

## Электромагнитный импульс, генерируемый электронным пучком ускорителей МИН-1 и СПИН-2\*

Т. В. Лойко, Ю. М. Недойкаш,  
А. И. Тихонов

*Рассмотрена возможность создания источников электромагнитного импульса (ЭМИ) на базе малогабаритных импульсных ускорителей электронов МИН-1, СПИН-2. С помощью индукционных электрометрических преобразователей (ИЭП) измерены напряженность и форма импульса ЭМИ. Показано, что эти ускорители генерируют ЭМИ наносекундной длительности с напряженностью поля до 20 кВ/см и, наряду с высокоточными установками, могут использоваться для испытаний аппаратуры на воздействие ЭМИ.*

Как известно, высокоточные ускорители, на которых проводятся исследования по радиационной стойкости радиоэлектронной аппаратуры, являются одновременно источниками электромагнитного излучения, которое возникает при срабатывании коммутирующих элементов, при разряде в ускорительной трубке, а также от быстрых вторичных электронов (комптоновских и фотоэлектронов), возникающих в окружающем ускоритель пространстве от тормозного излучения. Эффект от воздействия ЭМИ может стать сравнимым с эффектом от радиационного воздействия тормозного излучения, что может вызвать затруднения в определении решающего фактора сбоя или вывода элементов из строя. Электромагнитное излучение при распространении импульсного электронного пучка в воздухе было зарегистрировано еще в 70-х годах [1]. Примерно с того же времени успешно развиваются исследования по генерации сверхмощных импульсов СВЧ-излучения [2], и открываются новые возможности в изучении процессов воздействия интенсивных электромагнитных полей. В Харьковском физико-техническом институте на базе высокоточных ускорителей электронов создан комплекс испытательных стендов для исследования воздействия ЭМИ релятивистских электронных пучков короткой длительности на различные физические объекты [3]. Проведенные там исследования показали, что сбой функционирования радиоэлектронной аппаратуры наблюдается с полями 300 В/см, а необратимые нарушения возникают при напряженности электрического поля 10 кВ/см.

Цель работы – рассмотреть возможность создания источника ЭМИ на базе малогабаритных импульсных ускорителей электронов МИН-1 [4] и СПИН-2 [5], где влияние поля тормозного излучения мало. Напряженность электрического поля ЭМИ измерялась с помощью индукционного электрометрического преобразователя (ИЭП) [6]. Датчик преобразователя выполнен в виде пластины из стеклотекстолита прямоугольной или круглой формы, фольгированного с двух сторон. При наличии переменного электрического поля на внешних поверхностях фольг индуцируются электрические заряды. Одновременно с этим процессом на внутренних поверхностях фольг будет происходить наведение электрических зарядов и их взаимная нейтрализация, обусловленная протеканием заряда через сопротивление нагрузки осциллографа. Датчик калибровался на воздушно-полосковой линии с помощью генератора наносекундных импульсов. Сигнал регистрировался двухлучевым осциллографом TDS-3052B с полосой пропускания 500 МГц. На первый луч осцил-

логафа записывался импульс с ИЭП, на второй – импульс напряжения с емкостного делителя на трубке ускорителя. Кабели регистрации типа РК-75-9-12 подбирались по длине так, чтобы обеспечивалась синхронность записи сигналов по обоим каналам.

Ускоритель МИН-1 с электронной трубкой типа ИА-9 генерирует импульс электронов длительностью 10 нс, с током до 2 кА и максимальной энергией электронов 700 кэВ. На выходе из трубки через титановое окно толщиной 50 мкм электронный пучок имеет структуру, изображенную на рис. 1 (зарегистрирована цветовым пленочным индикатором ЦВИД-0,1-1). Темное пятно диаметром около 12 мм в центре соответствует самой интенсивной части пучка и по размеру близко к диаметру эмитирующей поверхности катода. Энергия электронов при распространении в воздухе уменьшается, а диаметр пучка линейно увеличивается за счет рассеяния. Полный пробег в воздухе электронов с максимальной энергией – около 2 м. Если за полуширину пучка принять тот диаметр, на котором доза уменьшается в 2 раза, по сравнению с центром, то на расстоянии 1 м от окна трубки полуширина составляет 50 см.

Напряженность электрического поля электромагнитного импульса измерялась в двух позициях: на оси пучка и сбоку, в стороне от оси. В первом случае электронный пучок выпускался в полый цилиндр из органического стекла высотой 200 мм с толщиной стенки 10 мм. Цилиндр закрывался крышкой из органического стекла толщиной 8 мм. Таким образом, область распространения пучка была ограничена внутренней полостью цилиндра, так как максимальный пробег электронов в органическом стекле не превышает 4 мм. Датчик располагался на крышке цилиндра. Доза рентгеновского излучения в месте расположения датчика измерялась дозиметром ДК-02, термолюминесцентными дозиметрами ИКС-А и составила за импульс около 100 мР. Сигнал ЭМИ, зарегистрированный ИЭП, приведен на рис. 2. Длительность ЭМИ близка к длительности тока электронного пучка и составляет 9 нс. Напряженность электрического поля ЭМИ составляет  $E = 20$  кВ/см.

