

VI РОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПО МОЛНИЕЗАЩИТЕ

17—19 апреля, 2018. Санкт-Петербург



РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИМПУЛЬСНОГО (ЭМИ) ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЛЯ ЗАДАЧ МОЛНИЕЗАЩИТЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

*А. В. Шурупов, А. В. Козлов, В. Е. Завалова, М. А. Шурупов,
А. В. Маштаков, А. В. Петров*



Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН)

Цель работы

Создание мощных генераторов импульсов тока и электромагнитного излучения для проверки устойчивости энергетических систем



Теоретические основы – оценки

Применение электро взрывных проводников (ЭВП) с \varnothing 80-120 μ длиной 1 м – для обострения фронта импульса напряжения возможно при условиях:

1. Удельная вложенная энергия:

$$w/w_{cu} \quad \text{где } w_{cu} = 5.28, \text{ кДж/г}$$

2. Связь с геометрическими размерами:

$$S_{sum} = \sqrt{I_d \rho_e / (w \cdot \rho_{Cu})} \quad , \text{ [m}^2\text{]}$$

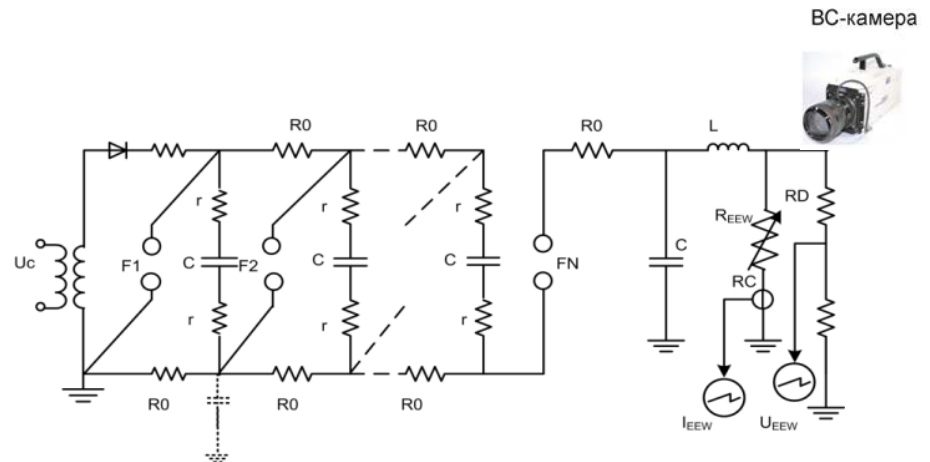
$$\text{где } I_d = \int_0^\tau I(t)^2 dt \text{ - интеграл действия тока}$$

3. Скорость ввода энергии: $\frac{dW}{dt} > j_c^2 \cdot \rho_e$

при временном масштабе взрыва: $\tau_e = r_0 \sqrt{\rho_{Cu}^* / P_{Cu}^*}$ - порядка 70-100 нс

