

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



X-236

9/11-75  
13 - 8709

2100/2-75

Р.В.Харьюзов, В.А.Швец

НЕЛИНЕЙНАЯ КВАЗИКОАКСИАЛЬНАЯ ЛИНИЯ  
ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ УДАРНЫХ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

**1975**

13 - 8709

**Р.В.Харьюзов, В.А.Швец**

**НЕЛИНЕЙНАЯ КВАЗИКОАКСИАЛЬНАЯ ЛИНИЯ  
ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ УДАРНЫХ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН**

## Введение

Для формирования наносекундных перепадов электрического тока или напряжения используют явление возникновения ударных электромагнитных волн в линиях передачи с нелинейными свойствами. Коаксиальные кабели с ферритом в качестве нелинейного диэлектрика, а также искусственные линии типа многозвенных фильтров с катушками на ферритовых кольцах являются классическим примером семейства предназначенных для этой цели так называемых обострителей <sup>/1/</sup>.

Основные характеристики этих устройств - волновое сопротивление на входе  $\rho_0$ , выходное волновое сопротивление  $R_{\Phi}$  и величина эффективной магнитной проницаемости на фронте ударной волны  $\mu_y = (R_{\Phi}/\rho_0)^2$  - по ряду причин ограничены некоторым диапазоном значений, в то время как снижение, например,  $\rho_0$  на один-два порядка могло бы существенно расширить рамки применения обострителей. В частности, устройства, способные формировать кило- или мегамперные импульсы тока с короткими фронтами и спадами при разумных значениях напряжения питающих их источников могут быть с успехом использованы, например, в линейных индукционных ускорителях, в импульсных магнитах, при обработке пучков заряженных частиц и т.д.

В этом сообщении приводятся результаты работы, основная цель которой заключалась в создании обострителей со сниженным волновым сопротивлением для системы монохроматизации электронного пучка в линейном индукционном ускорителе ЛИУ-30 исследовательского комплекса ИБР-2 <sup>/2/</sup>.

I.

В коаксиальных обострителях /рис. 1/ на нелинейный диэлектрик, выполненный в виде ферритовых колец 2, налитых на центральный проводник 1, для устранения утечек, как правило, наносится дополнительный слой диэлектрика 5, что приводит к повышению электрической прочности и одновременно - к нежелательному увеличению волнового сопротивления.

Из полученных в <sup>2/</sup> соотношений:

$$\rho_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{\text{эф}}}} \ln \frac{D}{a}, \quad /1/$$

$$v_0 = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{\text{эф}}}}, \quad /2/$$

$$\epsilon_{\text{эф}} = \frac{\epsilon_g \epsilon_{\text{ф}} \ln \frac{D}{a}}{\epsilon_d \ln \frac{d}{a} + \epsilon_{\text{ф}} \ln \frac{D}{a}}, \quad /3/$$

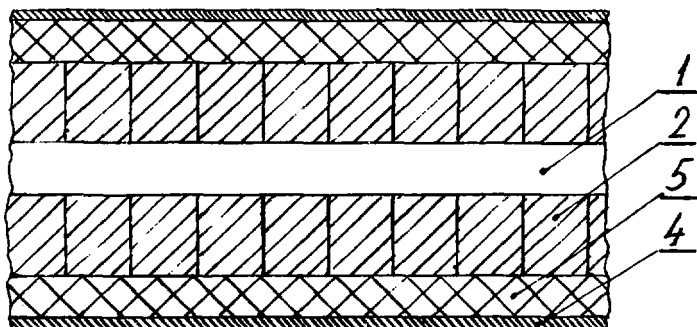


Рис. 1. Коаксиальный обостритель.

$$E_{\text{фп}} = \frac{V_{y0}}{a} \frac{\epsilon_{\text{г}}}{\epsilon_{\text{г}} \ln \frac{d}{a} + \epsilon_{\text{ф}} \ln \frac{D}{a}}, \quad /4/$$

