

УДК 533.9 + 621.373.9

МОБИЛЬНЫЙ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС НА ОСНОВЕ ВЗРЫВОМАГНИТНОГО ГЕНЕРАТОРА

А. В. Шурупов, А. В. Козлов, А. Н. Гусев, Н. П. Шурупова,
В. Е. Завалова, А. Н. Чулков*, Э. М. Базелян**

Объединенный институт высоких температур, 125412 Москва, Россия

* Закрытое акционерное общество "Специальные энергетические технологии",
140700 Шатура, Россия

** Энергетический институт им. Г. М. Кржижановского, 117927 Москва, Россия
E-mails: shurupov@fites.ru, kozlov@fites.ru, a.n.gusev70@mail.ru, npshur@mail.ru,
zavalova@fites.ru, chulkov@specpowtech.ru, bazelyan@eninnet.ru

Для моделирования импульса тока молнии разработан опытный образец мобильного испытательного комплекса на основе взрывомагнитного генератора (МИК ВМГ), главным элементом которого является генератор импульса тока, включающий ВМГ с импульсным трансформатором для вывода энергии в нагрузку. Проведен теоретический анализ электрической схемы МИК ВМГ с учетом потерь энергии на активных сопротивлениях в первичном контуре трансформатора и индуктивно-омического характера нагрузки, в результате которого получено условие минимизации потерь энергии в первичном контуре в зависимости от параметров схемы. Установлено, что при выполнении условия минимизации потерь энергии эффективность передачи энергии ВМГ в нагрузку превышает 50 %. В результате полевых испытаний МИК ВМГ определены его основные характеристики и получены осциллограммы импульсов тока и напряжений в нагрузке. Показано, что результаты математического моделирования импульса тока в нагрузке хорошо согласуются с данными экспериментов.

Ключевые слова: взрывомагнитный генератор, импульсный трансформатор, генерация токов молнии, полевые испытания.

Введение. Изучению физики молнии с целью построения эффективных систем молниезащиты посвящено большое количество работ. В [1] проведена систематизация представлений о механизмах возникновения, развития и воздействия молнии на различные объекты. Однако проблемы молниезащиты не теряют актуальности. Это объясняется прежде всего усложнением и удорожанием самих энергетических объектов и систем управления, вследствие чего типовые проектные решения для устройств заземления опор высоковольтных воздушных линий электропередачи, электрических подстанций и прокладки кабельных трасс на электрических подстанциях устаревают и не обеспечивают требуемую надежность. Согласно статистике аварий и перебоев в эксплуатации оборудования объектов энергетики доля грозовых отключений составляет от 20 до 50 % общего числа отключений ВЛ, т. е. является достаточно высокой. Грозовые отключения оказывают негативное воздействие как на сами линии, так и на подстанционное оборудование, снижая ресурс работы выключателей и вызывая коммутационные перенапряжения на оборуду-

довании. При разработке методики молниезащиты используются 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 микропроцессорной техники). Эти критические параметры являются нелинейными функциями тока молнии и существенно зависят от свойств объекта воздействия. Определение их путем прямого моделирования импульса тока молнии стало возможным с появлением технологий создания мощной импульсной техники и методов диагностики, в которых используется современная электронная база.

Анализ работ, посвященных исследованию создаваемых с помощью взрывомагнитного генератора (ВМГ) источников энергии, применимых при моделировании токовых импульсов молнии [2–7], показал, что такие источники энергии построены на основе принципа превращения энергии взрывчатого вещества (ВВ) в энергию электромагнитного импульса. Мобильный испытательный комплекс (МИК) на основе ВМГ имеет следующие особенности:

1) генератор импульса тока является мобильным и ВМГ — его единственный расходный элемент;

2) взаимодействие ВМГ с индуктивно-омической нагрузкой осуществляется с использованием импульсного трансформатора, не разрушаемого в процессе работы;

3) отсутствуют взрывные размыкатели тока в первичной обмотке трансформатора и твердотельные замыкатели в цепи нагрузки;

4) выполнение закона изменения индуктивности обеспечивается с помощью последних конусных секций ВМГ, в результате чего формируется фронт импульса тока.

