

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



9/vi-75

9 - 8644

K-144

2078/2-75

В.И.Казача, И.В.Кожухов

О ПРИМЕНЕНИИ РАДИАЛЬНЫХ ЛИНИЙ
В ИМПУЛЬСНЫХ УСКОРИТЕЛЯХ

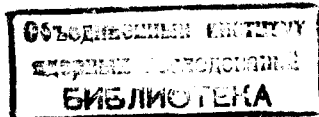
1975

9 - 8644

В.И.Казача, И.В.Кожухов

О ПРИМЕНЕНИИ РАДИАЛЬНЫХ ЛИНИЙ
В ИМПУЛЬСНЫХ УСКОРИТЕЛЯХ

Направлено в ЖТФ



На высокоточных импульсных ускорителях, широко применяемых в последние годы в различных областях физики, были получены электронные пучки с большим диапазоном характерных параметров /энергия, сила тока, длительность импульса/^{1/}. Все эти ускорители одноазорные, с плазменным или автоэмиссионным катодом. При увеличении энергии электронного пучка до 10-15 МэВ они оказываются очень громоздкими и дорогими^{2/}. Эту трудность можно обойти, если использовать многоазорные ускорительные системы. В каждом азоре создается относительно небольшое импульсное напряжение /1-2 мВ/, а затем энергия частиц, ускоренных на ряде таких азоров, может быть доведена до больших значений.

Многоазорная ускорительная система имеет особенно важное значение для коллективного ускорителя на большие энергии, основные экономические и технические показатели которого определяются тем, насколько рационально выбрана система ускорения электронного кольцевого сгустка. В работе^{3/} предложена многоазорная ускорительная система с применением двойных радиальных линий /ДРЛ/ для ускорения кольцевых сгустков заряженных частиц до больших энергий. Предложенная система имеет существенные недостатки. Во-первых, из-за внутреннего расположения питающих генераторов возрастают трудности их электрической изоляции и создания разрядников на повышенный ток с фронтами ≈ 1 нс. Расположение генераторов вне ДРЛ менее компактно, но легче осуществимо. Во-вторых, и это наиболее существенно, на азоре ДРЛ формируется сильно искаженный импульс напряжения из-за его дифференцирования, что обусловлено неоднородностью параметров радиальной ли-

нии в направлении распространения волны. Тогда длительность используемой части импульса, сформированного на зазоре, составляет $\approx 10\%$ от его полной длительности и возможно ускорение только очень коротких сгустков. Кроме того, возникают жесткие требования к синхронизации.

В ряде работ^{4,5/} обсуждались некоторые вопросы, касающиеся радиальных линий. В данной работе исследуются переходные характеристики радиальных линий с электродами различной формы при возбуждении в них основной E-волны, имеющей только компоненты E_z и H_ϕ .

Целью нашего исследования является выбор и обоснование такой ДРЛ, в рабочем зазоре которой формируется оптимальное импульсное напряжение, имеющее максимальную амплитуду при наименьшем искажении импульса в течение нескольких десятков наносекунд.

Расчет переходных характеристик радиальных линий

В общем случае задача расчета переходных характеристик простых и двойных радиальных линий оказывается чрезвычайно сложной. Поэтому для понимания характера процессов, происходящих в радиальных линиях, рассмотрим частные случаи. На рис. 1 представлен схематичный вид возможных простых радиальных линий, электродами которых являются соосные параллельные диски или соосные конусы. Радиальная осесимметричная линия /рис. 1а/ представляет собой неоднородную длинную линию, у которой погонные емкость и индуктивность зависят от координаты:

$$C(r) = \frac{\epsilon \cdot r}{2d} \cdot \frac{1}{9 \cdot 10^{11}} \left[\frac{\Phi}{\text{см}} \right], \quad L(r) = \frac{\mu \cdot 2 \cdot d}{r} \cdot \frac{1}{10^9} \left[\frac{\Gamma}{\text{см}} \right], \quad /1/$$

где расстояние между электродами $d \ll R$. Характеристическое сопротивление для такой линии

$$Z(r) = \frac{60d}{\sqrt{\epsilon \cdot r}} \text{ Ом} \quad (\mu = 1). \quad /2/$$