где  $a$  - наружный диаметр внутреннего проводника /внутренний диаметр ферритового кольца/, см;  $d$  - наружный диаметр ферритового кольца /внутренний диаметр диэлектрического слоя/, см;  $D$  - наружный диаметр диэлектрического слоя /внутренний диаметр наружного проводника/, см;  $V_{y0}$  - амплитуда напряжения на входе, кВ;  $E_{\text{фп}}$  - электрическая прочность, кВ/см;  $\epsilon_{\text{д}}$  - диэлектрическая проницаемость диэлектрика;  $\epsilon_{\text{ф}}$  - диэлектрическая проницаемость феррита;  $v_0$  - скорость распространения электромагнитной волны в коаксиале, см/с;  $c$  - скорость света / $3 \cdot 10^{10}$  см/с/; для  $\epsilon_{\text{ф}} = 6,6$ ,  $E_{\text{фп}} = 10^5$  В/см следует, что минимальное  $\rho_0$  даже при исключении дополнительного слоя диэлектрика не может быть менее 30 Ом. Таким образом, ток в один килоампер может быть получен лишь при напряжении 30 кВ, что требует шестидесятикиловольтного напряжения в схеме генератора с тиратроном и формирующей линией. Кроме того, обостритель в этом случае не может быть выполнен на кольцах стандартных размеров. Обострители типа искусственных линий оказались еще менее пригодными для получения больших токов как вследствие значительной собственной индуктивности, так и из-за отсутствия высоковольтных малоиндуктивных конденсаторов.

## II.

Первый вариант низкоимпедансной нелинейной линии, разработанный и изготовленный в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ, имел следующие параметры:  $\rho_0 = 5$  Ом,  $V_{\text{раб.}} = 0,9$  кВ,  $J_{\text{раб.}} = 110$  А, укорочение фронта - от 100 до 10 нс при 300 ячейках /рис. 2/.

В этой линии в промежутках между ферритовыми кольцами /2/, нанизанными на внутренний проводник /1/ коаксиала, помещены проводящие диски /3/, электрически соединенные с внутренним проводником и образующие

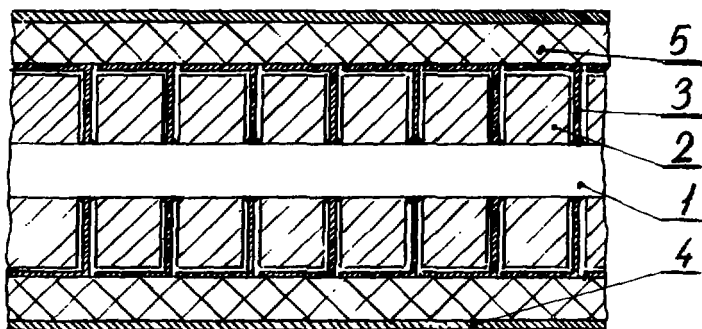


Рис. 2. Низкоимпедансная нелинейная линия.

дополнительные сосредоточенные электрические емкости через диэлектрик /5/ с внешней оболочкой /4/. При ферритовых кольцах марки О,16 ВТ  $\phi 4 \times \phi 2,8 \times 1,3$  мм диски имели наружный диаметр 30 мм.

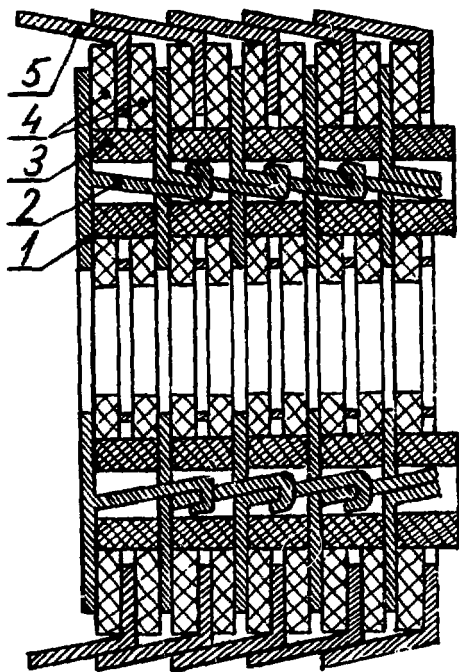
Анализ полученных результатов показал, что дальнейшее снижение  $\rho_0$  возможно лишь при условии существенного уменьшения собственной индуктивности внутреннего проводника квазикоаксиала.

Окончательный вариант обострителя в виде квазикоаксиальной линии, выполненной с учетом этого требования, имел параметры  $\rho_0 = 1,5$  Ом,  $V_{\text{раб.}} = 2,5$  кВ,  $J_{\text{раб.}} = 1$  кА\*, укорочение фронта - от 100 до 10 нс при 300 ячейках. Здесь внутренний проводник был разделен на девять параллельных разнесенных ветвей.