Использование элементов конструкции, указанных в пп. 1, 2, позволяет создать экономически более выгодный МИК ВМГ.

В данной работе описан принцип действия образца мобильного испытательного комплекса на основе ВМГ и приведены результаты его полевых испытаний.

Элементы МИК ВМГ. Определение выходных параметров. МИК ВМГ монтируется на шасси двух автомобилей КамАЗ повышенной проходимости. В кузов-контейнер первого автомобиля помещен генератор импульса тока, включающий источник начальной энергии; ВМГ, находящийся внутри взрывной камеры; повышающий импульсный трансформатор (ИТ); проходной изолятор. В кузове-контейнере второго автомобиля находится система управления, включающая блок жизнеобеспечения обслуживающего персонала; устройство подготовки ВВ; автономный источник питания; приборы внутреннего контроля и управления; контейнер с запасом ВМГ. Система управления через оптоволоконный кабель осуществляет синхронизацию работы ВМГ и регистрирующей аппаратуры. Более подробно большинство технических решений описано в [8–11].

При определении параметров МИК ВМГ использовалась электротехническая схема согласования переменной индуктивности ВМГ с индуктивно-омической нагрузкой через ИТ, но в отличие от апробированной ранее схемы [8] в данную схему не включались взрывные нелинейные элементы: размыкатель тока в цепи первичной обмотки ИТ и замыкатель в цепи нагрузки. Наличие этих элементов, с одной стороны, упрощает формирование временных параметров импульса (длительности и времени затухания), с другой — обуславливает нестабильность работы схемы в целом и как следствие нестабильность воспроизводства амплитудных характеристик импульсов тока, что крайне невыгодно для применения МИК ВМГ на практике. В предлагаемой схеме за счет использования полученного закона изменения индуктивности (закона изменения углов сопряжения последних конусных секций ВМГ и угла раскрытия лайнера) была обеспечена длительность импульса тока ≈ 20 мкс [8].

Омическая R_2 и индуктивная L_L нагрузки подключены ко вторичной обмотке импульсного трансформатора ИТ, а ВМГ — непосредственно к первичной обмотке ИТ. Кроме

того, учитывается омическое сопротивление R_1 в первичном контуре, от которого зависят потери энергии. Использование такой схемы позволяет контролировать напряжение на нагрузке, задавая нужный режим работы ВМГ. Применение импульсного трансформатора обеспечивает взаимодействие генератора и нагрузки при существенно различающихся значениях их импедансов. В данной схеме трансформатор работает как накопитель энергии: передает энергию в нагрузку в течение всего периода работы ВМГ и дополнительно запасает ее. Когда ВМГ прекращает работать, накопленная в ИТ энергия передается в нагрузку, за счет чего увеличивается эффективность схемы при условии, что активные потери энергии в первичном контуре не станут значительными. Для достижения предельной выходной энергии проводилась минимизация потерь энергии в первичном контуре ИТ. Для этого анализируемая электрическая схема была преобразована в эквивалентную схему замещения [12, 13]. Импульсное воздействие генератора моделировалось возмущением напряжения на входе по закону $u_0 \exp(i\omega t)$. Решение уравнений записывалось в комплексной форме. В результате импеданс системы выражался через эквивалентные активное и индуктивное сопротивления:

$$Z_1 = i\omega L_{eq} + R_{eq},$$

где L_{eq} , R_{eq} — значения эквивалентных индуктивностей и сопротивлений:

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

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; $M = k_c \sqrt{L_{1T} L_{2T}}$; $\alpha = L_L / L_{2T}$ — относительная индуктивность нагрузки. Выражение для тока в эквивалентной схеме записывалось в виде

$$I_1 = \frac{\Phi_0}{L_{eq}} \exp\left(-\int_0^{\tau_{eq}} \frac{R_{eq}}{L_{eq}} dt\right),$$

где Φ_0 — начальный магнитный поток.

