

## МОБИЛЬНЫЙ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС НА ОСНОВЕ ВЗРЫВОМАГНИТНОГО ГЕНЕРАТОРА

*А. В. Шурупов<sup>1</sup>, А. В. Козлов<sup>1</sup>, А. Н. Гусев<sup>1</sup>, Н. П. Шурупова<sup>1</sup>, В. Е. Завалова<sup>1</sup>,  
Э. М. Базелян<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Объединенный институт высоких температур» (ОИВТ РАН), г. Москва, Россия,

<sup>2</sup>ОАО «Энергетический институт им. Г. М. Кржижановского (ЭНИН)» г. Москва, Россия

Опытный образец мобильного испытательного комплекса на основе взрывомагнитного генератора (МИК ВМГ) был разработан для полномасштабного моделирования импульса тока молнии. Основным элементом МИК ВМГ является генератор импульса тока, включающий взрывомагнитный генератор (ВМГ) с импульсным трансформатором (ИТ) для вывода энергии в нагрузку. Теоретический анализ электрической схемы МИК ВМГ проведен с учетом потерь энергии на активных сопротивлениях в первичном контуре ИТ и индуктивно-омического характера нагрузки. Представлены результаты полевых испытаний МИК ВМГ. Показано, что результаты математического моделирования импульса тока на нагрузке хорошо согласуются с результатами экспериментов.

### Введение

Изучению физики молнии с целью построения эффективных систем молниезащиты посвящено много научных трудов. Систематизация представлений о механизмах возникновения, развития и воздействия молнии на различные объекты приводится в работе [1]. Однако проблемы молниезащиты не теряют актуальности. Прежде всего это объясняется тем, что усложнение и удорожание самих энергетических объектов и систем управления приводит к тому, что типовые проектные решения по устройствам заземления опор ВЛ, ПС и прокладки кабельных трасс на ПС устаревают и не обеспечивают уже требуемой надежности. Статистика аварий и перебоев в эксплуатации оборудования объектов энергетики указывает на высокую долю грозовых отключений, которая составляет от 20 до 50 % общего числа отключений ВЛ. Грозовые отключения негативно сказываются на эксплуатации, как самих линий, так и подстанционного оборудования, снижая ресурс работы выключателей и вызывая коммутационные перенапряжения на оборудовании. Методические основы молниезащиты опираются на некоторые критические параметры, характеризующие, как прямое воздействие (импульсные сильноточные процессы в грунте), так и наведенное (в результате импульсного воздействия электромагнитных полей в цепях вторичной коммутации и устройствах микропро-

цессорной техники). Эти критические параметры являются нелинейными функциями тока молнии и сильно зависят от свойств объекта воздействия. Определение их прямым путем полномасштабного моделирования импульса тока молнии стало возможным с развитием технологий создания мощной импульсной техники и диагностики, опирающейся на современную электронную базу. Эта задача нашла практическое воплощение в договоре между организациями ОАО «ФСК ЕЭС», ОАО «ЭНИН» и ОИВТ РАН по теме «Разработать, изготовить и провести приемо-сдаточные и полевые испытания мобильного испытательного комплекса предназначенного для полевых испытаний грунтов и заземлителей».

Обзор литературы об источниках энергии для моделирования токовых импульсов молнии, базирующиеся на генераторе (ВМГ) [2–7] показал следующее. Все отмеченные работы, прежде всего, объединяет общий принцип превращения энергии взрывчатого вещества в энергию электромагнитного импульса. Основными отличительными чертами МИК ВМГ являются:

- генератор импульса тока является мобильным и ВМГ является единственным его расходным элементом;
- согласование ВМГ с индуктивно-омической нагрузкой осуществляется с применением импульсного трансформатора, неразрушаемого в процессе работы;

- отсутствие взрывных размыкателей тока в первичной обмотке трансформатора и твердотельных замыкателей в цепи нагрузки.

- специальный закон вывода индуктивности обеспечивался конструкцией последних конусных секций ВМГ и был ответственным за формирование фронта импульса тока.

Первый и второй пункт позволяют сделать комплекс экономически менее затратным, а сам проект – коммерчески оправданным.