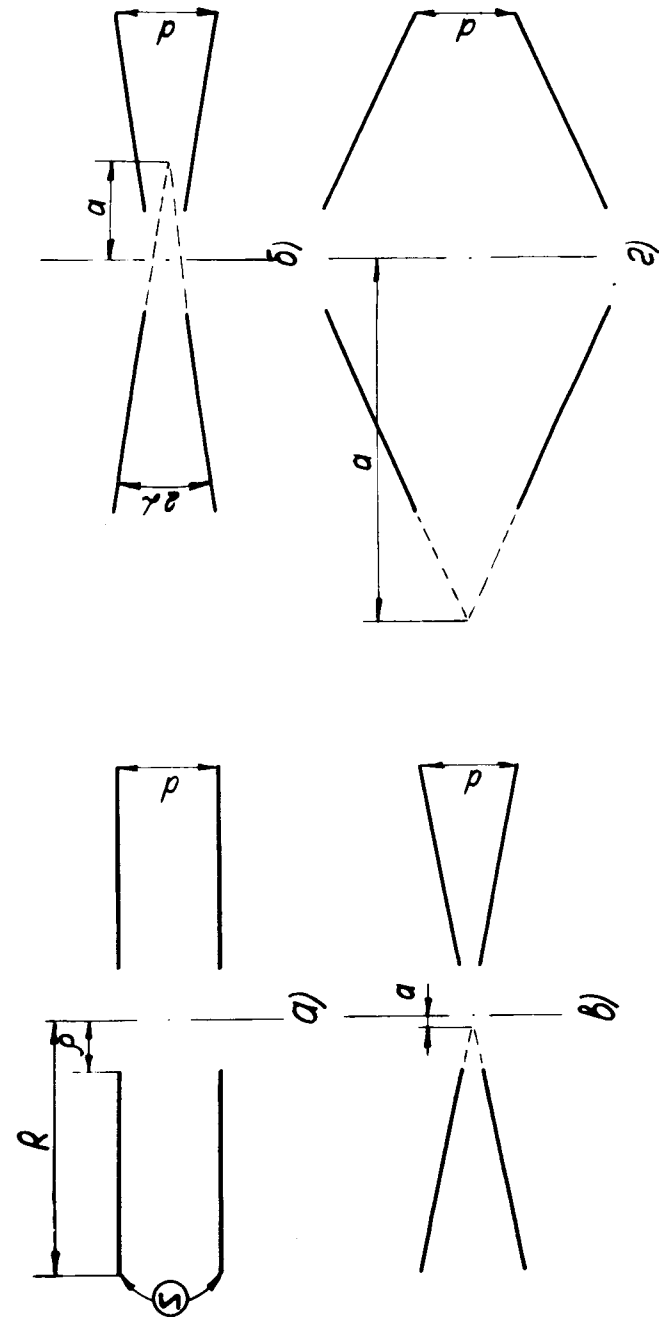


Рис. 1. Схематичный вид простых радиальных линий.

Используя уравнения /1/ и уравнение длинной линии /без потерь/

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} - \frac{1}{L(r)} \cdot \frac{\partial L(r)}{\partial r} \cdot \frac{\partial U}{\partial r} - L(r) \cdot C(r) \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = 0, \quad /3/$$

получим уравнение, описывающее распространение волны напряжения в радиальной линии:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} - \frac{\epsilon \mu}{c^2} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = 0, \quad \rho \leq r \leq R. \quad /4a/$$

c - скорость света в вакууме. Для радиальной линии, представленной на рис. 1б, погонные емкость и индуктивность определяются формулами

$$C(r) = \frac{\epsilon r \cdot \sin \theta}{2(r+a) \cdot \operatorname{tg} \alpha} \cdot \frac{1}{9 \cdot 10^{11}} \left[\frac{\Phi}{\text{см}} \right], \quad L(r) = \frac{\mu 2 \cdot (r+a) \cdot \operatorname{tg} \alpha}{r \cdot \sin \theta} \cdot \frac{1}{10^9} \left[\frac{\Gamma}{\text{см}} \right],$$

где θ - угол между образующей и осью конуса, параметр a - расстояние от оси симметрии радиальной линии до точки пересечения продолжения образующих конусов. Тогда уравнение, описывающее распространение волны напряжения в такой линии, принимает вид:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{a}{r(r+a)} \frac{\partial U}{\partial r} - \frac{\epsilon \mu}{c^2} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = 0, \quad 0 \leq a < +\infty. \quad /4б/$$

В случае, когда $a = 0$, распространение волны напряжения описывается таким же волновым уравнением, как и для однородной линии. При $a \rightarrow \infty$ уравнение /4б/ переходит в /4а/. Аналогично для радиальных линий, представленных на рис. 1в и 1г, получаем:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} - \frac{a}{r(r-a)} \frac{\partial U}{\partial r} - \frac{\epsilon \mu}{c^2} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = 0, \quad 0 < a < r; \quad /4в/$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{a}{r(a-r)} \frac{\partial U}{\partial r} - \frac{\epsilon \mu}{c^2} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = 0, \quad R < a < +\infty. \quad /4г/$$

Пусть к радиальной линии по окружности радиуса R подключен генератор единичного напряжения с внутренним сопротивлением $Z_i = 0$. Тогда переходные характе-

ристики радиальных линий получаются при решении уравнений /4а-4г/ с нулевыми начальными и следующими граничными условиями:

$$U(R, t) = 1, \quad \left. \frac{\partial U}{\partial r} \right|_{\rho} = 0.$$

Решением уравнения /4а/ будет:

$$U(\rho, t) = 1 - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_n \rho} \cdot \frac{J_0(\lambda_n R) \cdot J_1(\lambda_n \rho)}{J_0^2(\lambda_n R) - J_1^2(\lambda_n \rho)} \cdot \cos\left(\frac{c}{\sqrt{\epsilon \mu}} \lambda_n \cdot t\right), \quad /5/$$