Конструктивно /рис. 3/ линия состоит из последовательного ряда однотипных ячеек, каждая из которых выполнена таким образом, что при последовательном их

\* Имеется в виду ток на выходе из линии. Его величина связана со значением тока на входе соотношением

$$J_{\text{вых}} = J_{\text{вх}} \frac{2}{1 + \sqrt{\mu_y}}$$



*Рис. 3. Нелинейная квазикоаксиальная линия.*

соединении обкладки плоских конденсаторов одной полярности образуют наружный проводник квазикоаксиала /5/, а ряд проводников /2/, расположенных параллельно оси линии и соединяющих все обкладки другой полярности, образуют расщепленный внутренний проводник квазикоаксиала. В промежутках между обкладками на каждый из проводников надето ферритовое кольцо, размещенное в полости внутри диэлектрика. Увеличение числа параллельных проводников, из которых составляет внутрен-

ний проводник квазикоаксиала, и расстояние между ними позволяют уменьшить собственную индуктивность линии и ее волновое сопротивление. Плоский конденсатор каждой ячейки между проводящим диском 1 и проводящей крышкой 5 имеет коаксиальный малоиндуктивный наружный вывод по образующей усеченного конуса крышки. Спаянные по периметру конусы соседних ячеек образуют наружную оболочку квазикоаксиальной линии. Внутренние выводы конденсаторов, выполненные в виде плоских лепестков /2/, вырубленных на периферии основания /1/ и отогнутых параллельно оси линии /6/, образуют, с одной стороны, второй малоиндуктивный вывод конденсатора, а с другой, при последовательном соединении одноименных лепестков соседних ячеек, - внутренний проводник квазикоаксиала. Этот проводник является "расщепленным" проводником, расстояния между отдельными компонентами которого могут быть выбраны из соображений получения минимальной собственной индуктивности.

Нелинейная индуктивность образуется ферритовыми кольцами /3/, насаженными на каждый лепесток /2/ всех ячеек. Отверстия в крышках /5/ имеют диаметр, больший диаметра ферритовых колец /3/. Изоляционные фторопластовые шайбы /4/ односторонние, отделяют основания ячейки от крышки и разделяют соседние ячейки. Диаметры отверстий в шайбе /4/ равны наружному диаметру ферритовых колец /3/. Толщина шайб - около половины осевого размера кольца. При серийном изготовлении проводящие крышки и диски могут быть заменены проводящим покрытием, нанесенным на диэлектрик.

Комплект обострителей для системы монохроматизации электронного пучка ЛИУ-30 выполнен в виде двадцати отдельных секций по сто ячеек в каждой. Каждая секция помещена в герметичный корпус, снабженный специальными коаксиальными разъемами /рис. 4/, и заполнена трансформаторным маслом. Размеры секций: длина - 250 мм, диаметр - 70 мм, вес - 1,5 кг.

В результате испытаний определены следующие характеристики линии: емкость секции -  $C_{\text{л}} = 6500 \text{ пФ}$ , индуктивность секции -  $L = 14,6 \cdot 10^{-9} \text{ гН}$ ,  $\rho_0 = 1,5 \text{ Ом}$ ,  $R_{\text{нагрузки}} = 3,5 \text{ Ом}$ , эффективная магнитная проницаемость  $\mu_y = 5$ ; укорочение фронта импульса тока