Данная статья посвящена описанию работы образца мобильного испытательного комплекса МИК ВМГ и его полевым испытаниям.

### Состав МИК ВМГ и моделирование выходных параметров

МИК ВМГ монтируется на шасси двух автомобилей «КАМАЗ» повышенной проходимости. Генератор импульса тока размещен в кузове-контейнере первого автомобиля. В его состав входят: источник первоначальной энергии; ВМГ, размещенный внутри взрывной камеры; повышающий импульсный трансформатор (ИТ); проходной изолятор. В кузове-контейнере второго автомобиля помещена система управления. Она включает блок жизнеобеспечения обслуживающего персонала, устройство подготовки взрывчатых веществ (ВВ); автономный источник питания; приборы внутреннего контроля и управления; а также контейнер с запасом ВМГ. Система управления через оптоволоконный кабель осуществляет синхронизацию работы ВМГ и регистрирующей аппаратуры. Более подробно большинство технических решений уже докладывалось на конференциях и описано в патентах [8–11].

Математическое моделирование параметров МИК ВМГ базировалось на электротехнической схеме согласования переменной индуктивности ВМГ с индуктивно – омической нагрузкой через ИТ. Но, в отличие от апробированной ранее схемы [8], в данной схеме были исключены взрывные нелинейные элементы. Это размыкатель тока в цепи первичной обмотки ИТ и замыкатель в цепи нагрузки. Присутствие этих элементов, с одной стороны, упрощает формирование временных параметров импульса – фронта и затухания, с другой – вносит нестабильность работы схемы в целом и, как следствие, – нестабильность воспроизводства амплитудных характеристик импульсов тока. Это крайне неблагоприятно для применения МИК ВМГ на практике. В данной схеме благодаря найденному закону вывода индуктивности, или

другими словами соотношению углов между последними конусными секциями ВМГ и углом раскрытия лайнера, был обеспечен фронт импульса тока около 20 мкс [8].

Нагрузка, омическая –  $R_2$  и индуктивная –  $L_L$ , подключена ко вторичной обмотке импульсного трансформатора ИТ, а ВМГ – непосредственно к первичной обмотке ИТ. Кроме того, берется в расчет омическое сопротивление первичного контура  $R_1$ , которое отвечает за потери энергии. Такая схема позволяет контролировать напряжение на нагрузке, задавая нужный режим работы ВМГ. Применение импульсного трансформатора обеспечивает согласование генератора и нагрузки при их сильно отличающихся значениях импедансов. В данной схеме трансформатор работает как накопитель энергии: он передает энергию в нагрузку во время всей фазы работы ВМГ и дополнительно запасает ее. Когда ВМГ перестает работать, накопленная в ИТ энергия передается в нагрузку дополнительно, тем самым увеличивая эффективность такой схемы при условии, если активные потери в первичном контуре не станут значимыми. Для достижения предельной выходной энергии проводилась минимизация потерь энергии в первичном контуре ИТ т. е. в  $R_1$ . Для этого анализируемая электрическая схема была приведена к эквивалентной схеме замещения. Приведение к эквивалентной схеме замещения осуществлялось типичным способом, описанным в [12, 13]. Импульсное воздействие генератора описывалось внесением на вход возмущения напряжения в виде  $\sim u_0 \exp(i\omega t)$  и решение уравнений записывалось в комплексной форме. В итоге, импеданс системы записывался через эквивалентное активное и индуктивное сопротивление  $Z_1 = i\omega L_{eq} + R_{eq}$ , где значения эквивалентных индуктивностей и сопротивлений выражается (1):

$$L_{eq} = L_{1T} - \frac{M^2}{L_{2T} + L_L} = \frac{L_{1T}(1 + \alpha - k_c^2)}{(1 + \alpha)},$$

$$R_{eq} = R_1 + \frac{L_{1T}}{L_{2T}} \frac{k_c^2}{(1 + \alpha)^2} R_2, \quad (1)$$

