генератора токов молнии являются ВМГ и импульсный трансформатор. ВМГ помещается в защитную взрывную камеру, рассчитанную на 5 кг ВВ в тротиловом эквиваленте, что исключает повреждение оборудования комплекса в процессе пуска ВМГ. Второй автомобиль на шасси автомобиля КАМАЗ-43118 предназначен для размещения системы управления и хранения расходных материалов, а также включает блок жизнеобеспечения обслуживающего персонала.

Полевые испытания МИК ВМГ

Полевые испытания МИК ВМГ проводились в реальных условиях восточного региона Московской области. рис. 2. Испытательный стенд размещался на территории площадью около гектара. Нагрузкой для МИК ВМГ являлся грунт между двумя контурами заземления. Контуры выполнялись из алюминиевого провода АС 120 Ø 10-12 мм, размещенного на глубине 0,5 м. Внешний контур заземления представлял собой квадрат размером 55×55 м. Внутренний контур заземления в первом эксперименте был 15м×15м, что соответствовало сопротивлению нагрузки в 2 Ома, во втором – 4м×4м (сопротивление нагрузки – 4 Ома). Ток передавался от МИК ВМГ к штанге ввода импульса тока во внутреннем контуре через линию передачи тока. Суммарная индуктивность с учетом воздушной токовой линии не превышала 80 мкГн.

Результаты, полученные в ходе полевых испытаний представлены на рис. 3 и в табл. 1.



Рис. 2. Полевые испытания работы МИК ВМГ на контур заземления

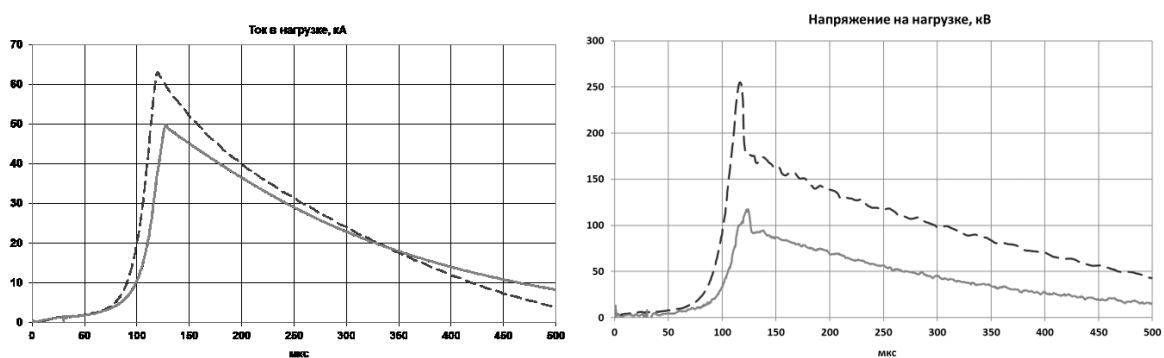


Рис. 3. Измеренные значения токов и напряжений в нагрузке 2 Ом (сплошная линия) и 4 Ом (пунктирная линия)

Ток в нагрузке с большим сопротивлением 4 Ом обеспечен увеличением выходной энергии ВМГ с 900 кДж до 1500 кДж. Выходная энергия ВМГ варьируется изменением начальной энергии ВМГ.

Испытания МИК ВМГ на предельные параметры нагрузки

Испытания МИК ВМГ на предельные параметры нагрузки проводились на модельную нагрузку с активным сопротивлением 10 Ом и индуктивностью контура около 150 мкГн. Испытания проводились на территории Шатурского филиала ОИВТ РАН, г. Шатура, Московская область (рис. 4). Активная нагрузка моделировалась безындукционным сопротивлением, установленным вертикально. Индуктивная нагрузка моделировалась проводами подключения резистивной нагрузки. Для уменьшения габарита высоковольтный провод подключения активной нагрузки был выполнен в виде спирали.