На рис. 1 приведена зависимость относительной эквивалентной индуктивности от относительной индуктивности нагрузки. Видно, что на эквивалентную индуктивность влияют параметры α и k_c . Эквивалентная индуктивность всегда меньше L_{1T} . При больших значениях индуктивности нагрузки ее зависимость от коэффициента связи становится более слабой, и индуктивность нагрузки стремится к индуктивности первичного контура трансформатора. Эквивалентное активное сопротивление в основном определяется активным сопротивлением первичного контура трансформатора и слабо зависит от параметров вторичного контура. В данном случае это объясняется малостью значения отношения индуктивностей трансформатора L_{1T}/L_{2T} . С использованием схемы замещения можно вычислить доли энергии ε_L , ε_R , передающейся в индуктивную и омическую нагрузки через трансформатор (эффективность передачи энергии в нагрузку):

$$\varepsilon_L = \frac{W_L}{W_1}, \quad \varepsilon_R = \frac{W_R}{W_1}.$$

Здесь

$$W_R = \int_0^{\tau_p} I_2^2 R_2 dt, \quad W_L = \frac{L_L I_2^2}{2}, \quad W_1 = \frac{L_{eq} I_1^2}{2} + \int_0^{\tau_{eq}} I_1^2 R_{eq} dt.$$

На рис. 2, 3 представлены зависимости эффективности передачи энергии в индуктивную (ε_L) и активную (ε_R) нагрузки от относительной индуктивности нагрузки и сопротивления нагрузки. Видно, что данные функции имеют максимумы, при этом чем ближе

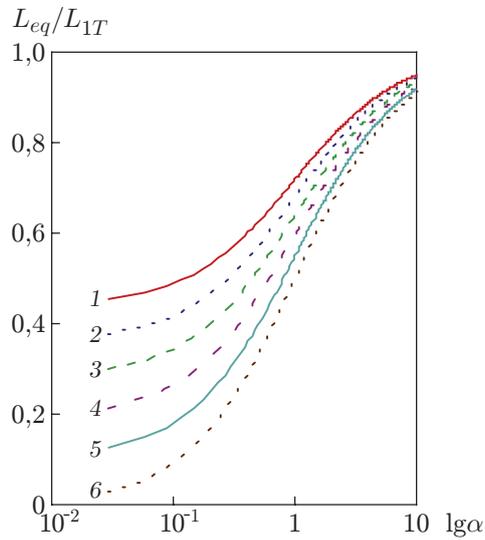


Рис. 1. Зависимость относительной эквивалентной индуктивности от относительной индуктивности нагрузки при различных значениях k_c :
 1 — $k_c = 0,75$, 2 — $k_c = 0,8$, 3 — $k_c = 0,85$, 4 — $k_c = 0,9$, 5 — $k_c = 0,95$, 6 — $k_c = 1$