здесь  $L_{1T}$ ,  $L_{2T}$  – индуктивности первичной и вторичной обмоток трансформатора,  $R_1$ ,  $R_2$  – активные сопротивления первичного и вторичного контуров,  $k_c$  – коэффициент связи обмоток трансформатора,  $M = k_c \sqrt{L_{1T} L_{2T}}$ ,  $\alpha = L_1 / L_{2T}$  – относительная индуктивность нагрузки. Решение для то-

ка в эквивалентной схеме записывалось как

$$I_1 = \Phi_0 \frac{\exp\left(-\int_0^{\tau_{eq}} \frac{R_{eq}}{L_{eq}} dt\right)}{L_{eq}}, \text{ где } \Phi_0 - \text{начальный магнитный поток.}$$

Видно, (рис. 1 а), что на эквивалентную индуктивность влияют параметры  $\alpha$  и  $k_c$ . Эквивалентная индуктивность всегда ниже, чем  $L_{1T}$ . При больших значениях индуктивности нагрузки зависимость от коэффициента связи уменьшается, и она приближается к индуктивности первичного контура трансформатора. Относительно эквивалентного активного сопротивления, оценки показывают, что оно, главным образом, определяется активным сопротивлением первичного контура трансформатора и слабо меняется от параметров второго контура. Это объясняется в нашем случае малым значением отношения индуктивностей трансформатора  $L_1/L_{2T}$ . Схема замещения позволяет рассчитать  $\varepsilon_L$ ,  $\varepsilon_R$  – доли энергии, передающиеся в индуктивную и омическую нагрузку через трансформатор (эффективность передачи энергии в нагрузку) (2):

$$\varepsilon_L = \frac{W_{load}}{W_1} \quad \varepsilon_R = \frac{W_R}{W_1}$$

где 
$$W_R = \int_0^{\tau_p} I_2^2 R_2 dt \quad W_{load} = \frac{L_L I_2^2}{2} \quad (2)$$

$$W_1 = \frac{L_{eq} I_1^2}{2} + \int_0^{\tau_{eq}} I_1^2 R_{eq} dt$$

На рис. 1,б,с) представлены зависимости эффективности передачи энергии в индуктивную,  $\varepsilon_L$ , и активную,  $\varepsilon_R$ , нагрузки от относительной индуктивности нагрузки и от сопротивления нагрузки. Видно, что функции имеют максимумы и, чем идеальней трансформатор ( $k_c \sim 1$ ), тем этот максимум более смещен в сторону меньших  $\alpha = L_L/L_{2T} < 1$ .

Оценки оптимальных значений индуктивностей для передающейся энергии (без учета потерь энергии в активных сопротивлениях) дают соотношение  $\frac{L_{eq}}{L_{1T}} = \frac{L_L}{L_{2T}} = \sqrt{1 - k_c^2}$ . При  $k_c > 0,92$  эффективность может достигать более 50 % для  $\alpha \sim 0,1 - 0,2$  и  $R_2 \sim 1 - 2$  Ом.

Это возможно при минимизации потерь энергии в первичном контуре трансформатора. Условие для эффективной передачи энергии при наличии активных потерь в контурах трансформатора опирается на то, что время затухание импульса в цепи нагрузки должно быть меньше, чем время передачи энергии в нагрузку в эквивалентной схеме замещения, т.е.  $\tau_{2p} \leq \tau_{eq}$ , что равносильно условию

$$\frac{L_L}{R_2} \leq \frac{L_{eq}}{R_{eq}}$$

Подставляя значения из (1), трудно получить условие (3):

$$\frac{R_2}{R_1} \geq \left[ \frac{L_{1T}}{L_{2T} \alpha} \left( 1 - \frac{k_c^2 (1 + 2\alpha)}{(1 + \alpha)^2} \right) \right]^{-1} = \beta_R \quad (3)$$