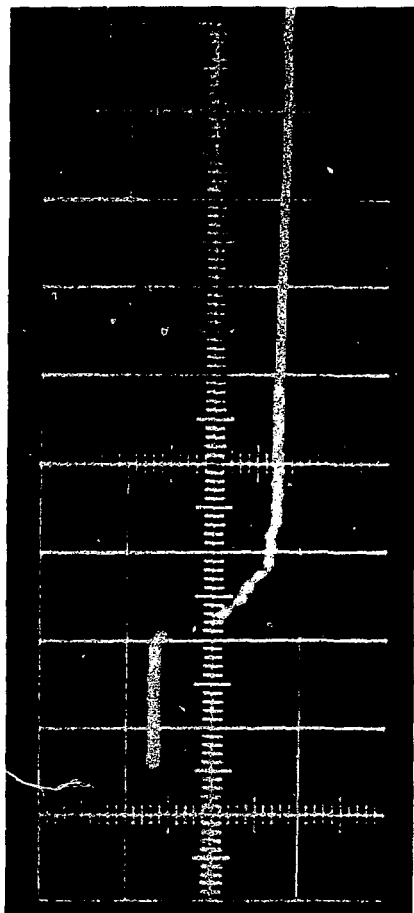




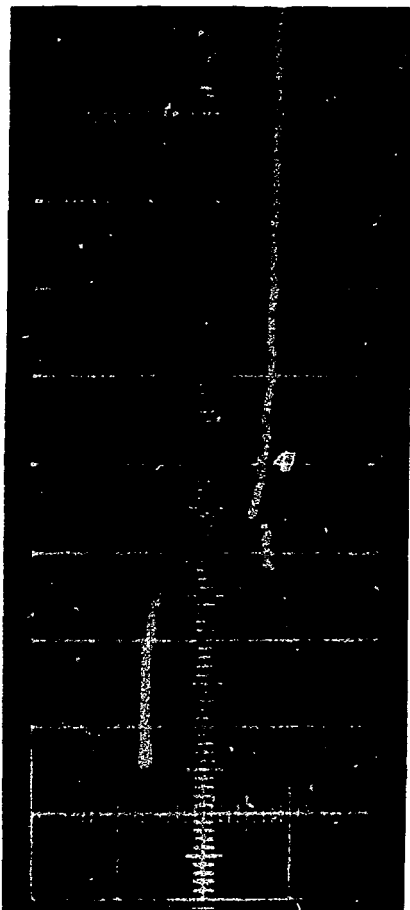
*Рис. 4. Квазиоаксиальный обостритель в герметичном кожухе.*

характеризуется следующим образом. Последовательное соединение трех секций позволяет получить длительность фронта ударной волны порядка  $10 \text{ нс}$  /рис. 5б/, при длительности фронта исходного импульса около  $100 \text{ нс}$  /рис. 5а/. Линия из 6 секций дает на выходе длительность фронта порядка  $1 \text{ нс}$  /рис. 5в/. Определение предельной длительности фронта при дальнейшем увеличении числа секций не проводилось вследствие затруднений метрологического характера.

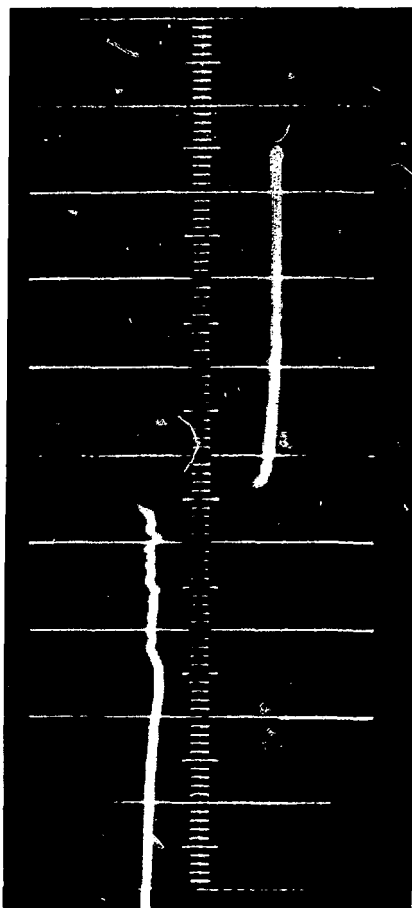
В комплект оборудования, используемый при испытаниях, входили: импульсный линейный генератор с тиратроном ТГИ1-1000/25 с выходным сопротивлением  $1,5 \text{ Ом}$  на ток до  $2 \text{ кА}$  при длительностях импульса  $1,2 \text{ мкс}$  с



*Рис. 5. а - импульс тока 1 кА на входе обострителя ,  
развертка 100 нс/см;*



*Рис. 5. б - на нагрузке за 3 секцией, развертка 50 нс/см.*



*Рис. 5. в - на нагрузке за 6-ой секцией, развертка 10 нс/см.*

фронтом 100 нс, синхроскоп С1-11, набор импульсных делителей напряжения и нагрузок, а также устройство для размагничивания ферритовых колец постоянным током.

Величина эффективной магнитной проницаемости на фронте ударной волны  $\mu_y$  была определена как квадрат отношения волнового сопротивления линии для ударной волны к волновому сопротивлению на входе линии

$$\mu_y = \left( \frac{R_{\Phi}}{\rho_0} \right)^2,$$

причем  $R_{\Phi}$  и  $\rho_0$  были найдены из соотношений

$$\tau_{\text{пр}} = \rho_0 C_{\text{л}}$$

$$\tau_{\text{уд}} = R_{\Phi} C_{\text{л}}$$

после измерения  $\tau_{\text{пр}}$  и  $\tau_{\text{уд}}$  в каждой секции с помощью синхроскопа.

В этих формулах  $\tau_{\text{пр}}$  и  $\tau_{\text{уд}}$  - задержка выходного импульса по отношению к входному на секции в режиме простой и ударной волны.

### Литература

1. В.Д.Ананьев и др. Сообщение ОИЯИ, 13-4392, Дубна, 1969.
2. И.Г.Камаев. Ударные электромагнитные волны. М., "Сов. радио", 1963.

Рукопись поступила в издательский отдел  
19 марта 1975 года.