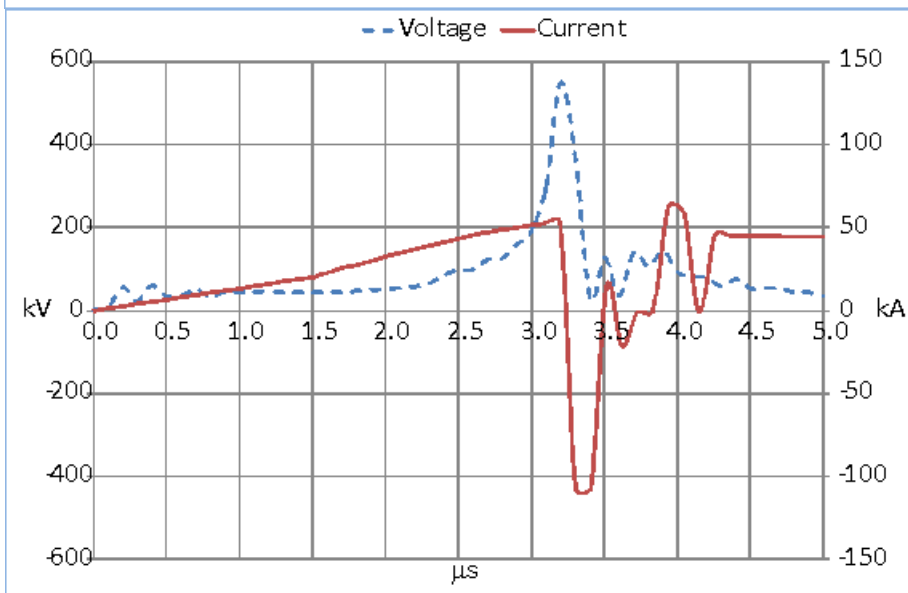
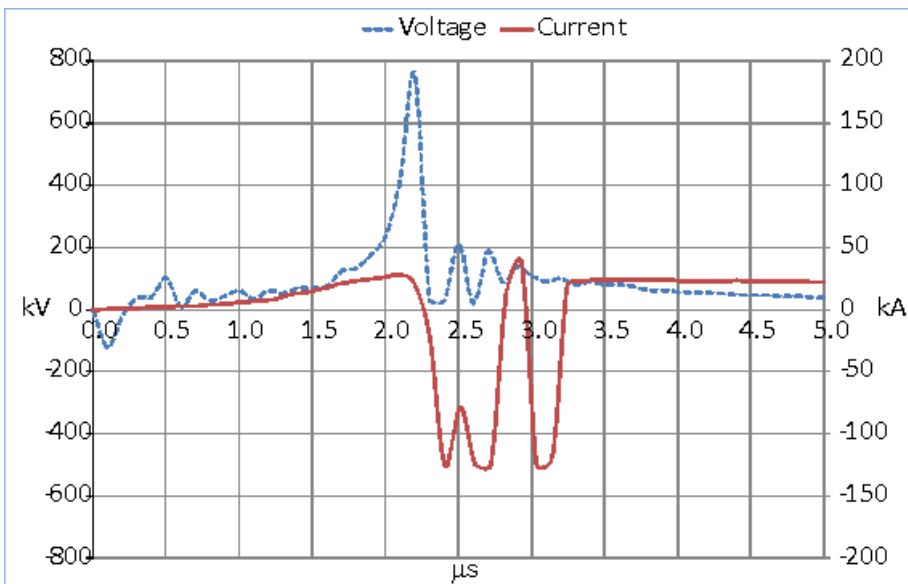
Импульсный источник на основе генератора импульсных напряжений (ГИН)

$U_0 = 20 \dots 25 \text{ kV}$, суммарная емкость $C = 1.2 \text{ }\mu\text{F}$,
Выходное напряжение ГИН $U = 200\text{-}250 \text{ kV}$, $E_0 = 30 \text{ кДж}$



10 ступеней ГИН,
воздушная линия $L = 5.5 \text{ }\mu\text{H}$, $2\text{m} \times 2\text{m} \times 2\text{m}$
 R_{EEW} – ЭВП,
 R_C – пояса Роговского,
 R_D – делитель напряжения

