

С 3458

Ш-35

Швец В. А.

Б1-13-11399.

2128/78



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Б1-13-11399

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

Дубна 19 78

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория нейтронной физики

В.А.Швец

Б1-13-11399

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ КВАЗИКОАКСИАЛЬНОЙ
ЛИНИИ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ УДАРНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ
ВОЛН

Рукопись поступила
в редакционный отдел
17. марта 1978 г.

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

г. Дубна, 1978 г.

Для формирования наносекундных перепадов тока килоамперной амплитуды в системе монохроматизации электронного пучка /1,2,3/ ДИУ-30 /4/ изготовлен комплект нелинейных квазикоаксиальных обострителей на ферритах /1,5,6/ с входным волновым сопротивлением 1,5 Ом. Действие этих обострителей основано на использовании явления ударных электромагнитных волн, возникающих при определённых условиях в нелинейной среде /7/ и, в частности, из-за зависимости магнитной проницаемости феррита от напряжённости поля H распространяющейся волны.

В известных коаксиальных обострителях, являющихся классическим примером использования этого явления, входное волновое сопротивление составляет 30÷50 Ом, что существенно затрудняет применение их в сильноточных системах. Малое волновое сопротивление квазикоаксиальной линии является результатом разработки новой конструкции /6/, сущность которой в основном заключается в следующем (рис. 1).

Линия состоит из последовательного ряда однотипных ячеек, каждая из которых выполнена таким образом, что обкладки плоских конденсаторов (5) одной полярности образуют наружный проводник квазикоаксиала, а ряд проводников (2), расположенных параллельно оси линии (6) и соединяющих все обкладки другой полярности, образуют расщеплённый внутренний проводник квазикоаксиала. Геометрия этого проводника выбирается с учётом получения определённого значения индуктивности L_a и ёмкости C_a , т.е. волнового сопротивления $Z_a = \sqrt{L_a / C_a}$ ячейки и её постоянной времени $T_a = \sqrt{L_a C_a}$.

В промежутках между обкладками на каждый из проводников (2) одета ферритовое кольцо (3), размещённое в полости внутри диэлектрика. Увеличение числа параллельных проводников, из которых ^{выбор определённого} составляется внутренний проводник квазикоаксиала и расстояния между ними позволяет уменьшить собственную индуктивность линии и её волновое сопротивление.

Плоский конденсатор каждой ячейки между проводящим диском I и проводящей крышкой 5 имеет коаксиальный малоиндуктивный наружный вывод по образующей усечённого конуса крышки. Спаянные по периметру конуса соседних ячеек образуют наружную оболочку квазикоаксиальной линии. Внутренние выводы конденсаторов, выполненные в виде плоских лепестков 2, вырубленных на периферии основания I и отогнутых параллельно оси линии, образуют, с одной стороны, второй малоиндуктивный вывод конденсатора, а с другой стороны, при последовательном соединении одноимённых лепестков 2 соседних ячеек, образуется внутренний проводник квазикоаксиала. Это проводник является "расщеплённым" 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.

Комплект обострителей для системы монохроматизации электронного пучка ЛМУ-30 выполнен в виде двадцати отдельных секций по 100 ячеек (рис. 1) в каждой /5/. Каждая секция помещена в герметичный корпус, снабжённый специальными коаксиальными разъёмами и заполнена трансформаторным маслом. Последовательное подсоединение

секций в короткозамкнутое плечо треугольного разветвления при формировании импульса тока с коротким спадом ^{19/} позволяет дискретно увеличивать τ_{Δ} примерно на 70 нс.

Расчет нелинейной квазикоаксиальной линии проводится следующим образом (методика, предложенная в ^{17/}, в данном случае не применима, т.к. нет понятия $E_{\text{фр}}$ - напряжённости электрического поля на пределе прочности - ей соответствует $H_{\text{кр}}$ из-за малого волнового сопротивления ρ_{Δ} (рабочее напряжение всегда много меньше пробивного)).