Для проверки того, что регистрируемое явление – результат распространения электронного пучка в атмосфере, пучок на выходе из окна трубки полностью поглощался оргстеклом толщиной 4 мм. При этом оставалось электромагнитное излучение, обусловленное протеканием тока в электронной трубке, рентгеновским излучением, а также током при срабатывании разрядников в высоковольтной цепи генератора. Результаты регистрации ЭМИ и синхронно импульса напряжения приведены на рис. 3. Амплитуда сигнала с ИЭП мала, менее 5 % амплитуды сигнала ЭМИ, т. е. вклад вышеперечисленных процессов в сигнал ЭМИ незначителен и может считаться фоном. Отметим, что генерация ЭМИ начинается вблизи максимума импульса напряжения на трубке и сдвинута относительно его начала на длительность фронта – 4 нс.

Таким образом, проведенные измерения убедительно подтверждают, что зарегистрированные сигналы – это ЭМИ от электронного пучка, распространяющегося в воздухе. Большие напряженности, однако, реализуются в небольших объемах: на 350 мм от окна трубки амплитуда сигнала падает примерно в 10 раз.

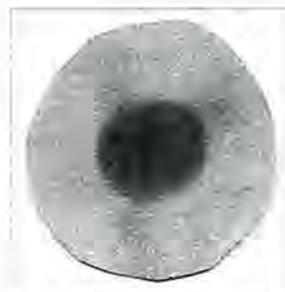


Рис. 1. Структура электронного пучка ускорителя МИН-1 на окне трубки

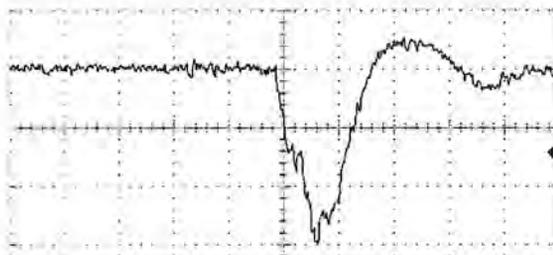


Рис. 2. Осциллограмма ЭМИ ускорителя МИН-1 с датчика ИЭП. Метки 10 нс/клетка

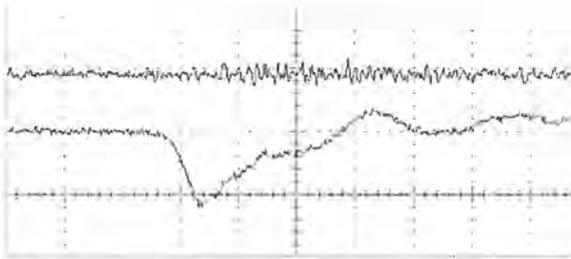


Рис. 3. Сигнал с датчика ИЭП (верхний луч) и напряжение на трубке (нижний луч).  
Метки 10 нс/клетка



Рис. 4. Структура электронного пучка ускорителя СПИН-2 на окне трубки ИМА-150Э

В случае, когда датчик ИЭП располагался сбоку от оси электронного пучка, за биологической защитой, в которую помещена высоковольтная часть генератора с электронной трубкой, пучок свободно выпускался в атмосферу. Датчик сдвигался от плоскости окна по оси трубки на 500 мм и в сторону от оси пучка на 450 мм и защищался от прямого воздействия электронов оргстеклом толщиной 8 мм. Напряженность электрического поля ЭМИ в данной точке пространства составила 1500 В/см при дозе рентгеновского излучения 10 мР за импульс. Как и в случае регистрации на оси пучка, при поглощении электронного пучка оргстеклом, располагаемым на окне трубки, сигнал ЭМИ не регистрировался.

Ускоритель СПИН-2 нагружался на стандартную трубку ИМА-150Э с бериллиевым окном толщиной 200 мкм и диаметром 14 мм. Структура электронного пучка, снятая на окне трубки (плёнка ЦВИД-0,1-1), приведена на рис. 4. Она определяется геометрией катода – цилиндра из танталовой фольги диаметром 4 мм.

Как видно из рис. 4, наблюдается ряд лучей, нормальных к острой кромке катода и сходящихся к центру. Однако уже в непосредственной близости от окна ярко выраженные неоднородности из-за рассеяния в воздухе исчезают. Максимальная энергия электронов в пучке определялась по ослаблению в стопке из дозиметрических пленок и составила 600 кэВ.

Длительность электронного импульса измерялась с помощью монитора – радиочастотного кабеля РК75-9-13 с окном в оплетке и изоляторе, так что коллектором электронов служила непосредственно центральная медная жила кабеля. Запись сигнала осуществлялась с помощью осциллографа СРГ-7. Зарегистрированная длительность импульса тока на полувысоте 0,3 нс (длительность импульса, восстановленного с учетом разрешения регистрирующего тракта, 0,15 нс), амплитуда тока 3 кА [5].

