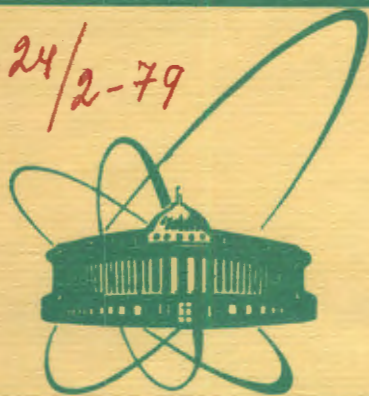


2224/2-79



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

С 345 е 5

Ш - 35

11/41-79

13 - 12269

В.А.Швец

ДЛИТЕЛЬНОСТЬ ФРОНТА
СТАЦИОНАРНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ
В МНОГОКАНАЛЬНОЙ ОБОСТРЯЮЩЕЙ ЛИНИИ

1979

13 - 12269

В.А.Швец

ДЛИТЕЛЬНОСТЬ ФРОНТА
СТАЦИОНАРНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ
В МНОГОКАНАЛЬНОЙ ОБОСТРЯЮЩЕЙ ЛИНИИ

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Швец В.А.

13 - 12269

Длительность фронта стационарной ударной волны
в многоканальной обостряющей линии

Излагается методика определения минимальной длительности фронта стационарной ударной волны в многоканальной обостряющей линии. Оценивается влияние структуры многоканальной линии на длительность фронта по сравнению с одноканальными коаксиальными и искусственными линиями, рассчитанными на тот же ток ударной волны. Получено аналитическое выражение для оптимального значения начальной намагниченности феррита, определяемой током размагничивания линии. Оно позволяет найти из уравнения некогерентного перемагничивания феррита минимальную длительность фронта. Вычисленные значения минимальной длительности фронта сопоставлены с измеренными экспериментально. Определены также минимальные длительности фронтов для многоканальных линий с ферритовыми кольцами НПП и с пермаллоевым заполнением. Данная методика позволяет определить длительность фронта стационарной ударной волны в многоканальной обостряющей линии еще на стадии расчета, что является необходимым для выяснения пригодности ее в том или ином физическом эксперименте.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1979

Shvets V.A.

13 - 12269

Duration of Stationary Shock Wave Front in
a Multichannel Shortening Line

A procedure of determination of minimal duration of stationary shock wave front in a multichannel shortening line is reported. The influence of the structure of the multichannel line on front duration in comparison with that of one-channel coaxial and artificial lines calculated for the same shock wave current is evaluated. An analytical expression is obtained for an optimal value of initial magnetization depending on the line demagnetization current. It allows one to find the minimal front duration from the equation of coherent remagnetization of ferrite. Calculated data on minimal front duration is compared with those obtained experimentally. Besides, the minimal front duration was determined for multichannel lines with ferrite coils, and with permalloy layers. The reported procedure allows one to find the duration of stationary shock wave front in the multichannel shortening line even in the process of calculation, and thus its possible applications in physical experiment may be predicted.

The investigation has been performed at the Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1979

Многоканальные обостряющие линии ^{1,2/}, предназначенные для формирования перепадов тока амплитудой $1 \div 20$ и более кА, длительностью менее наносекунды, отличаются малым /на уровне $1 \div 0,1$ Ом/ входным волновым сопротивлением, что существенно облегчает их применение в сильноточных системах. Области использования этих линий могут быть весьма обширны: питание наносекундных ЛИУ ^{3/}, питание мощных импульсных магнитов ^{2/}, килоамперных ЛИУ и килоамперных импульсных трансформаторов с многовитковыми индукторами ^{4/}, управление электронными пучками ^{5/}, в накопительных системах электронных пучков, где могут быть применены системы, подобные дефлекторной секции ЛИУ-30 ^{5/}, но питаемые существенно большим током, для нейтроноскопических исследований в магнитных полях и т.п. Сущность их конструкции заключается в параллельном соединении нелинейных обостряющих каналов в общем коаксиальном внешнем проводнике, что приводит к уменьшению погонной индуктивности, являющейся основным препятствием к применению обостряющей линии при одноканальной структуре ее в сильноточных системах. При этом подразумевается, что все каналы идентичны и параллельное соединение их не изменяет постоянной времени $\tau_0 = \sqrt{L_0 C_0}$.