Для необходимого тока I_{Δ} в нагрузке $R_{\text{нл}} = R_{\text{эф}} = \rho_{\Delta} \sqrt{U_{\Delta}}$ находим ρ_{Δ} и амплитуду входного перепада тока

$$I_{\Delta} = \frac{I_{\Delta}(1 + \sqrt{U_{\Delta}})}{2}; \quad (\sqrt{U_{\Delta}} = 5). \quad (1)$$

Из формулы для H_{Δ} ^{17/} находим по значению I_{Δ} средний диаметр $D_{\text{ср}}$. Подберем из существующих типоразмеров ферритов с ШГ кольно, диаметр которого в "п" раз (п - целое) меньше $D_{\text{ср}}$. Это будет число колец квазикоаксиала. Далее находим

L_{Δ} и из $\rho_{\Delta} = \sqrt{L_{\Delta}/C_{\Delta}} \rightarrow C_{\Delta}$ ёмкость плоского конденсатора, его геометрия выбирается с учетом числа колец, их диаметра, типа диэлектрика и т.д. Рабочее напряжение ($U_{\Delta} = I_{\Delta} \cdot R_{\text{эф}}$) определяет зазор в конденсаторе и необходимую величину $E_{\text{проб}}$ и ϵ диэлектрика. При заполнении жидким диэлектриком необходимо подбирать одинаковые диэлектрики по электрическим свойствам.

Экспериментальное исследование линии заключалось в определении параметров ячейки h_{λ} и C_{λ} , измерения входного волнового сопротивления Z_{λ} , ударной (эффективной) магнитной проницаемости μ_{λ} , предельного укорочения фронта исходного перепада $\tau_{\text{фр. мин.}}$ и др. параметров.

Линия на 1 кА с входным волновым сопротивлением 1,5 Ом, центральный проводник которой расщеплён на 9 каналов, имеет следующие параметры. При диаметре центрального электрода (1) равном 46 мм ёмкость одной секции из 100 ячеек $15/ C_{\lambda}$ составляет в среднем 6500 пФ, а индуктивность h_{λ} - $14,6 \cdot 10^{-9}$ Н (девять ферритовых колец марки 0,16 Вт типоразмера $\phi 4 \times \phi 2,8 \times 1,4$ мм, расположенных равномерно на проводниках (2), вырубленных штампом по $\phi 29$ мм и отогнутых параллельно оси линии; центральное кольцо отсутствует для сохранения симметрии растекания тока).

Волновое сопротивление измерялось по изложенной в /8/ методике на рассогласованной нагрузке R_{λ} . При этом на выходном импульсе напряжения амплитудой U_{λ} за фронтом возникает ступенька $U_{\lambda} < U_{\lambda}$ при $Z_{\lambda} > R_{\lambda}$, где Z_{λ} - волновое сопротивление линейного участка (кабеля), связывающего ударную линию с нагрузкой. Тогда /8/

$$Z_{\lambda} = Z_{\lambda} \frac{1 - \frac{U_{\lambda} - U_{\lambda}}{U_{\lambda}} (1 + \alpha)}{1 + \frac{U_{\lambda} - U_{\lambda}}{U_{\lambda}} (1 + \alpha)}, \text{ где } \alpha = \frac{2 R_{\lambda}}{Z_{\lambda} - R_{\lambda}}. \quad (2)$$

Измерения показали, что выходное волновое сопротивление квазикоаксиальной линии $R_{\text{вх}} = 3,5 \text{ Ом}$ при входном волновом сопротивлении $Z_{\text{вх}} = 1,5 \text{ Ом}$.

Методика измерения параметра μ заключалась в следующем.

При изменении полярности размагничивающего тока в исследуемой линии устанавливается режим простой (2-й импульс рис. 2а) или ударной (2-й импульс рис. 2б) волны (соответственно меняется выходное волновое сопротивление: $Z_{\text{вх}}$ или $R_{\text{вх}}$) Импульсы со входа (1-е импульсы рис. 2) и выхода (2-е импульсы рис. 2) линии подаются на пластины осциллоскопа через широкополосный тройник на один луч при развёртке 50 нс/см и расстоянии между фронтами импульсов на уровне от 0,1 до 0,9 амплитуды соответствует времени прохождения волновой линии. Отношение времён задержки фронта выходного импульса в режиме ударной и простой волны (для простой волны $t_{\text{заг.пр.}} = Z_{\text{вх}} C_{\text{л}}$, для ударной — $t_{\text{заг.уд.}} = R_{\text{вх}} C_{\text{л}}$) даёт возможность найти $\mu = (R_{\text{вх}}/Z_{\text{вх}})^2$ изменение импеданса линии. Подключая последовательно к выходу генератора одну (рис. 2а,б), две (рис. 2в,г), три (рис. 2д,е) и т.д. секции, получаем увеличение времени задержки; при этом, как показывает эксперимент, оно увеличивается пропорционально числу секций (рис. 3) и в среднем составляет 10 нс в режиме простой волны и 22-25 нс в режиме ударной волны на одну секцию в 100 ячеек. (Большая цифра соответствует большему количеству секций, т.к. фронт становится короче и задержка увеличивается).