Результаты экспериментов с ГИН



- 5 проводников, $\varnothing 120 \mu$, $m = 0.5 \text{ g}$

Вложенная в ЭВП энергия $w_{EEW} \sim 10 \text{ kJ/g}$

w_{EEW}/w_{Cu} (по отношению к энергии сублимации меди) ~ 2

Плотность тока $\sim 4.7 \cdot 10^{11} \text{ A/m}^2$

$dR/dt \sim 0.150 \Omega/\text{ns}$

Напряженность электрического поля $\sim 800 \text{ kV/m}$

$U_{\text{max}}/U \sim 3.45$

Рост магнитной индукции $dB/dt \sim -0.2 \text{ T}/\mu\text{s}$

- 10 проводников, $\varnothing 120 \mu$, $m = 1.0 \text{ g}$

Вложенная в ЭВП энергия $\sim 7 \text{ kJ/g}$

$w_{EEW}/w_{Cu} \sim 1.4$

Плотность тока $\sim 5 \cdot 10^{11} \text{ A/m}^2$

$dR/dt \sim 0.100 \Omega/\text{ns}$

Напряженность электрического поля $\sim 600 \text{ kV/m}$

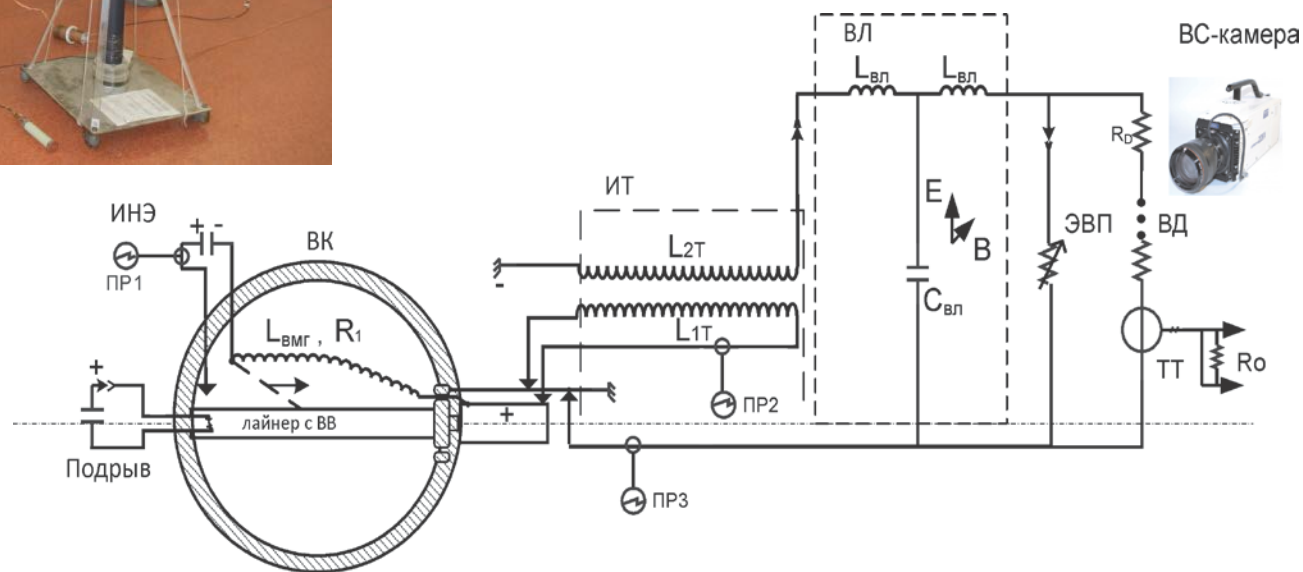
$U_{\text{max}}/U \sim 2.6$

Рост магнитной индукции $dB/dt \sim -0.18 \text{ T}/\mu\text{s}$

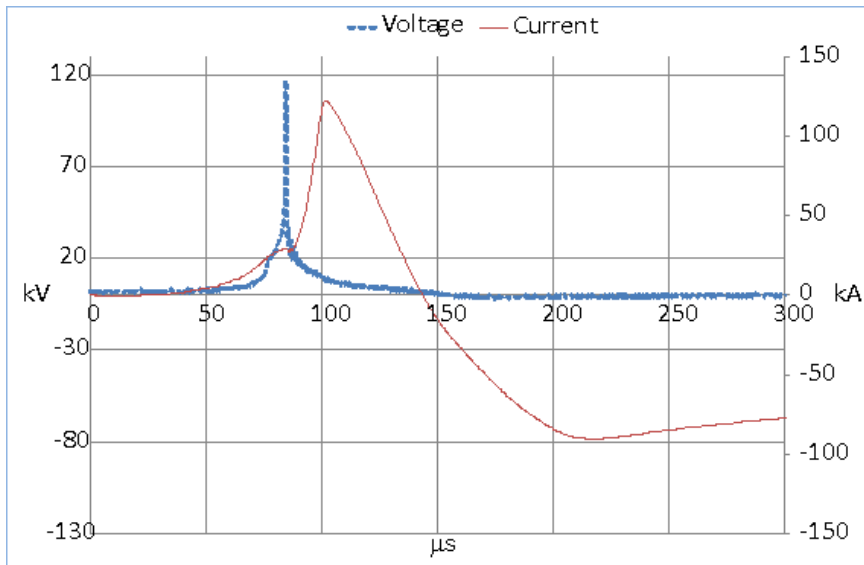
Импульсный источник на основе взрывомагнитного генератора (ВМГ)



ВМГ заряжается от ИНЭ,
 $C = 90 \mu\text{F}$, $U_0 = 18 \text{ kV}$,
 $E_0 = 15 \text{ кДж}$
 $L_{1T} = 0,14 \text{ мкГн}$,
 $L_{2T} = 14,5 \text{ мкГн}$,
 $\eta_c = 0,96$, $\eta_t = 10$.
 Воздушная линия та же
 $L = 5.5 \mu\text{H}$.