В этой работе излагается методика определения минимальной длительности фронта стационарной ударной волны в многоканальной обостряющей линии и оценивается влияние структуры многоканальной линии на длительность фронта по сравнению с одноканальными коаксиальными и искусственными линиями, рассчитанными на тот же ток ударной волны.

Как известно, в коаксиальной линии передачи /с распределенными параметрами/ нет понятия "постоянной времени ячейки", в отличие от искусственной линии с распределенными

параметрами. Поэтому за одну ячейку в многоканальной линии примем условно отрезок ее вдоль направления распространения волны, ограниченный одним ферритовым кольцом. Например, в многоканальной линии ^{/1/} одна ячейка " это "плоский конденсатор" 1-5 /рис. 1/ с девятью ферритовыми кольцами, а в линии ^{/2/} - десять параллельно включенных отрезков "цилиндрических конденсаторов" 2-5 /рис. 2/. Следовательно, индуктивность ячейки в многоканальной линии будет уменьшена соответственно в 9 или 10 раз по сравнению с одноканальной линией, а емкость соответственно увеличена.

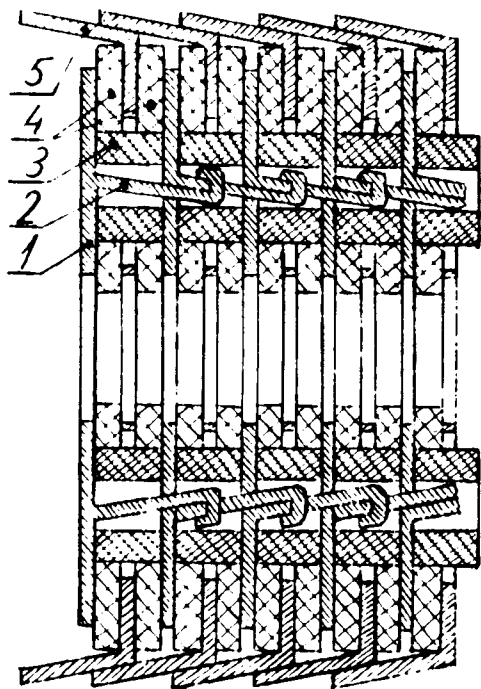


Рис. 1. Многоканальная линия ^{/1/} на ток 1,3 кА.

Рассмотрение волновых процессов в нелинейных линиях обычно проводят в установившемся, т.е. стационарном режиме, и поэтому стационарными принято называть электромагнитные волны, прошедшие достаточно большой отрезок нелинейной линии передачи, параметры которой остаются неизменными. Дли-

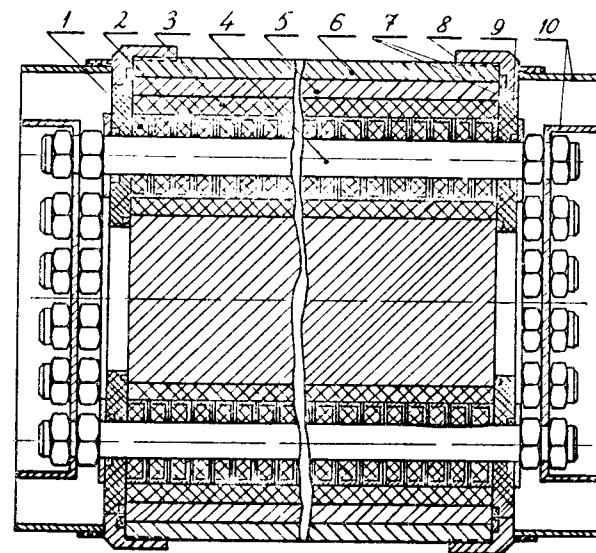


Рис. 2. Многоканальная нелинейная линия ^{/2/} на токи более 10 кА.

тельность фронта стационарной ударной волны зависит ^{/6/} как от параметров ячейки /погонных параметров/ (τ_0, ρ_0), так и от параметров феррита (a, M_s) / a - коэффициент диссипации, M_s - намагниченность насыщения, $4\pi M_s = B_s$ /, и состояния его относительной начальной намагниченности " m_0 ". Поскольку параметры τ_0, ρ_0, a, M_s заданы конструкцией линии и выбранным типом феррита, длительность фронта будет определяться уровнем начальной намагниченности, оптимальная величина которого может быть найдена следующим образом.