Таким образом, найдено среднее значение $Z_{\text{ли}} = 5$ и изменение импеданса линии при прохождении ударной волны составляет $\sqrt{5}$. Сопротивление нагрузки, как и было указано выше, $R_{\text{н}} = R_{\text{ср}} = 3,5$ Ом. В режиме согласования отсутствуют отражения в линии и можно определить время укорочения переднего фронта исходного импульса. По Катаеву ^{/7/} оно должно непрерывно уменьшаться с увеличением длины нелинейной линии, пока не наступит стационарный режим перемagnичивания, когда фронт ударной волны занимает одну элементарную ячейку, имеющую постоянную времени $\tau_{\text{я}} = \sqrt{L_0 C_0} \approx 10 \sqrt{10} \div 10 \sqrt{11}$ с. Ранее было установлено, что 250÷300 ячеек нелинейной линии ^{/5/} укорачивают фронт импульса примерно в 10 раз, т.е. на один порядок. Для квазисаксиальной линии при хорошем согласовании через 3 секции устанавливается ударная волна с фронтом 10 нс при длительности перепада на входе 100 нс, через 6 секций - 1 нс (см. осциллограммы в ^{/Е/}). Последовательное включение 9 и 12 секций (900 и 1200 ячеек линии) и далее до 18 секций (1800 ячеек) не даёт уменьшения длительности фронта (рис. 4), значение которой можно оценить \approx в 0,15÷0,20 нс.

Влияние изменения амплитуды импульса входного тока и изменения тока размagnичивания на длительность фронта ударной волны характеризуется следующим образом. Уменьшение амплитуды тока входного импульса от 1000 А до 700 А (рис. 5а) не увеличивает длительность перепада, изменение от 700 А до 100 А вызывает линейное увеличение длительности фронта до значения длительности фронта исходного импульса, при 100 А ударная волна превращается в простую. Увеличение же тока на выходе до 1300 А вызывает постепенное насыщение феррита (участок фронта, занятый ударной волной,

уменьшается). Размагничивающий ток имеет максимальное значение 2,5 А, его изменение до 1,5 А слабо изменяет величину $\tau_{\text{фр}}$ (рис. 5б), ниже 1,5 А плавно увеличивает длительность перепада до значения $\tau_{\text{фр}}$ входного импульса. Выше 2,5 А размагничивающий ток не оказывает влияния на длительность фронта ударной волны.

Но, с изменением входного тока меняется ударная магнитная проницаемость $\mu_{\text{уд}}$, а значит, и время прохождения ударного фронта по линии. Оно зависит также и от тока размагничивания. Эксперимент показывает (рис. 6а,б), что имеет место довольно резкая зависимость задержки между выходным и входным импульсами от амплитуды импульса входного тока. Но стабильность задержки остаётся в пределах ± 1 нс. Для зависимости времени задержки $\tau_{\text{з}}$ от тока размагничивания $I_{\text{разм}}$ (рис. 6б) характерен перегиб ($N_{\text{перег}} \approx 10$ Э, при этом меняется импеданс линии). Стабильность задержки от величины $I_{\text{разм}}$ выше 1А практически не зависит.

Таким образом, временные характеристики квазикоаксиальной линии не отличаются от аналогичных параметров известных коаксиальных и искусственных линий с ударной волной, в то время как значительно меньшее волновое сопротивление открывает широкие перспективы для применения её в сильноточных системах. С созданием квазикоаксиальной линии появилась возможность известными способами формировать килоамперные перепады тока длительностью 10^{-10} с на нагрузке в единицы Ом, используя источники напряжения в единицы киловольт.

