



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

613/
12-81

9/2-81

P13-80-670

В.А.Швец

НЕЛИНЕЙНАЯ
МНОГОКАНАЛЬНАЯ ОБОСТРЯЮЩАЯ ЛИНИЯ
НА ФЕРРИТОВЫХ КОЛЬЦАХ
С НЕПРЯМОУГОЛЬНОЙ ПЕТЛЕЙ ГИСТЕРЕЗИСА

Направлено в ПТЭ

1980

В работах^{/1-3/} была предложена новая конструкция низкоимпедансной нелинейной многоканальной обостряющей линии на токи в десятки кА. Там же были определены основные характеристики перемагничивания ферритовых колец с прямоугольной петлей гистерезиса /НПГ/ и показано, что в сильных полях $H_{\text{перемагн.}}$

$\geq 400 \text{ Э/}^{1,4/}$ исчезает существенное различие во временных характеристиках перемагничивания ферритов с прямоугольной и непрямоугольной петлей гистерезиса. Кроме того, в этих работах отмечалось, что ферритовые кольца с НПГ марки ВТ выпускаются только до диаметра 10 мм, число их в многоканальной линии /рис. 1 в^{/3/} / на токи порядка 10 кА становится неоправданно большим и что технология изготовления и сборки электродов многоканального обострителя является весьма трудоемкой.

Таким образом, переход на более распространенные кольца с НПГ позволяет упростить изготовление и вместе с тем расширить область применения обострителей, например для управления интенсивными электронными пучками при энергиях до десятков МэВ^{/5,6/}.

В этом сообщении приводятся результаты разработки, создания, испытаний и исследований низкоимпедансного обострителя на кольцах с НПГ. Внешний проводник здесь выполнен в виде цилиндрических полостей, размещенных равномерно по окружности, в которых располагаются собственно каналы нелинейного обострителя. Цилиндрические полости образованы корпусами десяти полутораметровых отрезков латунных труб, расположенных вокруг центрального корпуса. Внутренние проводники обостряющих линий в каждом канале составлены из центральной оси в виде шпильки с резьбой М5 по всей длине 1700 мм и нанизанных на эту ось 165 ферритовых колец марки М2000НМ 1-17 типоразмера 12x5x5,5 мм. Каждое кольцо заключено в разомкнутый проводящий экран из медной фольги толщиной 0,1 мм, прикрепленный к центральной оси гайкой. Экран предназначен для вынесения электрического поля из ферритового кольца на периферию и сосредоточения максимума напряженности электрического поля между наружной поверхностью экрана и внешним проводником^{/2/}. Для исключения замыкания части тока размагничивания кольцо закрыто с двух сторон изоляционными фторопластовыми прокладками $\phi 13 \times \phi 5 \times 0,1 \text{ мм}$. Экраны изготовлены из 6000 отожженных в вакууме медных колец $\phi 30 \times \phi 5 \times 0,1 \text{ мм}$ с помощью штампа. После штамповки получается экранное кольцо в форме "чашки" с наружной цилиндрической поверхностью $\phi 15 \text{ мм}$. На торцах внутренних проводников после

заполнения расчетной длины центральной оси их ферритовыми кольцами, проводящими экранами с гайками, фторопластовыми прокладками располагались два коаксиальных разъема для ввода и вывода импульса тока. Внутренний проводник размещен соосно в корпусе канала /латунная труба $\varnothing 25 \times 2$, 5×1500 мм/ с помощью центровочных фторопластовых шайб $\varnothing 20 \times \varnothing 5 \times 2$ мм с шестью отверстиями $\varnothing 4$ мм для откачки, которые надевались на ось проводника через определенное количество деталей /обычно 10/. Корпус каждого канала откачивался и затем заполнялся глицерином. На входе и выходе одной сборки из 10 каналов внутренние и внешние проводники объединяются общими коаксиальными разъемами, что позволяет при выходе одного канала из строя заменять его без разгерметизации других. Объединяющие выходы каналов детали разъемов содержат на своих торцах такие же элементы коаксиальных разъемов, как и многоканальная линия на 1,3 кА^{/1,3/}, что позволяет использовать описываемую здесь обостряющую линию как в системе монохроматизации электронного пучка ЛИУ-30^{/6/}, так и в сочетании с генератором системы монохроматизации^{/5,8/} для решения других технических задач.