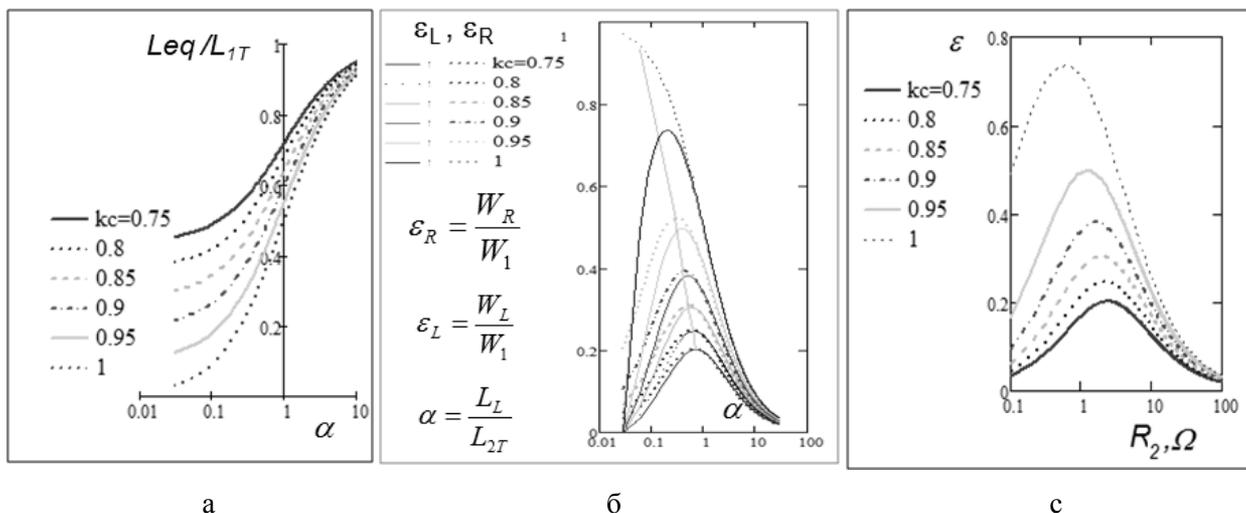


Рис. 1. а – относительная эквивалентная индуктивность в зависимости от  $\alpha$ ; б – эффективность передачи энергии в индуктивную нагрузку,  $\varepsilon_L$ , в омическую нагрузку,  $\varepsilon_R$ , в – зависимости от  $\alpha$ , и с –  $\varepsilon_R$  как функция от  $R_2$

На рис. 2 представлен результат расчета формулы (3) для  $\beta_R$  в логарифмических координатах для обеспечения эффективной передачи энергии в нагрузку.

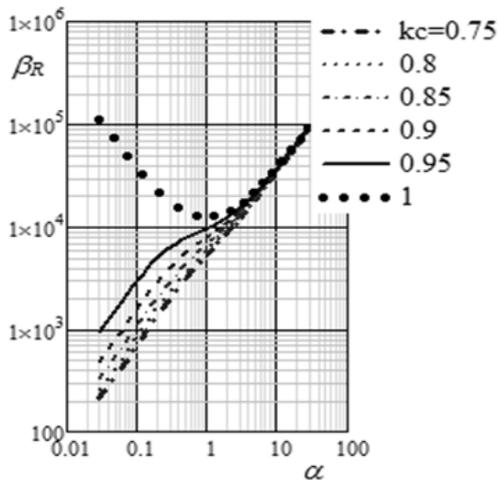


Рис. 2. Зависимость  $\beta_R$  от относительной индуктивности нагрузки  $\alpha$  при разных коэффициентах связи  $k_c$ .

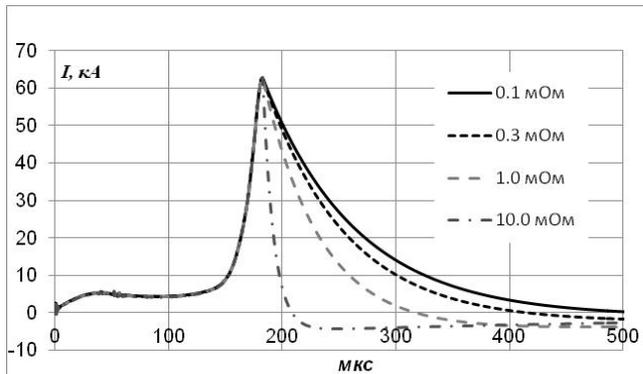


Рис. 3. Модельное распределение импульса тока в нагрузке при разных активных потерях в первичной обмотке ИТ