В комплект оборудования, используемый при испытаниях, входил импульсный линейный генератор с тиратроном ТТИ-1000/25 с выходным сопротивлением 1,5 Ом на ток до 2 кА при длительности импульса 2 мкс с фронтом и спадом 80 нс /9/, синхроскопы СИ-11 и Тектроник 7904, набор импульсных делителей напряжения соединительных элементов и нагрузок /10/, а также устройство для размагничивания ферритовых колец постоянным током /9/.

В. М. Смирнов

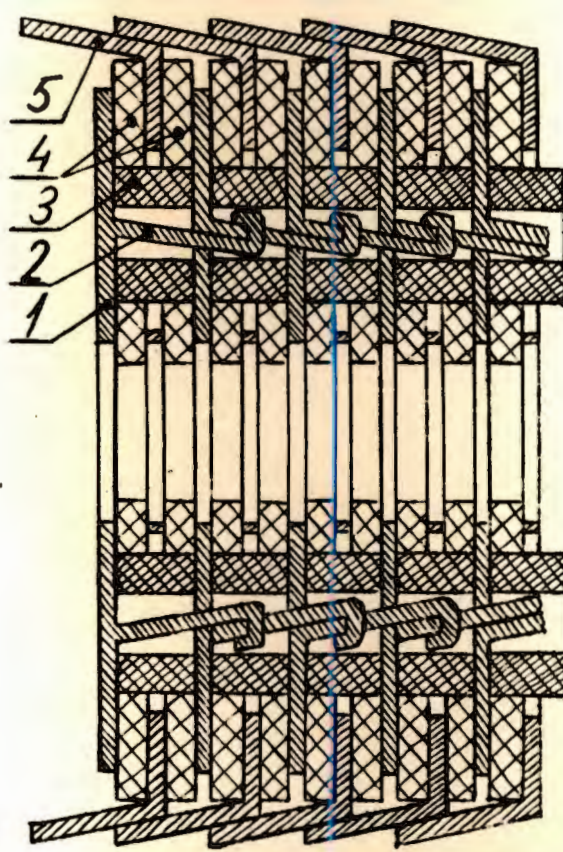


Рис. I Нелинейная квазикоаксиальная линия.

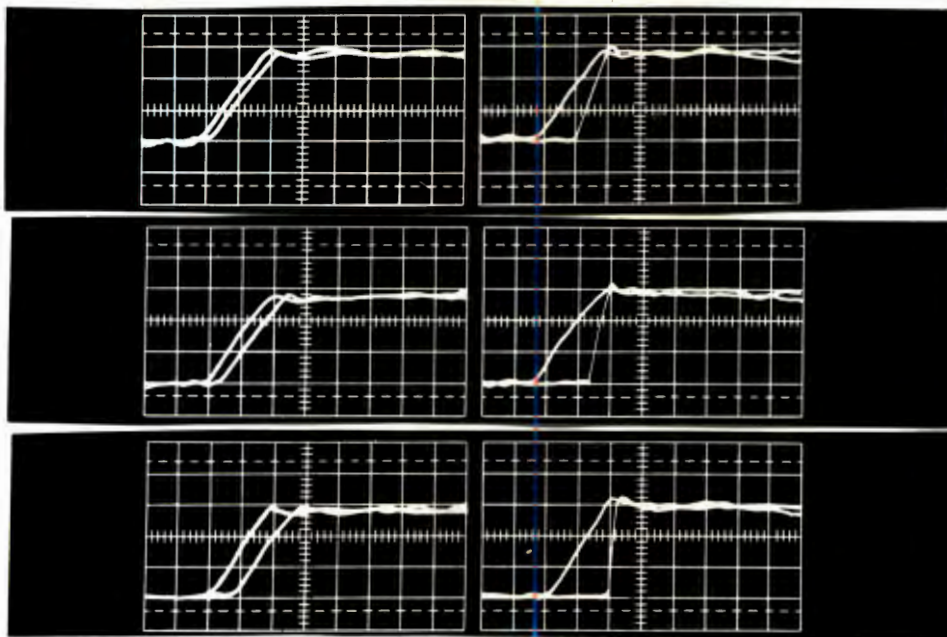


Рис. 2 Осциллограммы импульсов тока на входе и выходе квазикоаксиального обострителя при увеличении числа секций и изменении полярности размагничивающего тока. а, в, д – режим простой волны (полярность размагничивающего тока I_p совпадает с полярностью импульса входного тока I_0); б, г, е – режим ударной волны (полярность размагничивающего тока I_p противоположна полярности импульса входного тока I_0); а, б – одна секция; в, г – две секции; д, е – три секции. (Развертка 50 нс/см, $I_p = 2,5 \text{ A} = \text{const}$, $I_0 = 1000 \text{ A} = \text{const}$).