Комплект обострителей, для которого было использовано 6000 ферритовых колец М2000/12 \times 5 \times 5,5/, изготовлен в виде тридцати пяти нелинейных каналов длиной по 1,5 м. Корпуса каналов, прошедшие внутри и снаружи обработку электрополировкой, собираются на центральном корпусе плотно один к другому и стягиваются хомутами. Каналы объединяются в три секции по десять параллельно, пять каналов являются запасными. Устройство одного канала, высоковольтного вакуумноплотного ввода /вывода/ импульса тока в канал и конструкция объединяющих каналы разъемов показаны на рис. 1.

Все измерения параметров линии были проведены по методикам, изложенным в работе^{/7/}.

Расчетные параметры обостряющей линии следующие.

Емкость одной ячейки^{/1/},

$$C_1 = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 h}{\ln D/d_2},$$

должна составлять для указанных выше размеров колец, экранов и внешних проводников $9 \cdot 10^{-10}$ ф, а индуктивность^{/1/},

$$L_1 = \frac{\mu\mu_0 S}{\pi D},$$

/S - сечение кольца, D_{cp} - средний диаметр/, т.е. волновое сопротивление одного канала $\rho_1 = \sqrt{L_1/C_1}$ должно быть порядка 1,2 Ом. В действительности емкость оказывается несколько мень-

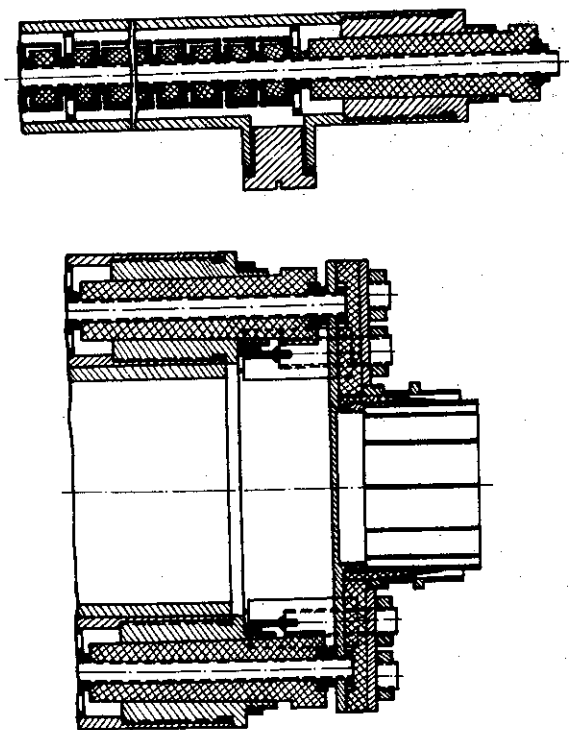


Рис.1. Устройство одного канала /а/, ввод импульса тока в канал /а/ и объединяющий каналы разъем /б/.

шей, а индуктивность - несколько большей величины из-за наличия промежутков между кольцами, занятых прокладками, центровочными шайбами и крепежными гайками экранов. Измерения показали, что в среднем на 35 каналах значение распределенной емкости C_0/ℓ составляет 0,066 мкФ/м, а индуктивности L_0/ℓ - 0,19 мкГн/м. При соединении каналов сопротивление составило в среднем на три секции, как показали измерения, 0,17 Ом. Поскольку входное волновое сопротивление известно, выходное R_{Φ} определяется методом рассогласования, как это описано в /7/: при нагрузке линии в конце ее сопротивлением, большим волнового выходного, за фронтом импульса сразу же в начале вершины появляется ступенька напряжения, по ампли-