Это условие легло в основу моделирования импульсов тока заданной амплитуды и длительности при исходных параметрах:  $L_{1T}/L_{2T} \sim 0,55$  мкГн/1700 мкГн; коэффициент связи –  $k_c \sim 0,95$ ; индуктивность нагрузки  $\sim 70$ –100 мкГн; активное сопротивление нагрузки  $\sim 1$ –10 Ом. Начальная индуктивность ВМГ 12,5 мкГн, напряжение источника питания  $\sim 38$  кВ, начальная энергия  $\sim 43$  кДж. Результаты моделирования импульса тока в нагрузке  $R_2 = 1$  Ом представлены на рис. 3.

Как видно из рис. 3, наилучший результат достигается при выполнении условия минимизации

потерь в первичном контуре ВМГ, когда  $\beta_R \sim 5 \times 10^3$ , что соответствует  $R_1 \sim 0,1$  мОм и времени  $\tau_{2p} \sim 70$  микросекунд на полувысоте амплитуды. В этом случае эффективность передачи энергии ВМГ в нагрузку около 50 %. Увеличение активного сопротивления в первичном контуре трансформатора ведет к  $\beta \leq \beta_R$ . При этом время передачи энергии в нагрузку уменьшается, импульс сужается, и эффективность уменьшается тоже. Эти результаты получили экспериментальное подтверждение при полевых испытаниях МИК ВМГ.

### Полевые испытания МИК ВМГ и результаты измерений

Полевые испытания были проведены на площадке – полигоне в Московской области. Время испытаний пришлось на сентябрь 2013 года и совпало с периодом повышенных осадков. Тип почвы площадки, где размещалось оборудование вместе с контурами заземления, – суглинистый.

Цель полевых испытаний МИК ВМГ:

- проверка основных выходных электрофизических параметров, заявленных в проекте;
- обеспечение нескольких рабочих пусков с использованием однотипных взрывомагнитных генераторов (ВМГ) для наработки статистики работы МИК ВМГ;
- тестирование и калибровка контрольно - измерительной аппаратуры.

На рис. 4 представлена схема эксперимента и фото, снятое во время подготовки эксперимента. Схема была разработана специально для ввода импульса тока в нагрузку, которая представляла собой участок грунта между контурами заземления: внутренним и внешним. Внешний контур заземления имел квадратную форму размером  $55 \times 55$  м из кабеля АС120 и был заглублен примерно на 0,5 м. Внутренний контур представлял собою квадрат размером  $15 \times 15$  м в первом эксперименте, во втором –  $4 \times 4$  м. Это позволило изменить сопротивление нагрузки с 2 Ом до 4 Ом. Импульс тока от МИК ВМГ подавался в штангу, принадлежащую внутреннему контуру. Измеренная полная индуктивность контура нагрузки в первом случае была 75 мкГн, во втором 86 мкГн и определялась, главным образом, положением генератора токов молнии по отношению к контуру ввода импульса.

Замер сопротивления нагрузки (грунта) проводился до начала экспериментов. Предполагается, что потенциал внешнего контура (площадью  $55 \times 55$  кв.м, вследствие его малого сопротивления, равен нулю. Это предположение очень хорошо выполняется