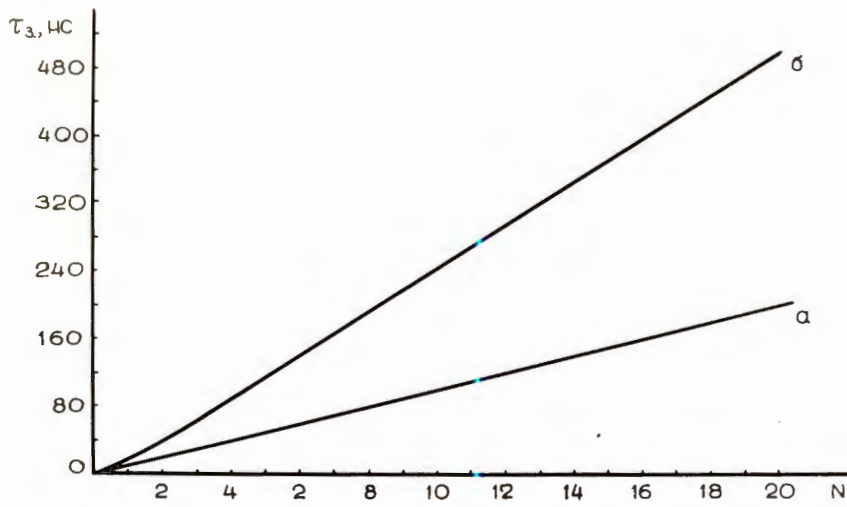


Рис.3 Зависимость времени задержки между входным и выходным импульсами в режиме простой (а) и ударной волны в квазикоаксиальном обострителе от числа секций (длины обостряющей линии).

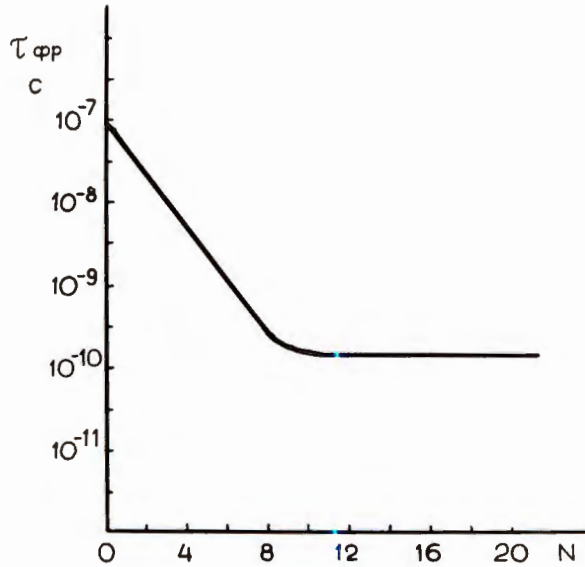


Рис.4 Укорочение фронта исходного импульса в квазикоаксиальном обострителе при увеличении числа секций.

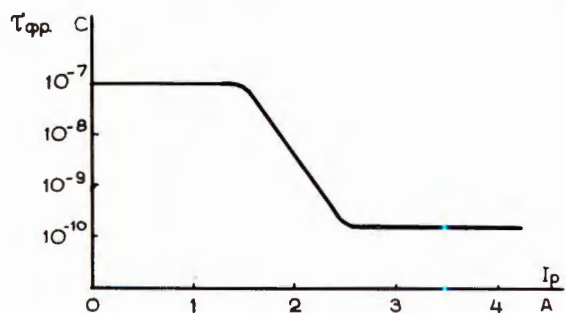
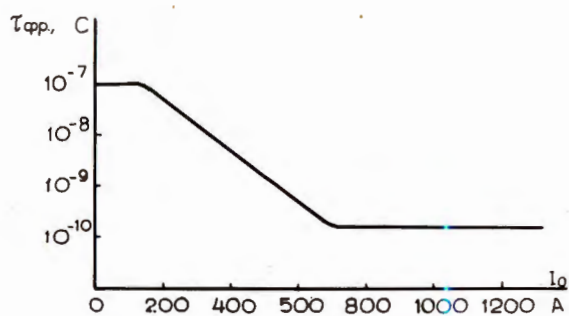


Рис.5 Зависимость длительности фронта ударной волны $\tau_{\text{фр.}}$, с в квазикоаксиальной нелинейной линии от изменения:
 а) амплитуды импульса входного тока I_0 , А; $I_p = \text{const}$,
 б) тока размагничивания I_p , А; $I_0 = \text{const}$.