Рис. 4. Испытаний МИК ВМГ на предельную нагрузку сопротивлением 10 Ом

Таблица 1

Параметры МИК ВМГ, зарегистрированные в экспериментах

Параметры / номер эксперимента	контуры грунта		модельная нагрузка
	№ 1	№ 2	
Начальное сопротивление между контурами (активная нагрузка), Ом	2	4	10
Индуктивность нагрузки, мкГн	75	86	150
Начальная энергия ВМГ, кДж	23	43	73
Максимальная амплитуда тока в нагрузке, кА	50	63	44
Энергия, генерированная ВМГ, кДж	900	1500	900
Максимальная амплитуда напряжения на выходе МИК ВМГ, кВ	220	450	810
Максимальная амплитуда напряжения на активной нагрузке, кВ	100	250	495
Фронт нарастания тока, мкс	30	25	37
Длительность тока по уровню 0,5 от амплитудного значения, мкс	120	80	50
Энергия, рассеянная в активной нагрузке, кДж	500	800	550
Усиление энергии (энергия в активной нагрузке по отношению к начальной энергии ВМГ)	21	20	7

Результаты, полученные в ходе испытаний МИК ВМГ на предельную нагрузку представлены в табл. 1.

Испытания МИК ВМГ на диапазон нагрузок от 1 до 10 Ом, и индуктивностью от 70 до 150 мкГн подтвердили наибольшую эффективность использования установки для проверки заземлителей электрических подстанций, имеющих регламентированный предел сопротивления заземления до 1 Ома. В ходе испытаний было отмечено, что высокие значения производных токов и напряжений позволяют использовать МИК ВМГ для проверки электроники оборудования электрических подстанций на электромагнитную устойчивость к воздействию разрядов молнии, а также для исследований наведенных токов за счет индуктивных связей во вторичных цепях.

Полевые испытания МИК ГИН

МИК ГИН выполнен по схеме Аркадьева–Маркса. Основная цель установки – исследования импульсных сопротивлений грунтов при протекании токов молнии.

Принципиальная схема комплекса приведена на рис. 5, фотография на испытательном полигоне – на рис. 6.

МИК ГИН предназначен прежде всего для проведения испытаний с высокоомными свыше 10 Ом нагрузками. Для снижения монтажной высоты МИК ГИН выполнен в виде двух колонн с биполярной покасадной зарядкой. Каскад состоит из пяти параллельно соединенных конденсаторов. Суммарное количество конденсаторов в ГИН составляет 300 штук. Максимальное зарядное напряжение каждого – 42 кВ, емкость – 17 мкФ, масса – 30 кг. В МИК ГИН применены современные конденсаторы судельная энергоёмкость 500 Дж/кг. Весогабаритные характеристики позволяют разместить МИК ГИН на автомобиле повышенной проходимости с прицепом. Монтируется на месте применения в течение рабочей смены. Полная энергоёмкость МИК ГИН 4 МДж при максимальном рабочем напряжении 2,4 МВ.

Диапазон рабочих сопротивлений нагрузки от 10 Ом до 100 Ом. Максимальный ток разряда 100 кА. Проведены эксперименты на открытой местности в полевых условиях при напряжении на контуре до 2 МВ. По результатам полученных экспериментальных данных было рассчитано сопротивление грунта $R_{гр} = (U_m - LdI_s/dt)/I_s$, где L – индуктивность разрядного контура (~15 мкГн при расстоянии между колоннами ГИН – 25 метров).

Сравнение результатов расчета и экспериментальных данных представлено на рис. 7.



Рис. 5. Схема комплекса МИК ГИН при полевых испытаниях



Рис. 6. Фотография ГИН на месте испытания (г. Троицк)

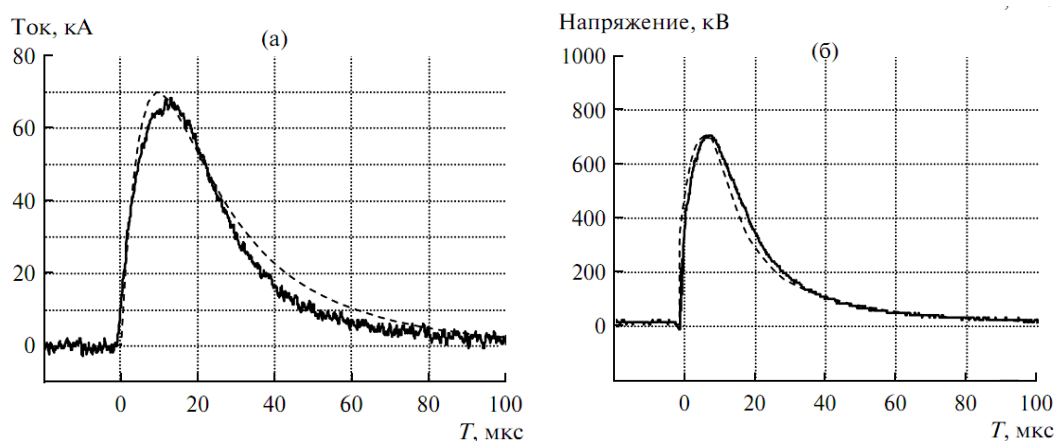


Рис. 7. Профили разрядного тока (а) и напряжения между заземлением ГИН1 и ГИН2 (б):
1 – расчет (пунктир); 2 –эксперимент.