туде которой и по формуле /1/ в /7/ определяем R_{Φ} . Оно в данном случае составило 0,54 Ома. Обычно в таких экспериментах выбирают сопротивление нагрузки R_H больше выходного волнового сопротивления насыщенной ферритовой линии R_{Φ} /максимальное значение его может быть предварительно определено из соотношения $\mu_y = (R_{\Phi}/\rho_0)^2 = 10 \div 12$ для ферритов НН или НМ /3/ примерно в два раза для большей точности измерений. В данном случае значение R_H составляло 1-1,2 Ом. Значение параметра μ_y , эффективной магнитной проницаемости за фронтом ударной волны, как показали эти измерения, равно 10, и индуктивность насыщенной линии $L_{нас.}/\ell = 1,91$ мкГн/м. Измерение времени задержки входного импульса обострителем в режиме простой волны $t_{з.пр.}/\ell$, когда обостряющая линия предварительно насыщена током

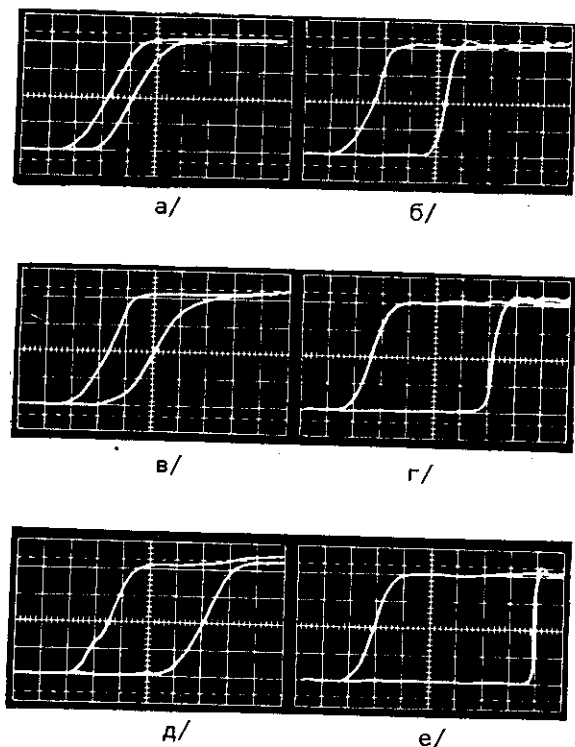


Рис.2. Осциллограммы импульсов тока на входе и выходе многоканального обострителя при увеличении числа секций /длины обостряющей линии/ и изменении полярности размагничивающего тока: а, в, д - режим простой волны /полярность размагничивающего тока $I_{разм.}$ совпадает с полярностью импульса входного тока I_0 /; б, г, е - режим ударной волны /полярность размагничивающего тока $I_{разм.}$ противоположна полярности импульса входного тока I_0 /; а, б - первая секция, в, г - вторая секция, д, е - третья секция. Развертка - 50 нс/см; $I_0 = 5 \text{ A} = \text{const}$; $I_{разм.} = 6 \text{ A} = \text{const}$.

подмагничивания той же полярности, что и основной перемагничивающий ее импульс тока /ударные волны в этом случае не образуются и линия работает как обычный коаксиальный кабель/, показывает, что оно составляет в среднем 0,112 мкс/м /рис. 2, 3а/, а в режиме ударной волны при переключении полярности подмагничивающего тока /он становится размагничивающим/ $\tau_{з.уд.} / \ell = 0,356 \text{ мкс/м}$ /рис. 2, 3б/. Поскольку в соответствии с $\tau_{з.пр.} = C_0 R_{ф.} = C_0 \rho_0 \tau_{з.уд.} = C_0 R_{ф.}$, а емкость C_0 не является функцией магнитной проницаемости, отсюда можно повторно получить, что для этой обостряющей линии $\mu_y = (\tau_{з.уд.} / \tau_{з.пр.})^2 = 10$. Теперь, когда известны входное и выходное волновые сопротивления в линии, т.е. достигнуто согласование, можно определить предельное укорочение фронта исходного импульса.

При длительности фронта исходного импульса 100 нс /рис. 4а/ после подключения к выходу генератора первой полутораметровой секции обостряющей линии на согласованной нагрузке 0,54 Ом наблюдается перепад тока длительностью 8 нс /рис. 4б/.