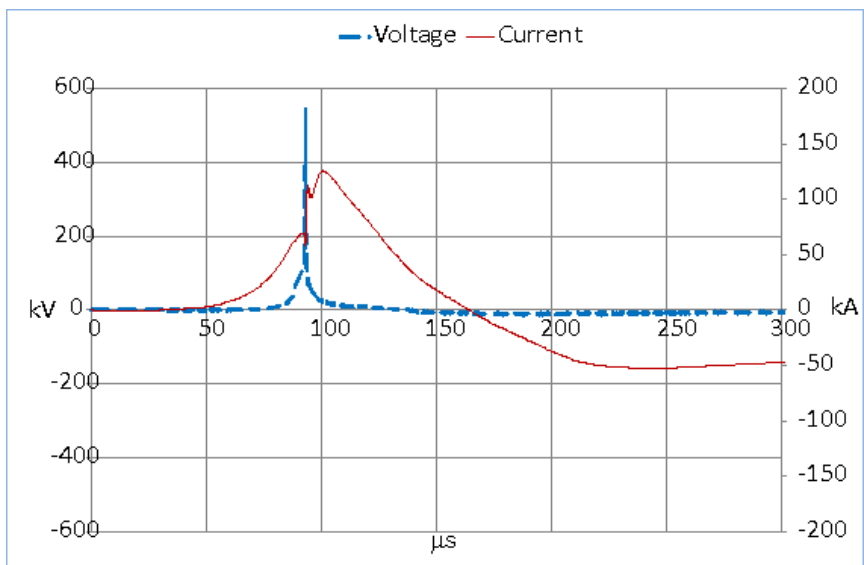


Результаты экспериментов с ВМГ



• 25 проводников, $\varnothing 120 \mu$, $m = 2.5 \text{ g}$

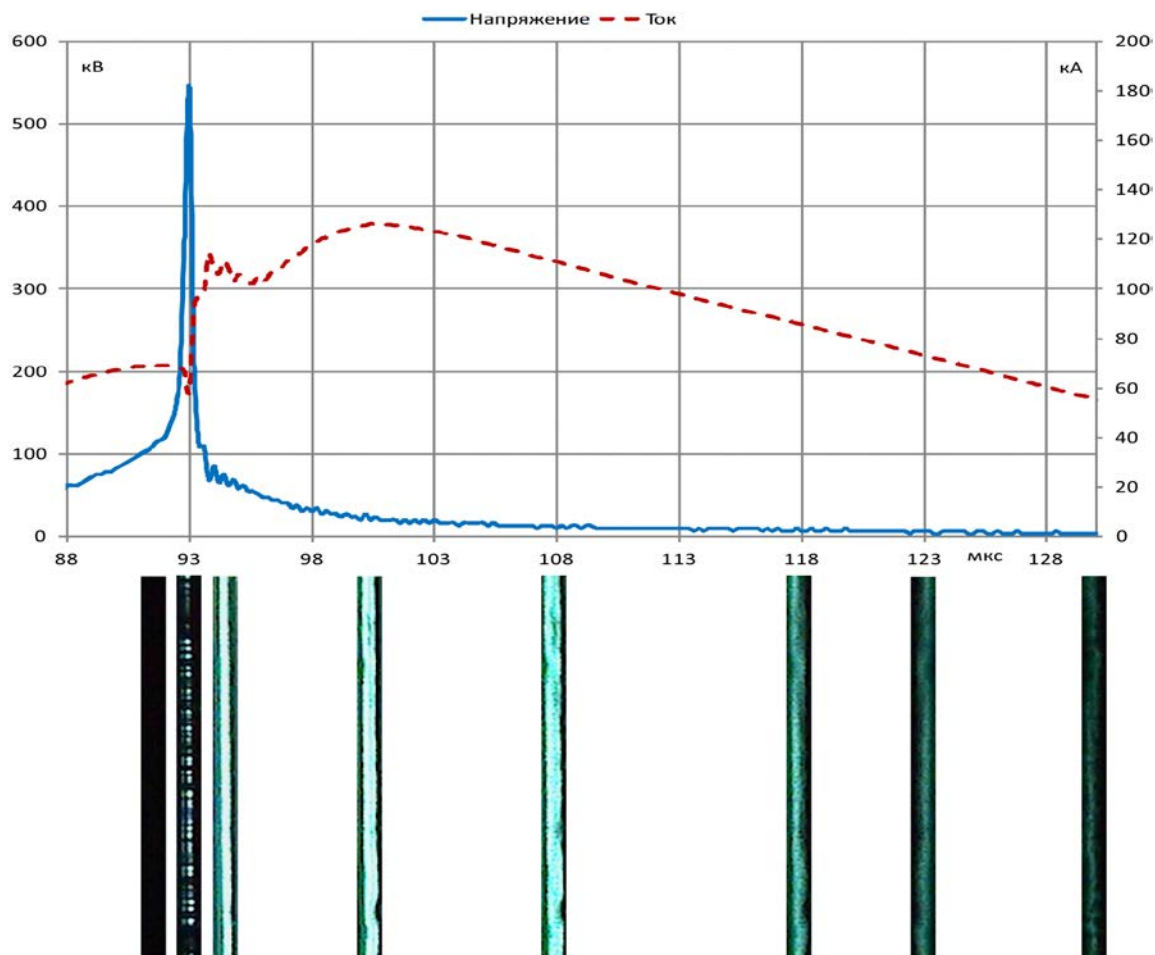
- Вложенная энергия $\sim 5 \text{ kJ/g}$
- $w_{\text{EEW}}/w_{\text{Cu}}$ (по отношению к энергии сублимации меди) ~ 1
- Плотность тока $\sim 1 \cdot 10^{11} \text{ A/m}^2$
- $dR/dt \sim 0.005 \Omega/\text{ns}$
- Напряженность электрического поля $\sim 120 \text{ kV/m}$
- $U_{\text{max}}/U_0 \sim 6.9$
- $dB/dt \sim -0.021 \text{ T/ms}$