При быстром перемагничивании / $\Delta H / \Delta t > 10^8 \text{ Э/с}$ / связь намагниченности " m " и тока " i " удовлетворительно описывается уравнением ^{/6/}, которое справедливо для линии с распределенными параметрами, так как не учитывает дисперсионных характеристик ее структуры:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{ay}{1+a^2} (1-m^2)i, \quad /1/$$

где $\gamma = 1,76 \cdot 10^7 \text{ 1/Э} \cdot \text{с}$ - магнетомеханическое отношение для электронного спина /гиромагнитное отношение для электрона/.

Вид функции $m(t)$ дается, например, в ^{6/}. Интегрирование /1/ в максимуме функции $m(t)$ приводит к следующему выражению для длительности фронта:

$$\tau_{\text{фр.}} = \frac{1+a^2}{1+m_0} \frac{3}{\alpha \gamma p I_y}, \quad /2/$$

где p - коэффициент пропорциональности, $[p] = \text{Гс/А}$.

В соотношении /2/ величина I_y задается геометрическими размерами кольца /суммой средних диаметров параллельно включенных колец в одной ячейке многоканальной линии/, а " m_0 " можно определить из уравнений стационарных волн, которые для линии передачи с нелинейными магнитными свойствами представимы в общем случае в виде системы:

$$I_2 - I_1 = C_0 \frac{dU}{dt} \quad /3/$$

$$U_1 - U_2 = \frac{d\Phi_2}{dt} \quad /4/$$

$$\Phi_2 = L_0(I_2 + 4\pi M_z/p) \quad /5/$$

где граничные условия как для линии с распределенными, так и с сосредоточенными параметрами записываются в виде ^{7/}:

$$\left. \begin{aligned} I_y - I_0 &= v_y C_0 (U_y - U_0) \\ U_y - U_0 &= v_y (\Phi_y - \Phi_0) \end{aligned} \right\} \quad /6/$$

Здесь в ^{3 ÷ 6/}: I , U - ток, напряжение в линии; v_y - скорость распространения ударной волны, L_0 и C_0 - индуктивность и емкость ячейки линии с сосредоточенными параметрами, погонные индуктивность и емкость в линии с распределенными параметрами; M_z - проекция вектора намагниченности на ось распространения волны /ось z /; M - модуль вектора намагниченности; Φ - погонный поток магнитной индукции; индексы "y" и "0" соответствуют значениям величин за фронтом ударной волны и перед ним; индексы "1" и "2" - значениям величин на входе и выходе любого элементарного участка линии, выделенного для интегрирования /в искусственной линии - на входе и выходе ячейки/.

Так как в случае одной ячейки /или выделенного для интегрирования участка линии/ с постоянной времени τ_0 :

$$\left. \begin{aligned} I_2(t) &= I_1(t - \Delta t_1) \\ U_2(t) &= U_1(t - \Delta t_1) \end{aligned} \right\} \quad /7/$$

где $\Delta t_1 \leq \tau_0$ /равенство в искусственной линии/, то подстановка /7/ в /3-5/ дает систему дифференциальных уравнений с запаздывающим аргументом ^{8/}:

$$I(t + \Delta t_1) - I(t) = C_0 \frac{dU(t + \Delta t_1)}{dt} \quad /8/$$

$$U(t + \Delta t_1) - U(t) = L_0 \left(\frac{dI(t)}{dt} + \frac{4\pi}{p} \frac{dM(t)}{dt} \right) \quad /9/$$

Подставляя /9/ в /8/ после исключения $U(t)$, получаем:

$$I(\tau + \Delta \tau_1) - 2I(\tau) + I(\tau - \Delta \tau_1) = \frac{d^2 I(\tau)}{d\tau^2} + \frac{4\pi M_s}{p} \frac{d^2 m(\tau)}{d\tau^2}, \quad /10/$$

где

$$\tau_0 = t / \sqrt{L_0 C_0}, \quad \Delta \tau_1 = \Delta t_1 / \sqrt{L_0 C_0}, \quad m(\tau) = m = M_1 / M.$$

Интегрирование /10/ с учетом начальных условий /6/ дает следующее выражение для времени задержки τ_3 и импеданса R_Φ стационарной ударной волны:

$$\tau_3^2 / \tau_0^2 = R_\Phi / \rho_0 = 1 + \frac{4\pi M_s (1 - m_0)}{p I_y} \quad /11/$$

Здесь $R_\Phi = U_y / I_y$, $\rho_0 = \sqrt{L_0 / C_0}$, $m_0 = M_{0z} / M$, I_y - амплитуда тока в ударной волне, не приводящая к насыщению феррита, ей соответствует H_y , например, для феррита марки О,16 Вм, ≈ 300 Э /имеется в виду, что перед началом вершины импульса на фронте нет насыщенного участка, повторяющего по форме фронт входного перепада тока, и ударная волна занимает весь фронт/.