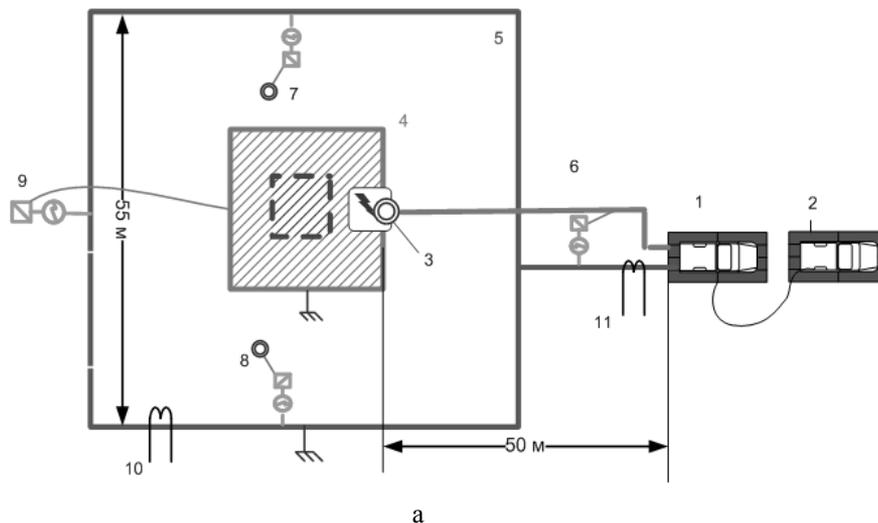


Рис. 4. Схема эксперимента (а) и фото полевых испытаний МИК ВМГ (б). Обозначения: 1 – генератор тока молнии; 2 – автомобиль управления; 3 – штанга ввода тока; 4 – контур ввода тока (1 – сплошная линия,  $15 \times 15$  м,  $R = 2$  Ом), (2 – пунктирная линия,  $4 \times 4$  м,  $R = 4$  Ом); 5 – контур заземления; 6 – делитель № 1; 7 – делитель № 4; 8 – делитель № 3; 9 – делитель № 2; 10 – пояса Роговского ПР3, ПР4; 11 – пояса Роговского ПР1, ПР2

В таблице приводятся параметры МИК ВМГ, измеренные в двух экспериментах.

Параметры	№ эксперимента	<u>1</u>	<u>2</u>
Начальное сопротивление между контурами ввода импульса тока (активная нагрузка), Ом		2	4
Начальная энергия ВМГ, кДж		23	43
Максимальная амплитуда тока в нагрузке, кА		50	63
Энергия, генерированная ВМГ, кДж		980	1590
Максимальная амплитуда напряжения на выходе из МИК ВМГ, кВ		220	450
Максимальная амплитуда напряжения на активной нагрузке, кВ		118	255
Фронт нарастания импульса тока, мкс		30	25
Длительность импульса тока по уровню 0,5 от амплитудного значения, мкс		130	150
Энергия, рассеянная в активной нагрузке, кДж		502	808
Коэффициент усиления выделившейся в нагрузке энергии по отношению к начальной энергии		22	19

(с точностью до 0,5 %) для эксперимента при внутреннем контуре  $4 \times 4$  кв.м (эксперимент № 2) и около 7 % при внутреннем контуре  $15 \times 15$  кв.м. После сигнала с системы управления запускался ВМГ (происходил подрыв ВВ) и запускалась контрольно-измерительная аппаратура. Измерительная аппаратура включала: датчики ПР1-ПР4 (пояса Роговского) для измерения производной тока; делители для измерения напряжений и зонды для определения напряжения в пространстве между контурами.

При каждом пуске производилась запись и сохранение зарегистрированных данных с контрольно-измерительной аппаратуры: начального тока запитки ВМГ; тока ВМГ (первичного контура ИТ); тока в нагрузке (вторичного контура ИТ); выходного напряжения МИК ВМГ; напряжения на нагрузке; напряжения на зондах.

В таблице приводятся параметры МИК ВМГ, измеренные в двух экспериментах.