Включение последовательно двух обостряющих секций укорачивает фронт исходного импульса до 0,7 нс /рис. 4в/, а трех - до 0,5 нс /рис. 4г/. Как видно, в третьей секции наступает предел уменьшения длительности фронта и ударная волна превращается в стационарную с длительностью перепада 0,5 нс. Далее она распространяется по линии с неизменной длительностью фронта. В^{3/} расчетным путем было получено, что $\tau_{\text{фр.мин}}$ для линий, содержащих феррит с НПГ, не может быть более 0,48 нс.

Влияние изменения амплитуды импульса входного тока и изменения тока размагничивания на длительность фронта ударной волны характеризуется следующим образом. Уменьшение амплитуды импульса входного тока от 7 до 5,4 кА /рис. 5/ не увеличивает длительности перепада, изменение от 5,4 до 1 кА вызывает линейное увеличение длительности фронта до значения $\tau_{\text{фр}}$ исходного импульса, при 1 кА ударная волна превращается в простую.

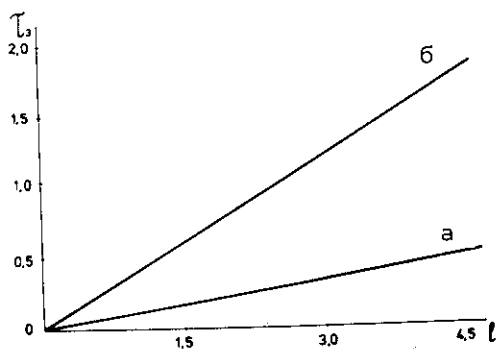


Рис. 3. Зависимость времени задержки между входным и выходным импульсами в режиме простой /а/ и ударной /б/ волн в многоканальной обостряющей линии /от длины обостряющей линии/; τ_z - в мкс, ℓ - в м.

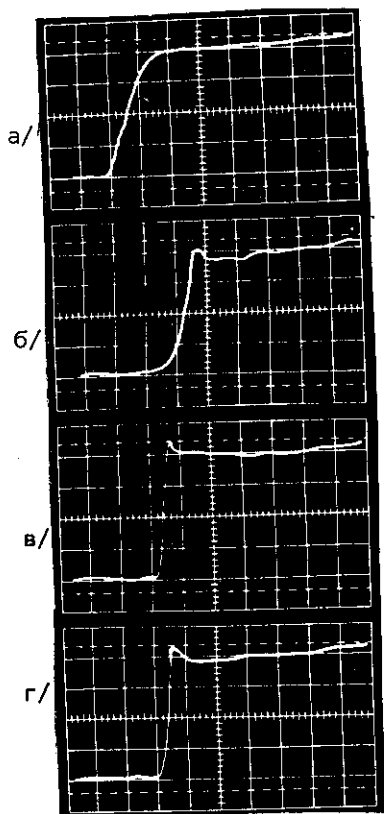


Рис. 4. Оциллограммы импульсов: а/ на входе в обостритель, развертка - 100 нс/см; б/ на нагрузке за 1 секцией, развертка - 10 нс/см, 7,9 кА; в/ на нагрузке за 2 секцией, развертка - 1 нс/см, 7,9 кА; г/ на нагрузке за 3 секцией, развертка 1 нс/см, 7,9 кА.

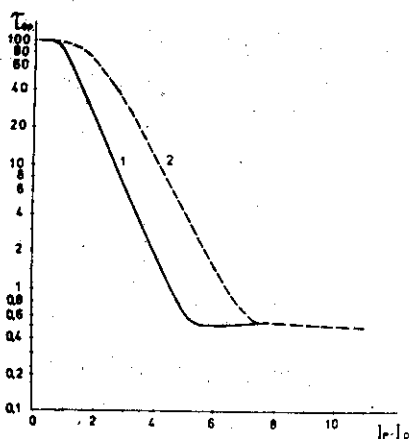


Рис. 5. Зависимость длительности фронта ударной волны $\tau_{фр}$, нс, в многоканальной обостряющей линии от изменения: 1/ амплитуды импульса входного тока I_0 , кА; $I_p = 11 \text{ A} = \text{const}$; 2/ тока размагничивания $I_{разм.}$ А; $I_0 = 8 \text{ кА} = \text{const}$.