Выражение /11/ позволяет определить то значение m_0 , при котором наблюдается минимум $\tau_{фр}$. Методика состоит в следующем:

К выходу генератора подключают последовательно одинаковые отрезки нелинейной линии, увеличивая ее длину и сохраняя постоянным уровень размагничивания. Суммарное время задержки при этом растет пропорционально длине линии. Время задержки измеряют как расстояние между фронтами входного и выходного импульсов в линии /1/. Так как погонная емкость не зависит от нелинейных параметров, ее можно определить, например, RLC-мостом. Меняя полярность размагничивающего тока, устанавливаем в линии режим простой или ударной волны. Для простой волны $\tau_{з.пр.} = \rho_0 C$, для ударной - $\tau_{з.уд.} = R_{ф} C$. Определив с помощью осциллоскопа $\tau_{з.пр.}$ и $\tau_{з.уд.}$, найдем $\mu_y = (R_{ф}/\rho_0)^2$ - изменение импеданса линии при прохождении ударной волны, которое позволяет найти L_0 , U_y и I_y . Теперь, когда точно известны входной и выходной импедансы линии, постоянная времени ячейки с учетом насыщенного феррита и другие параметры, в режиме согласования при отсутствии отражений в линии определяем I_y и $\tau_{з.уд.}$, которые соответствуют минимуму $\tau_{фр.}$ при фиксированном уровне размагничивания. После подстановки всех величин в /11/ вычисляем m_0 и затем из /2/ находим длительность фронта стационарной ударной волны, минимально достижимую в линии.

Например, для линии рис. 1 $C_0/\ell = 32,5 \cdot 10^{-9}$ Ф/м, $L_0/\ell = 74,5 \cdot 10^{-9}$ Гн/м, время задержки стационарной ударной волны после 1000 ячеек линии $\tau_{з.уд.} = 49,2 \cdot 10^{-9}$ с/м, $\rho_0 = 1,5$ Ома, $R_{ф} = 3,5$ Ома, $\mu_y = 5$; $B_s = 0,3$ Тл, $\alpha = 0,06$ /для феррита 0,16 Вм/, $I_y = 1300$ А. Таким образом, m_0 получается равным $-0,954$ и $\tau_{фр.мин.} = 0,09$ нс. Экспериментальное измерение $\tau_{фр.}$ /1/ осциллоскопом Тектроникс 7904 дало значение $\tau_{фр.} \approx 0,15 \pm 0,12$ нс ($1/4 \div 1/3$ см горизонтальной развертки в диапазоне 0,5 нс/см).

Сравним теперь измеренное и вычисленное значения $\tau_{фр.мин.}$ с длительностью фронта стационарной ударной волны в искусственной линии, ячейки которой имели бы те же параметры L_0 и C_0 .

Интегрирование уравнения /1/, проведенное в работе /9/ для линии с сосредоточенными параметрами методом линеаризации дисперсионных характеристик ее, дает выражения вида:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{sh}^2(\tau_3/2T_1) &= (\tau_0/4T_1)(\tau_0/T_1 + \frac{4\pi M_s \alpha \gamma (1 - m_0^2) \tau_0}{1 + \alpha^2}) \\ 2 \sin(\pi \tau_3/T_2) &= \pi \tau_0/T_2 \\ \tau_{фр.мин.} &= T_1 + T_2. \end{aligned} \right\} /12/$$

Здесь $1/T_1$ - инкремент нарастания тока в передней части фронта волны, определяемый постоянной времени ячейки $\tau_0 = \sqrt{L_0 C_0}$, а $1/T_2$ - декремент затухания или частота осцилляций за ее фронтом, которые определяются постоянной времени ячейки с учетом насыщенного феррита ($\sqrt{\mu_y L_0 C_0}$).