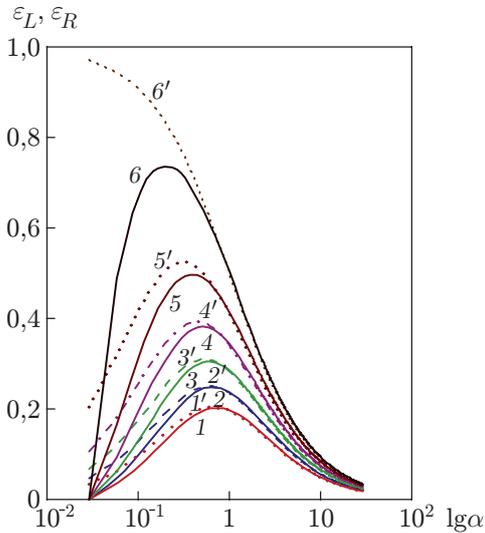


Рис. 2

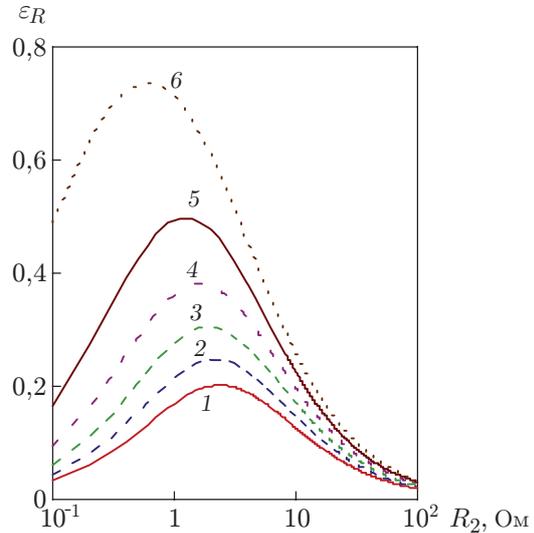


Рис. 3

Рис. 2. Зависимости эффективности передачи энергии в индуктивную ε_L (1–6) и омическую ε_R (1'–6') нагрузку от относительной индуктивности нагрузки при различных значениях k_c :
 1, 1' — $k_c = 0,75$, 2, 2' — $k_c = 0,8$, 3, 3' — $k_c = 0,85$, 4, 4' — $k_c = 0,9$, 5, 5' — $k_c = 0,95$, 6, 6' — $k_c = 1$

Рис. 3. Зависимость эффективности передачи энергии в активную нагрузку от сопротивления нагрузки при различных значениях k_c :
 1 — $k_c = 0,75$, 2 — $k_c = 0,8$, 3 — $k_c = 0,85$, 4 — $k_c = 0,9$, 5 — $k_c = 0,95$, 6 — $k_c = 1$

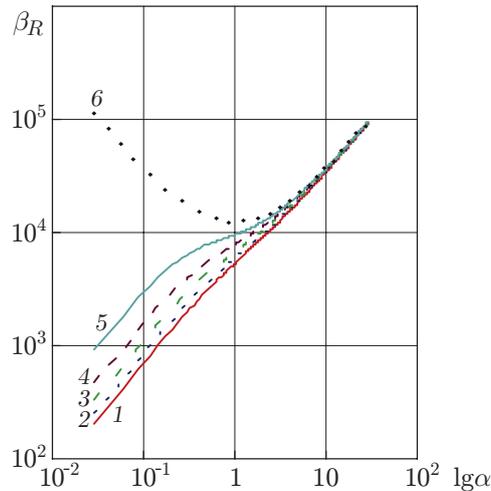


Рис. 4. Зависимость величины β_R от относительной индуктивности нагрузки при различных значениях k_c :

1 — $k_c = 0,75$, 2 — $k_c = 0,8$, 3 — $k_c = 0,85$, 4 — $k_c = 0,9$, 5 — $k_c = 0,95$, 6 — $k_c = 1$

трансформатор к идеальному ($k_c \approx 1$), тем больше смещение этих максимумов в сторону меньших значений α ($\alpha < 1$).

Для оптимальных значений индуктивности передающейся энергии (без учета потерь энергии в активных сопротивлениях) получено соотношение

$$\frac{L_{eq}}{L_{1T}} = \frac{L_L}{L_{2T}} = \sqrt{1 - k_c^2}.$$

При $k_c > 0,92$, $\alpha = 0,1 \div 0,2$, $R_2 = 1 \div 2$ Ом эффективность передачи энергии может превышать 50 %. Такая эффективность может быть достигнута при минимизации потерь энергии в первичном контуре трансформатора. Эффективная передача энергии при наличии активных потерь в контурах трансформатора возможна, если время затухания импульса в цепи нагрузки меньше времени передачи энергии в нагрузку в эквивалентной схеме замещения: $\tau_{2p} \leq \tau_{eq}$, что равносильно условию $L_L/R_2 \leq L_{eq}/R_{eq}$. С использованием (1) получаем условие

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

На рис. 4 представлена зависимость величины β_R от относительной индуктивности нагрузки, полученная в соответствии с определением β_R (см. (2)).

Условие (2) использовалось при моделировании импульсов тока с заданными амплитудой и длительностью при следующих значениях исходных параметров: $L_{1T}/L_{2T} \approx 0,55/1700$ мкГн, коэффициент связи $k_c \sim 0,95$, индуктивность нагрузки $L_L = 70 \div 100$ мкГн; активное сопротивление нагрузки $R_2 = 1 \div 10$ Ом. Начальная индуктивность ВМГ 12,5 мкГн, напряжение источника питания ≈ 38 кВ, начальная энергия ≈ 43 кДж.