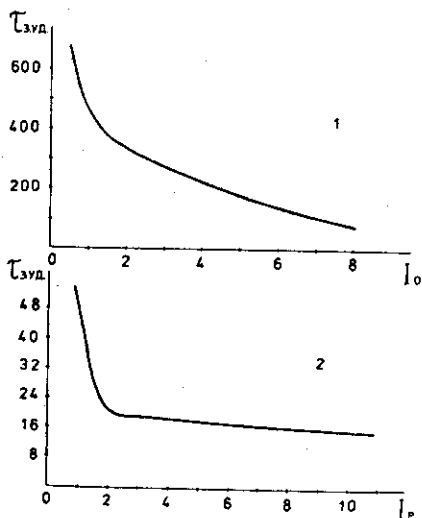


Рис. 6. Зависимость времени задержки фронта ударной волны $\tau_{з.уд.}$, нс, в многоканальной обостряющей линии от изменения: 1/ амплитуды импульса входного тока I_0 , кА; $I_{разм.} = 11 \text{ A} = \text{const}$; 2/ тока размагничивания I_p , А; $I_0 = 8 \text{ кА} = \text{const}$.

Увеличение тока на выходе до 7,9 кА вызвало появление небольшого $\approx 6\%$ насыщенного участка на фронте импульса перед началом вершины. Размагничивающий ток имеет максимальное значение 11 А, его изменение до 8 А слабо изменяет величину $\tau_{фр}$ /рис. 5/, ниже 8 А — плавно увеличивает длительность перепада до значения $\tau_{фр}$ входного импульса. Размагничивающий ток выше 10 А не оказывает влияния на $\tau_{фр}$ ударной волны.

Выше были определены постоянные параметры задержек $\tau_{з.пр.}$ и $\tau_{з.уд.}$ при фиксированных максимальных значениях $I_{у.макс} = 8 \text{ кА}$ и $I_{разм.макс.} = 11 \text{ А}$. Их зависимости при изменениях поочередно I_y при фиксированном $I_{разм.}$ и $I_{разм.}$ при $I_y = \text{const}$ показаны на рис. 6. Для зависимости $\tau_{з.уд.}$ от тока размагничивания $I_{разм.}$ /рис. 6/, как и в ранее исследованных линиях /7/, характерен перегиб, при этом меняется импеданс линии $/N_{перег} \approx 300 \text{ Э}/$. Стабильность задержки от величины тока $I_{разм.}$ выше точки перегиба практически не зависит от него и остается постоянной в пределах $+0,8 \text{ нс}$.

В комплект оборудования, используемый при испытаниях и исследованиях, входил импульсный линейный генератор системы монохроматизации электронного пучка ЛИУ-30^{8/}, в схему которого для исключения отражений из-за рассогласования волновых сопротивлений накопителя и обостряющей линии были включены параллельно 36 стометровых отрезков кабеля РК-50-2-12 /кабельные трассы для транспортировки импульсов монохроматизации^{15/}, осциллоскоп ТЕКТРОНИКС 7904, набор импульсных делителей напряжения и низкоомных широкополосных нагрузок^{15/}, а также устройство для размагничивания и подмагничивания обостряющих линий постоянным стабилизированным током на 15 А с дроссельной системой защиты по высокому импульсному напряжению.

В заключение автор благодарит В.М.Божкова и В.Н.Быкова за помощь в изготовлении обостряющих линий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Швец В.А. ОИЯИ, 13-10300, Дубна, 1976.
2. Швец В.А. Авт.свид. СССР №660214 с приоритетом от 17.2.77., кл. Н03К5/00. Бюллетень ОИПОТЗ, №16, 1979, с.194.
3. Швец В.А. ОИЯИ, 13-12269, Дубна, 1979.
4. Месяц Г.А. Генерирование мощных наносекундных импульсов. Изд. "Советское радио", М., 1974.
5. Швец В.А. ОИЯИ, 9-10301, Дубна, 1976.
6. Швец В.А. ОИЯИ, 9-80349, Дубна, 1980.
7. Швец В.А. ПТЭ, 1980, №5, с. 132.
8. Швец В.А. Авт.свид., №718901, с приоритетом от 17.01.77, кл. Н03К5/02, Бюлл. ОИПОТЗ №8, 1980, с. 193.

Рукопись поступила в издательский отдел
16 октября 1980 года.