В экспериментах зафиксировано динамическое изменение сопротивления грунта. Данные исследований показали, что при протекании тока возникают искровые каналы внутри грунта.

Заключение

Как показали испытания, мобильный испытательный комплекс на базе взрывомагнитного генератора и мобильный испытательный комплекс на основе генератора импульсных напряжений являются оборудованием эффективно решающим задачи полномасштабного моделирования воздействия молнии на электроэнергетические объекты, а также для исследований наведенных токов за счет индуктивных связей во вторичных цепях.

Литература

1. Грабчак Е.П., Логинов Е.Л. Комплексные подходы к защите систем автоматики и информационных сетей сложных энергетических объектов от естественных или искусственных электромагнитных воздействий критического характера // Проблемы обеспечения безопасности (Без-

опасность–2020): материалы II Международной научно-практической конференции. – Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет. - 2020. С.8-10.

2. Грабчак Е.П., Логинов Е.Л. Проблемы защиты информационных систем и систем автоматического и автоматизированного управления в электроэнергетике от космических и воздушных средств создания сигналов помех и воздействия ЭМИ // Энергетика и энергосбережение: теория и практика. Сборник материалов V Всероссийской научно-практической конференции. - Кемерово: Кузбасский государственный технический университет. - 2020. С. 307-1-307-3.

3. Грабчак Е.П., Григорьев В.В., Логинов Е.Л. Поддержание работы управляющих систем энергетической инфраструктуры в условиях воздействий электромагнитного импульса природного или техногенного происхождения // Новые информационные технологии и системы. Сборник научных статей по материалам XVII Международной научно-технической конференции. – Пенза: Пензенский государственный университет. - 2020. С. 3-5.

4. Шурупов А.В., Козлов А.В., Гусев А.Н., Шурупова Н.П., Завалова В.Е., Чулков А.Н., Базелян Э.М. Мобильный испытательный комплекс на основе взрывомагнитного генератора // Прикладная механика и техническая физика. - 2015. Т. 56. № 1 (329). С. 190-199.

5. Шурупов А.В., Завалова В.Е., Козлов А.В., Шурупов М.А. Мобильный испытательный комплекс на основе взрывомагнитного генератора для исследования безопасности объектов электростанций под воздействием токов молнии//Ядерная физика и инжиниринг. - 2015. Т. 6. № 11-12. С. 568-578.

6. Shurupov A. V., Koslov A. V., Shurupov M. A., Zavalova V. E., and Fortov V. E. The Sources of Pulse Current Based on Explosive Magnetic Generators for Mobile Testing Facility. // IEEE Transactions on Plasma Science, V44. - 2016, pp. 1956 – 1960.

7. Шурупов А.В., Козлов А.В., Гусев А.Н., Завалова В.Е., Шурупов М.А., Базелян Э.М. Мобильный испытательный комплекс на основе взрывомагнитного генератора для задач повышения молниезащиты объектов электроэнергетики // Сборник статей Инновационные технические решения в программе НИОКР «ФСК ЭЭС». - М.: АО «НТЦ ФСК ЭЭС». - 2016. С. 244-253.

Сведения об авторах

Грабчак Евгений Петрович, заместитель Министра энергетики Российской Федерации, 107996, ГСП-6, г. Москва, ул. Щепкина, дом 42, 8(495) 631-90-43, E-mail: Grabchak.eugene@gmail.com

Логинов Евгений Леонидович, профессор РАН, дважды лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники, начальник службы Ситуационно-аналитического центра Минэнерго России, 107996, ГСП-6, г. Москва, ул. Щепкина, дом 42, 8(903) 100-78-24, E-mail: evgenloginov@gmail.com

Шурупов Михаил Алексеевич, старший научный сотрудник Лаборатории "Мощных электромагнитных воздействий" Объединенного института высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН), 125412, Москва, ул. Ижорская 13, корпус К-1Б-3, 8(926)391-32-65, E-mail: m.a.shurupov@mail.ru