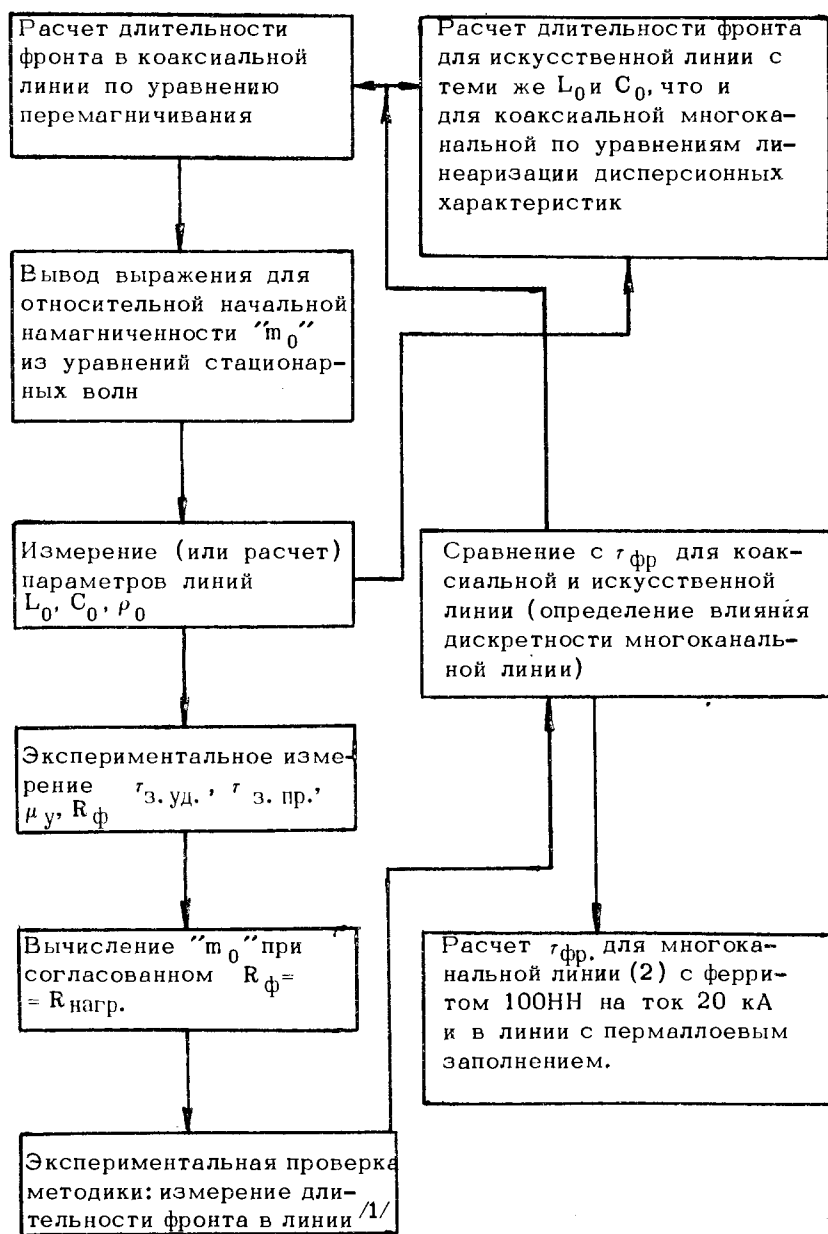
Минимальное значение длительности фронта в искусственной линии для вычисленных параметров L_0 и C_0 , определяемое из /12/, составляет для феррита 0,16 Вм /9/ $3,7 \cdot 10^{-10}$ с, а для коаксиальной одноканальной линии из /2/ /1/ - $1,2 \cdot 10^{-11}$ с. Таким образом, в многоканальной линии может быть получена длительность фронта меньшая, чем в искусственной линии. Эта длительность, большая, однако, чем дает расчет $\tau_{фр.мин.} = 0,09$ нс/, вызвана, с одной стороны, метрологическими погрешностями /недостаточной широкополосностью соединительных элементов и нагрузок - $f_{макс.} = 1000$ МГц/, с другой стороны, видимо, небольшим влиянием дисперсионности структуры многоканальной линии.

Таким образом, методика, изложенная в этой работе, может быть отражена блок-схемой /см. стр. 10/.