Результаты моделирования импульса тока в нагрузке $R_2 = 1$ Ом представлены на рис. 5. Видно, что максимальная эффективность передачи энергии достигается при выполнении условия минимизации потерь в первичном контуре ВМГ при $\beta_R \approx 5 \cdot 10^3$, что соответствует сопротивлению $R_1 \approx 0,1$ мОм и времени $\tau_{2p} \approx 70$ мкс. В этом случае эффективность передачи энергии ВМГ в нагрузку составляет приблизительно 50 %. Увеличение активного сопротивления в первичном контуре трансформатора приводит к нарушению условия $\beta \leq \beta_R$. При этом время передачи энергии в нагрузку уменьшается, импульс

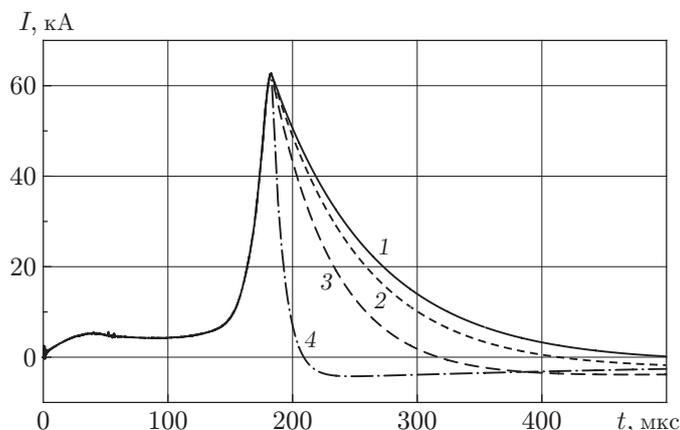


Рис. 5. Распределение импульса тока в нагрузке при различных активных потерях в первичной обмотке ИТ:

1 — $R_1 = 0,1$ МОм, 2 — $R_1 = 0,3$ МОм, 3 — $R_1 = 1$ МОм, 4 — $R_1 = 10$ МОм

“сужается”, и эффективность передачи энергии также уменьшается. Эти результаты были экспериментально подтверждены при проведении испытаний МИК ВМГ.

Полевые испытания МИК ВМГ и результаты измерений. Полевые испытания проводились на полигоне, находящемся в Московской области, в сентябре 2013 г. в период увеличения количества осадков. Почва площадки, на которой размещалось оборудование вместе с контурами заземления, была суглинистой. Целями полевых испытаний МИК ВМГ являлись проверка основных выходных электрофизических параметров, указанных в проекте; обеспечение нескольких рабочих пусков с использованием однотипных ВМГ для получения статистических данных о работе МИК ВМГ; тестирование и калибровка контрольно-измерительной аппаратуры.

На рис. 6 представлена схема эксперимента, разработанная специально для ввода импульса тока в нагрузку, представляющую собой участок грунта между внутренним и внешним контурами заземления. Внешний контур заземления, изготовленный из кабеля АС120, имел форму квадрата размером 55×55 м и располагался на глубине $\approx 0,5$ м. Внутренний контур представлял собой квадрат, который в эксперименте 1 имел размер 15×15 м, в эксперименте 2 — 4×4 м. Это позволило увеличить сопротивление нагрузки с 2 до 4 Ом. Импульс тока от МИК ВМГ подавался в штангу, находящуюся во внутреннем контуре. Измеренная полная индуктивность контура нагрузки, в первом эксперименте составлявшая 75 мкГн, во втором — 86 мкГн, определялась главным образом положением генератора токов молнии относительно контура ввода импульса.

Замер сопротивления нагрузки (грунта) проводился до начала экспериментов. Предполагалось, что вследствие малости сопротивления внешнего контура размером 55×55 м его потенциал равен нулю. В эксперименте с внутренним контуром размером 4×4 м (эксперимент 2) равенство нулю выполняется с погрешностью 0,5 %, в эксперименте с внутренним контуром размером 15×15 м — с погрешностью 7 %. После подачи сигнала с системы управления запускался ВМГ (происходил подрыв ВВ) и включалась контрольно-измерительная аппаратура, включавшая датчики ПР1–ПР4 (пояса Роговского) для измерения производной тока, делители для измерения напряжений и зонды для определения напряжения в пространстве между контурами.