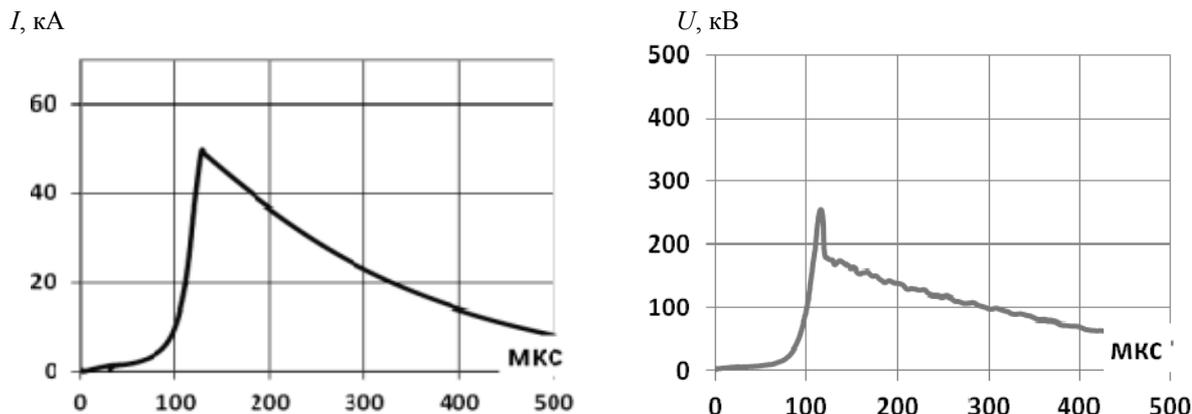


Рис. 5. Измеренные импульсы тока и напряжения в эксперименте № 1

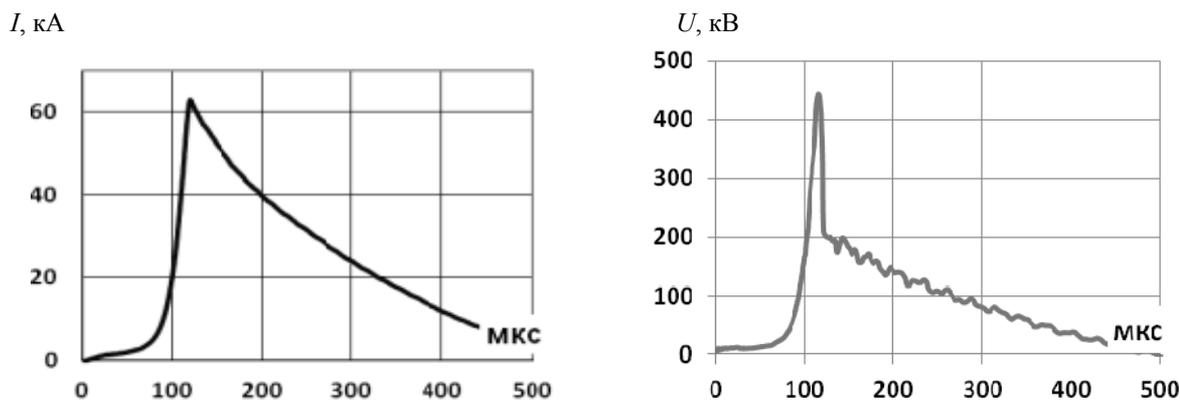


Рис. 6. Измеренные импульсы тока и напряжения в эксперименте № 2

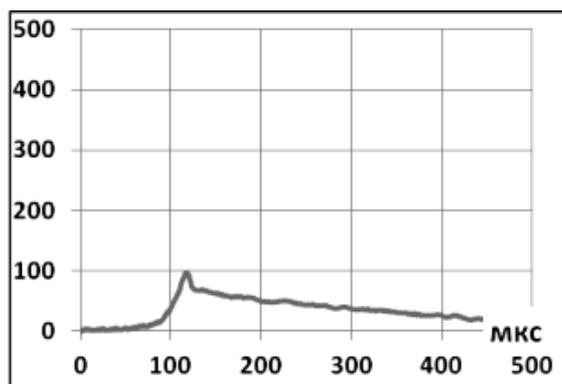


Рис. 7. Напряжение на зонде № 1, кВ в первом эксперименте, внутренний контур  $15 \times 15$  кв.м. (Делитель № 3 на схеме эксперимента, рис. 4)

По значениям энергий, генерируемых ВМГ и передающихся в нагрузку, можно убедиться что эффективность передачи энергии в нагрузку составляет около 50 %. Усиление выделившейся в нагрузку энергии по отношению к начальной энергии, превышает 20 раз, что так же соответствует параметрам, заложенным в проект МИК ВМГ.

На рис. 5–7 представлены осциллограммы токов и напряжений на выходе МИК ВМГ, полученные в экспериментах. По осциллограммам тока видно, что они хорошо воспроизводятся в каждом эксперименте и согласуются с модельными распределениями тока (рис. 3).