• 96 проводников, $\varnothing 80 \mu$, $m = 4.3 \text{ g}$

- Вложенная энергия $\sim 14 \text{ kJ/g}$
- specific inputted energy, WEEW $w_{\text{EEW}}/w_{\text{Cu}} \sim 2.7$
- Плотность тока $\sim 3 \cdot 10^{11} \text{ A/m}^2$
- $dR/dt \sim 0.016 \Omega/\text{ns}$
- Напряженность электрического поля $\sim 600 \text{ kV/m}$
- $U_{\text{max}}/U_0 \sim 30$
- $dB/dt \sim -0.12 \text{ T/ms}$

Видео регистрация взрыва ЭВП ВСК камерой подтвердило физические основы ЭМИ воздействия



НАС Мемресам НХ-3
(Япония)

Режим:

- экспозиция 200 нс,
- скорость – 700 000 кадр/сек при 320X16
- размер пикселя 11 мкм.

Начало съемки было синхронизовано с запуском источника питания.

Регистрация электрофизических параметров ЭМИ - воздействия была успешно реализована благодаря автономному регистратору токов молнии РТМ-4-3



Основные характеристики:

- Защитный корпус с автономным питанием
- Обеспечение гальванической развязки с измеряемым сигналом
- Диапазон амплитуд регистрируемых импульсов тока 1 - 125 кА
- Коэффициент деления 1:220000, рассчитан на максимальную амплитуду напряжения до 1000 кВ.
- Временное разрешение записываемых данных (дискретность аналогово-цифрового преобразования) 100 нс
- Разрядность аналогово-цифрового преобразования данных 12 бит
- Длительность непрерывной записи данных 600 мкс

Заключение

- ❑ Промоделирована возможность реализации ЭМИ воздействия при применении импульсных источников – ГИН и ВМГ.

Полученные параметры:

- фронт импульса напряжения около ста наносекунд,
 - напряжённость электрического поля до 800 кВ/м,
 - скоростью роста напряженности магнитного поля до 0,2 Тл/мкс
- ❑ Успешная регистрация ЭМИ воздействия благодаря РТМ.

Направления применения разработанных моделей ЭМИ - воздействия:

- определение устойчивости работы приборов подстанций и их электро - магнитной совместимости с разрядом молнии;
- оптимизация расположения и правильной работы элементов заземляющих устройств для выравнивания потенциалов в них;
- обеспечение правильной организации вторичных цепей и выявление паразитных связей;
- проверка защиты электронной аппаратуры ПС от ЭМИ – воздействия;
- возможность создания мобильных испытательных установок по ЭМИ воздействию на базе ВМГ.