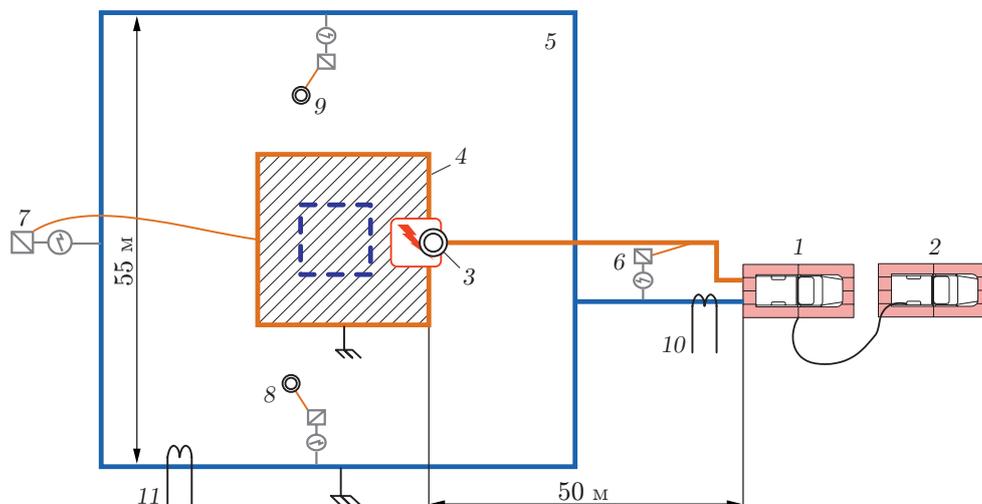


Рис. 6. Схема эксперимента:

1 — генератор тока молнии; 2 — автомобиль управления; 3 — штанга ввода тока; 4 — контур ввода тока (сплошная линия — контур размером 15×15 м ($R = 2$ Ом), штриховая — контур размером 4×4 м ($R = 4$ Ом)); 5 — контур заземления; 6 — делитель 1; 7 — делитель 2; 8 — делитель 3; 9 — делитель 4; 10 — пояса Роговского ПР1, ПР2; 11 — пояса Роговского ПР3, ПР4

Значения основных параметров МИК ВМГ

Номер эксперимента	R_n , Ом	W_n , кДж	I_{max} , кА	$W_{ВМГ}$, кДж	$(U_v)_{max}$, кВ	$(U_{a,n})_{max}$, кВ	τ , мкс	$\tau_{0,5}$, мкс	W_p , кДж	ΔW
1	2	23	50	900	220	118	30	150	510	22
2	4	43	63	1500	450	255	25	130	880	20

Примечание. R_n — начальное сопротивление между контурами ввода импульса тока (активная нагрузка); W_n — начальная энергия ВМГ; I_{max} — максимальная амплитуда тока в нагрузке; $W_{ВМГ}$ — энергия, генерируемая ВМГ; $(U_v)_{max}$ — максимальное напряжение на выходе из МИК ВМГ; $(U_{a,n})_{max}$ — максимальное напряжение на активной нагрузке; τ — длительность фронта нарастания импульса тока; $\tau_{0,5}$ — длительность импульса тока по уровню 0,5 относительно максимального значения; W_p — энергия, рассеянная в активной нагрузке; ΔW — отношение энергии, выделившейся в нагрузке, к начальной энергии.

При каждом пуске проводились запись и сохранение следующих данных контрольно-измерительной аппаратуры: начального тока запитки ВМГ, тока ВМГ (в первичном контуре ИТ), тока в нагрузке (во вторичном контуре ИТ), выходного напряжения МИК ВМГ, напряжения на нагрузке, напряжения на зондах.