Осциллограммы напряжений на делителе напряжения и зонде в первом эксперименте показали, что существенного изменения сопротивления грунта при протекании импульса тока не зарегистрировано. Это подтверждается тем, что активных искровых процессов в почве не было, возможно, вследствие сильного увлажнения почвы и ее низкого начального омического сопротивления.

Предельные параметры МИК ВМГ, а именно выходная энергия 2,5 МДж и выходное напряжение свыше 1 МВ планируется достичь в следующих полевых испытаниях на контурах с сопротивлением до 10 Ом.

### Заключение

Результаты проведенных полевых испытаний позволяют вынести в заключение следующие факты:

- ✓ Создан образец мобильного испытательного комплекса на основе взрывомагнитного генератора (МИК ВМГ) для полномасштабного моделирования воздействия импульсов тока молнии амплитудой до 70 кА и длительностью около 150 микросекунд на объектах с сопротивлением до 10 Ом и индуктивностью до 200 мкГн;

- ✓ Численное моделирование работы МИК ВМГ позволило определить оптимальные параметры, обеспечивающие передачу энергии в нагрузку более 50 %;

К областям приоритетного применения МИК ВМГ следует отнести области его эффективной работы:

- ✓ проверки заземлителей электрических подстанций, имеющих регламентированный предел сопротивления заземления до 1 Ома;

- ✓ проверки электроники оборудования ПС на электромагнитную устойчивость к воздействию разрядов молнии;

- ✓ исследования наведенных токов во вторичных цепях за счет индуктивных связей;

- ✓ фундаментальные задачи по исследованию нелинейных процессов от мощного импульсного воздействия, в том числе и в грунте, имеющем низкое активное сопротивление.

### Список литературы

1. Базелян Э. М., Райзер Ю. П. Физика молнии и молниезащиты. / М.: Физматлит. 2001.

2. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. / М.: Мир, 1972.

3. Фортов В. Е. Взрывные генераторы мощных импульсов электрического тока / Под ред. В. Е. Фортова. М.: Наука, 2002.

4. Павловский А. И., Людаев Р. З. Вопросы современной экспериментальной и теоретической физики. / М.: Наука, 1984.

5. Вилков Ю. В., Кравченко А. С., Саиткулов М. М., Селемир В. Д., Тютяев А. А. Магнитокумулятивный источник энергии для воспроизведения токового импульса молнии на разветвленной системе защитного заземления // Приборы и техника эксперимента. 2012. № 5. С. 73–78

6. Вилков Ю. В., Кравченко А. С. Источник энергии для моделирования токовых импульсов молнии. // Приборы и техника эксперимента. 2006. № 4. С. 79–87

7. Шурупов А. В., Дудин С. В., Леонтьев А. А., Козлов А. В., Минцев В. Б., Ушнурцев А. Е., Фортов В. Е., Поварешкин М. Н., Шурупова Н. П. Взрывомагнитный генератор для мобильных имитаторов токов молнии // XII Международная конференция по генерации мегагауссных магнитных полей и родственным экспериментам. Новосибирск. 13–18 июля 2008 г.

8. Борискин А. С., Власов Ю. В., А. В. Васкин, В. А. Демидов, В. А. Ионов, Кутумов С. В., Романов А. П., Щетников Е. И. Источник энергии на основе спиральных взрывомагнитных генераторов для высокоимпедансных нагрузок // Приборы и техника эксперимента. 2004. № 5. С. 76–81.

9. Патент на полезную модель № 107855. Взрывозащитная камера.

10. Патент на полезную модель № 112501. Взрывомагнитный генератор.

11. Патент на полезную модель № 111346. Высоковольтный импульсный трансформатор.

12. Larry L. Altgilbers, Igor Grishnaev, Ivor R. Smith, Yuriy Tkach, Mark D. J. Brown, Bucur M. Novac, Iaroslav Tkach (auth.) / Springer New York, Series: High-Pressure Shock Compression of Condensed Matte. 2000.

13. Herlach F. Explosive-driven energy generators with transformer coupling // J. Phys. E: Sci. Instrum., 1979. Vol. 12. p. 421–429.