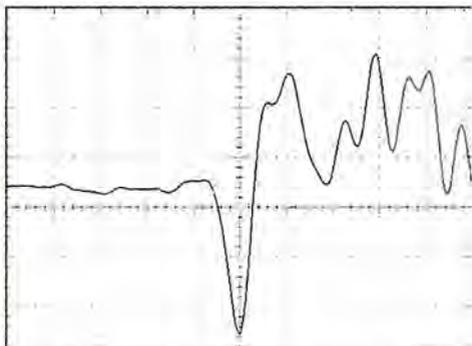


Рис. 5. Сигнал ЭМИ ускорителя СПИН-2 с датчика ИЭП. Метки 1 нс/клетка

Датчик ИЭП располагался в 200 мм от окна трубки по ее оси в области распространения электронного пучка. Электроны на датчик не попадали, поскольку поглощались оргстеклом толщиной 8 мм (осциллограмма приведена на рис. 5). Доза рентгеновского излучения в месте расположения датчика измерялась дозиметром ДК-02 и составила 5 мР/имп. Напряженность электрического поля  $E = 1300$  В/см. Зарегистрированная датчиком ИЭП длительность импульса на полувысоте 0,6 нс превышает ранее измеренную длительность электронного импульса 0,3 нс. Такая разница связана прежде всего с недостаточной полосой пропускания осциллографа TDS 3052B, которая составляет 500 МГц, а также с собственным временным разрешением датчика.

С увеличением расстояния от окна трубки до датчика амплитуда сигнала уменьшалась, и на осциллограммах регистрировалось запаздывание ЭМИ относительно импульса напряжения, соответствующее времени прохождения ЭМИ до датчика.

Таким образом, ускорители МИН и СПИН являются источниками наносекундных ЭМИ, которые возникают при распространении электронного пучка в атмосферном воздухе, и могут использоваться для проведения испытаний аппаратуры на воздействие ЭМИ и временной калибровки датчиков электромагнитного поля. Максимальная напряженность электрического поля на ускорителе МИН составляет 20 кВ/см при длительности 9 нс, на ускорителе СПИН – 1,3 кВ/см при длительности не более 0,6 нс. Ускорители удобны в эксплуатации и могут давать до сотни импульсов в день. Новые возможности по применению импульсных электрических полей открываются в биологии и медицине [7, 8]. ЭМИ с интенсивностями в десятки киловольт на сантиметр могут использоваться для обеззараживания воды, жидкой пищи и крови [3].

### Список литературы

1. Ковалёв Н. Ф., Петелин М. И., Райзер М. Д. и др. Генерация мощных импульсов электромагнитного излучения потоком релятивистских электронов // Письма в ЖТФ. 1973. Т. 18. В. 4. С. 232–235.
2. Селемир В. Д., Алёхин Б. В., Ватрунин В. Е. и др. Теоретические и экспериментальные исследования СВЧ-приборов с виртуальным катодом // Физика плазмы. 1994. Т. 20. № 7, 8. С. 689–700.
3. Блудов С. Б., Гадецкий Н. П., Кравцов К. А. и др. Генерирование мощных СВЧ-импульсов ультракороткой длительности и их воздействие на изделия электронной техники // Физика плазмы. 1994. Т. 20. № 7, 8. С. 712–717.
4. Бабич Л. П., Донской Е. Н., Лойко Т. В. и др. Характеристики электронного пучка ускорителя МИН-1 и его поведение в воздухе // ПТЭ. 2000. № 4. С. 82–85.
5. Лойко Т. В., Недойкаш Ю. М., Павловская Н. Г. и др. Источник импульсов электронного и рентгеновского излучений субнаносекундной длительности // ПТЭ. 2000. № 4. С. 86–88.
6. Панин В. В., Степанов Б. М. Измерение импульсных магнитных и электрических полей. М.: Энергоатомиздат, 1987.
7. Schoenbach K. H., Katsuki S., Stark R. H., Buescher E. S., Beebe S. J. Bioelectrics – New Application for Pulsed Power Technology // IEEE Transactions on Plasma Science. 2002. Vol. 30, N 1. P. 293–300.
8. Beebe S. J., Fox P. M., Rec L. J., Somers K., Stark R. H., Schoenbach K. H. Nanosecond Pulsed Electric Field Effects on Cells and Tissues: Apoptosis Induction and Tumor Growth Inhibition // IEEE Transactions on Plasma Science. 2002. Vol. 30, N 1. P. 286–292.

## Electromagnetic Pulse, Generated by the Electronic Beam of MIN-1 and SPIN-2 Accelerators

T. V. Loiko, Yu. M. Nedoikash, A. I. Tikhonov.

*Feasibility of the source of electromagnetic pulse (EMP) based on small-sized pulsed electron accelerators MIN-1 and SPIN-2 is given consideration to. Using the inductive electromagnetic transducers (IEMT) the intensity and the form of EMP pulse was measured. It was shown, that the above accelerators can generate EMP of nano-second duration with up to 20 kV/cm intensity, thus they can be used for testing variable hardware for EMP impact alongside with high-current tools.*