В таблице приведены значения основных параметров МИК ВМГ, полученные в двух экспериментах. По значениям энергии ВВ и энергии, передающейся в нагрузку, можно судить об эффективности передачи энергии. В рассматриваемом случае эффективность передачи энергии составляет $\approx 50\%$. Энергия, выделившаяся в нагрузке, более чем в 20 раз превышает начальную энергию ВМГ, что соответствует параметрам, указанным в проекте МИК ВМГ. На рис. 7–9 представлены осциллограммы токов и напряжений на выходе из МИК ВМГ, полученные в экспериментах. Видно, что осциллограммы тока хорошо воспроизводятся в каждом эксперименте и согласуются с модельными распределениями тока (см. рис. 5).

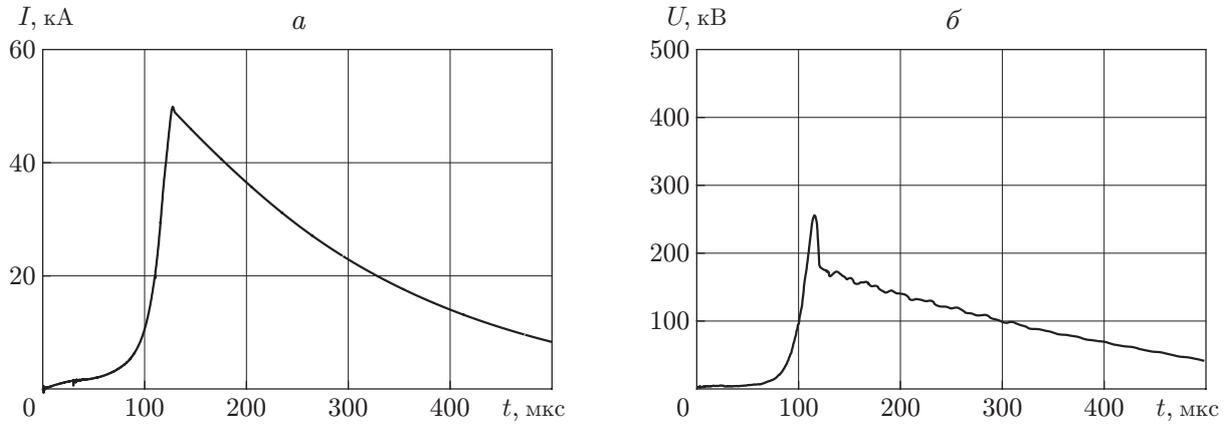


Рис. 7. Импульсы тока (а) и напряжения (б) в эксперименте 1

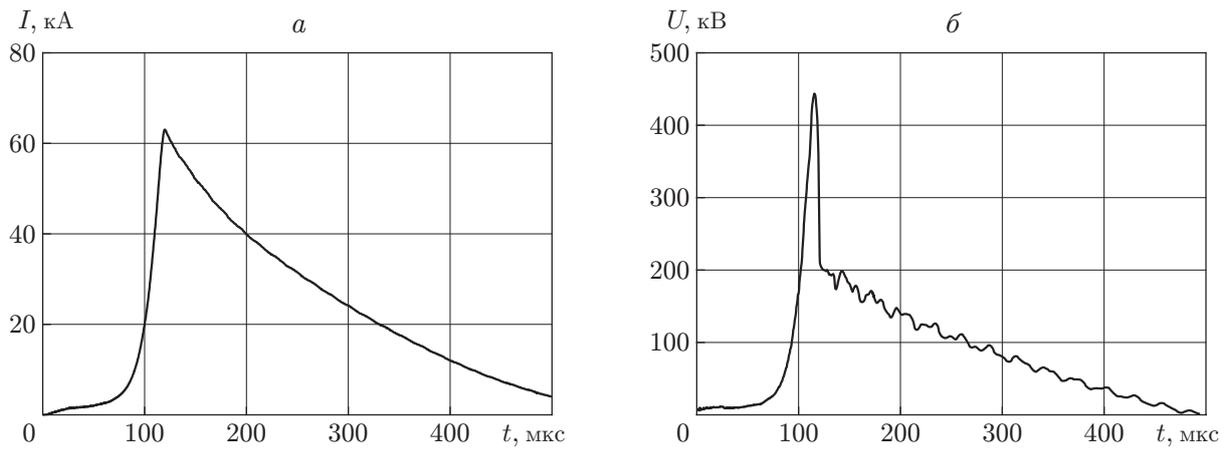


Рис. 8. Импульсы тока (а) и напряжения (б) в эксперименте 2

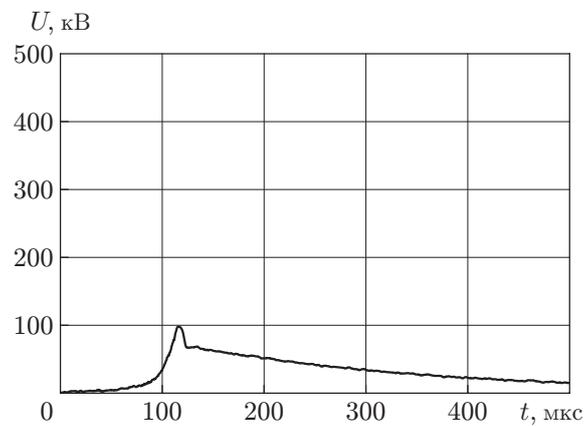


Рис. 9. Напряжение на делителе 3 (см. рис. 6) в эксперименте 1

Результаты анализа осциллограмм напряжений на делителе напряжения и зонде в эксперименте 1 показывают, что при действии импульса тока существенного изменения сопротивления грунта не происходит. Этот результат подтверждается отсутствием активных искровых процессов в почве, что, по-видимому, обусловлено сильным увлажнением почвы и ее низким начальным омическим сопротивлением.

Заключение. В работе приведены описание экспериментального образца МИК ВМГ и результаты первых полевых испытаний. Анализ экспериментальных данных позволяет сделать вывод об эффективности созданного комплекса.

Предложены формулы, позволяющие определять выходные параметры МИК ВМГ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Базелян Э. М.** Физика молнии и молниезащиты / Э. М. Базелян, Ю. П. Райзер. М.: Физматлит, 2001.