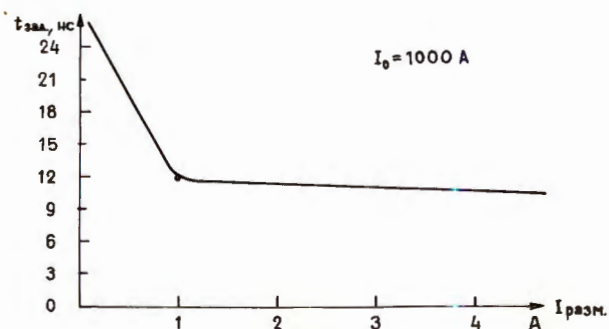
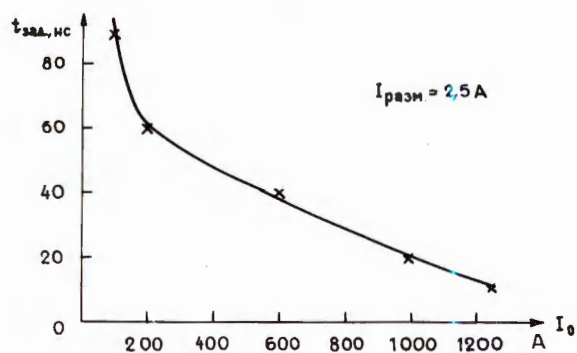


Рис.6 Зависимость времени задержки фронта стационарной ударной волны $t_{\text{заз.}}$, с в квазикоаксиальной нелинейной линии от изменения:
 а) амплитуды импульса входного тока I_0 , А; $I_p = \text{const}$,
 б) тока размагничивания I_p , А; $I_0 = \text{const}$.

Литература

1. Швец В.А. "Монохроматизация электронного пучка в линейном индукционном ускорителе", в сб. "Разработка и практическое применение электронных ускорителей" (материалы Всесоюзной конференции, г. Томск, 3-5 сентября 1975 г.), Изд. ТГУ, г. Томск, 1975.
2. Швец В.А. "Условия монохроматизации электронного пучка в линейном индукционном ускорителе", ОИЯИ, 13-8844, Дубна, 1975.
3. Швец В.А. "О согласовании рефлекторной секции ЛИУ с трактом формирования импульсов монохроматизации", ОИЯИ, 9-10301, Дубна, 1976.
4. Анашкин А.И., Богданов О.С., Букаев П.В., Вахрушин Ю.П., Малышев И.Ф., Наливайко Г.А., Павлов А.И., Суслов В.А., Хальчицкий Е.П. "Линейный индукционный ускоритель", АЭ, т. 21, вып. 6, с.439, 1966.
5. Харьюзов Р.В., Швец В.А. "Нелинейная квазикоаксиальная линия для формирования ударных электромагнитных волн", ОИЯИ, 13-8709, Дубна, 1975.
6. Харьюзов Р.В., Швец В.А. Изобретение "Линия для формирования перепадов напряжения", а.с. № 577656, бюлл. ОИПОТЗ № 39 от 25.10.77.
7. Катаев И.Г. "Ударные электромагнитные волны", изд-во "Советское Радио", Москва, 1963.
8. Катаев И.Г., Литвинчук А.А., Миронос А.С. "Схемы для получения прямоугольных импульсов с использованием длинных линий с ферритом", Вопросы радиоэлектроники, сер. 6, вып. 1, 1963.
9. Швец В.А. "Формирование импульсов монохроматизации электронного пучка ЛИУ", ОИЯИ, 13-9077, Дубна, 1975.
10. Швец В.А. "Низкоомная широкополосная нагрузка килоамперных импульсных генераторов", ОИЯИ, 13-10302, Дубна, 1976.