Аналогичный расчет для многоканальной линии /2/, состоящей из 10 каналов /общий ток 20 кА/, заполненных ферритом 100НН типоразмера $\phi 30 \times \phi 20 \times 5$ мм, дает следующие значения параметров: $L_0 = 50 \cdot 10^{-9}$ Гн/м, $C_0 = 3 \cdot 10^{-6}$ Ф/м, $\tau_{з.уд.} = 387 \cdot 10^{-9}$ с/м, $\rho_0 = 0,125$ Ома, $R_{ф} = 0,396$ Ома, $\mu_y = 10$, $B_s = 0,46$ Тл, $\alpha = 0,08$, $I_y = 20$ кА, $\tau_{фр.мин.} = 0,48$ нс.

Экспериментальное исследование, проведенное в работе /10/ по определению длительности фронта в коаксиальной линии, заполненной пермаллоевыми торами, показало, что в такой

Схема определения длительности фронта в многоканальной линии



системе может быть получена длительность перепада $\tau_{\text{фр.}} \approx 5$ нс. Однако расчет, проведенный для аналогичной /2/ десятиканальной линии по методике, изложенной выше, дает значение $\tau_{\text{фр. мин.}} \approx 6,7$ нс. Это вызвано, очевидно, различием в характере перемагничивания пермаллоя и феррита, что не учитывается уравнением /1/, которое описывает некогерентное перемагничивание доменной структуры феррита. Различие, как видно, невелико. Применение же пермалловых торов в многоканальных линиях, во-первых, существенно упрощает технологию их изготовления, так как практически нет ограничения на типоразмеры пермалловых торов по сравнению с ферритовыми кольцами, а во-вторых, рабочий перепад индукции ΔB у пермаллоя значительно больше, чем у феррита. Многоканальная структура линии позволит существенно снизить погонную индуктивность, т.е. увеличить суммарный ток перепада без увеличения времени перемагничивания пермаллоя, которое при малых объемах сердечников составляет $5 \div 15$ нс /10/, а при одноканальной структуре при том же значении перепада тока составило бы $50 \div 70$ нс, так как наружные слои сердечников при увеличенном объеме торов даже не достигли бы насыщения за такое время.

В заключение можно сказать, что приведенная здесь методика позволяет определить длительность фронта стационарной ударной волны в многоканальной обостряющей линии еще на стадии расчета, что обычно является необходимым для выяснения пригодности ее в том или ином физическом эксперименте. Необходимо также отметить, что в данной работе не проведена количественная оценка влияния разбросов магнитных параметров ферритовых колец и геометрических размеров изготовленных электродов многоканального обострителя на предельную длительность фронта. Для оценки этого влияния необходимо было бы в исходные уравнения /3 ÷ 5/ ввести приращения величинам ΔL , ΔC , ΔU , ΔJ , $\Delta \Phi(\Delta B)$, ΔM , определяемые указанными выше разбросами. Последнее настолько бы усложнило проведенные здесь расчеты, что получение окончательного результата было бы весьма затруднительным. В практическом отношении эти разбросы можно сократить до минимума применением, например, ферритовых колец марки ВТ и НН первой группы, где отклонения геометрических и магнитных параметров по ГОСТу не превышают 2%,

и изготовлением точно выполненных штампов для электродов обострителя, разметка отверстий и прочих размеров которых может быть проведена, например, электронским методом, как это сделано в нашем случае.

ЛИТЕРАТУРА

1. Швец В.А. ОИЯИ, 13-11399, Дубна, 1978.
2. Швец В.А. ОИЯИ, 13-10300, Дубна, 1976.
3. Харьюзов Р.В., Швец В.А. Авт. свид. СССР №612426, бюлл. ОИПОТЗ, 1978 г., №23, с. 194.
4. Харьюзов Р.В., Швец В.А. ОИЯИ, 9-11395, Дубна, 1978.
5. Швец В.А. ОИЯИ, 9-11798, Дубна, 1978.
6. Gyorgy E.M. J. Appl. Phys., 1957, 28, p.1011; 1958, 29, p.283; 1958, 29, p.1709; 1958, 29, p.3283.
7. Богатырев Ю.К. Импульсные устройства с нелинейными распределенными параметрами. "Сов. Радио", М., 1974.
8. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров. "Наука", М., 1967.
9. Месяц Г.А. Генерирование мощных наносекундных импульсов. "Сов. Радио", М., 1974.
10. Швец В.А. ОИЯИ, 13-11799, Дубна, 1978.

Рукопись поступила в издательский отдел
26 февраля 1979 года.