2. **Кнопфель Г.** Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: Мир, 1972.
3. **Взрывные генераторы мощных импульсов электрического тока** / Под ред. В. Е. Фортова. М.: Наука, 2002.
4. **Павловский А. И.** Вопросы современной экспериментальной и теоретической физики / А. И. Павловский, Р. З. Людаев. М.: Наука, 1984.
5. **Вилков Ю. В., Кравченко А. С., Саиткулов М. М. и др.** 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. и др.** Взрывомагнитный генератор для мобильных имитаторов токов молнии // Тр. 12-й Междунар. конф. по генерации мегагауссовых магнитных полей и родственными экспериментам, Новосибирск, 13–18 июля 2008 г. [Электрон. ресурс]. Новосибирск: Ин-т гидродинамики, 2010. С. 298–304.
8. **Борискин А. С., Власов Ю. В., Васькин А. В. и др.** Источник энергии на основе спиральных взрывомагнитных генераторов для высокоимпедансных нагрузок // Приборы и техника эксперимента. 2004. № 5. С. 76–81.
9. **Пат. 107855 RU, F 42 D 5/00 (2006.01).** Взрывозащитная камера / А. В. Шурупов, А. Н. Чулков, И. А. Смирнов. Опубл. 27.08.11, Бюл. № 24.
10. **Пат. 112501 RU, H 01 H 39/00 (2006.01).** Взрывомагнитный генератор / А. В. Шурупов, Р. Н. Бердников, В. Е. Фортов и др. Опубл. 10.01.12, Бюл. № 1.
11. **Пат. 111346 RU, H 01 F 30/08 (2006.01).** Высоковольтный импульсный трансформатор / А. В. Шурупов, Р. Н. Бердников, В. Е. Фортов. Опубл. 10.12.11, Бюл. № 34.
12. **Altgilbers L. L.** Magnetocumulative generators / L. L. Altgilbers, I. Grishnaev, I. R. Smith, Y. Tkach, M. D. J. Brown, B. M. Novac, I. Tkach. N. Y.: Springer, 2000. (Ser. High-pressure shock compression of condensed matter).
13. **Herlach F.** Explosive-driven energy generators with transformer coupling // J. Phys. E: Sci. Instrum. 1979. V. 12, N 5. P. 421–429.

Поступила в редакцию 16/X 2014 г.