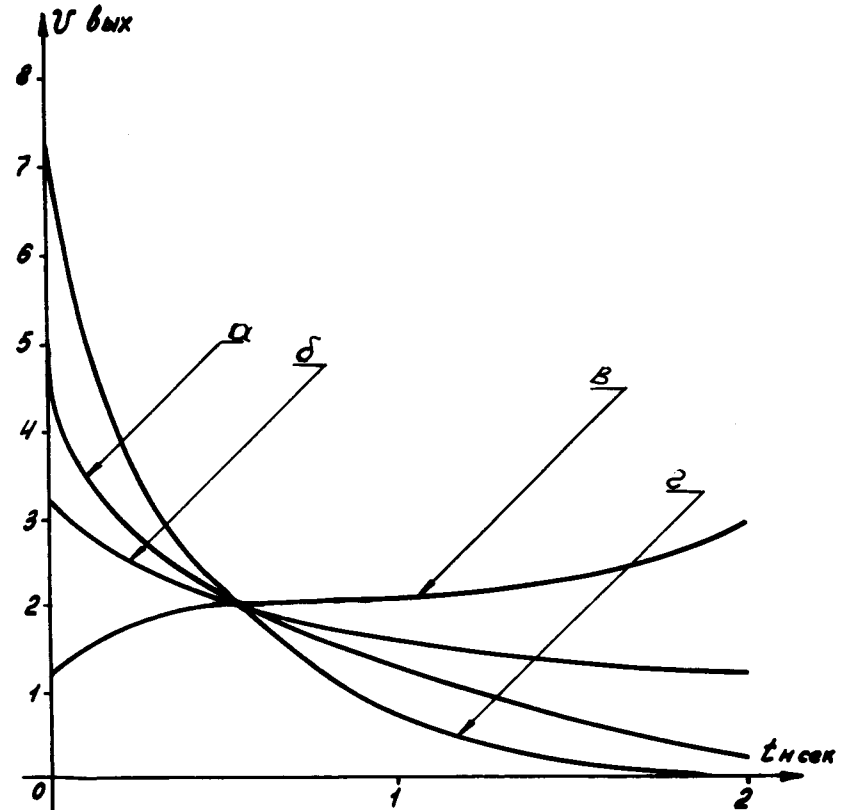


Рис. 2. Рассчитанные переходные характеристики линий, изображенных на рис. 1. Для 1б, 1в, 1г параметр a равен соответственно 14, 4 и 60 см.

где λ_n - корни характеристического уравнения

$$J_0(\lambda \cdot R) \cdot N_0'(\lambda \cdot \rho) - J_0'(\lambda \cdot \rho) \cdot N_0(\lambda \cdot R) = 0.$$

J_0 и J_1 - функции Бесселя, N_0 - функция Неймана. Уравнения /4б/-/4г/ решались численно на ЭВМ БЭСМ-6 методом подгонки /6/. Для всех уравнений были в силе условия $\epsilon = \mu = 1$, $\rho = 6$ см, $R = 36$ см. На рис. 2 приведены результаты решения уравнений /4а/-/4г/ в виде графиков, т.е. переходные характеристики радиальных линий /рис. 1/. Отсчет времени ведется с момента, когда волна напряжения достигнет выхода радиальной линии.

Обозначим удвоенное время пробега волны вдоль линии через τ , в расчетах $\tau = 2$ нс. Нас интересует переходная характеристика только в течение первого интервала τ , так как этот ее участок является рабочим.

Для сравнения был проведен расчет переходной характеристики радиальной линии, у которой коэффициент трансформации на единице длины постоянен. Образующая конусообразных электродов такой линии меняется по закону $\frac{r}{R} \cdot \exp[\gamma \cdot (R-r)]$. Эти линии имеют более широкую

полосу пропускания /7/. Расчет показал, что переходные характеристики данной линии и линии, представленной на рис. 1б /а = 16 см/, отличаются не более чем на 6%, если R , ρ , зазоры на входе и выходе у них одинаковы.

Если внутреннее сопротивление генератора $Z_i \neq 0$, то форму выходного импульса удастся вычислить при условии, что его длительность много меньше, чем τ /8/. При этом считалось, что линия имеет согласованную нагрузку, и пренебрегалось многократными отражениями. Тогда

$$U_{\text{ВЫХ}} \sim \left(\frac{Z_{\text{ВХ}}}{Z_i + Z_{\text{ВХ}}} \right) \cdot \left[1 + \frac{t}{4T_0} \cdot \frac{d \ln Z}{dx} \Big|_0 \left(\frac{Z_i - Z_{\text{ВХ}}}{Z_i + Z_{\text{ВХ}}} \right) - \frac{t}{8} \int_0^{\ell} \frac{1}{T} \left(\frac{d \ln Z}{dx} \right)^2 dx \right]. \quad /6/$$

Здесь $T(x)$ - задержка на единицу длины неоднородной линии; T_0 - задержка на единицу длины, соответствующая началу линии; ℓ - длина линии. Для радиальных линий /рис. 1а и 1б/ решение /6/ соответственно дает:

$$U(\rho, t) \sim \left(\frac{Z_{\text{ВХ}}}{Z_i + Z_{\text{ВХ}}} \right) \cdot \left[1 - \frac{t}{4T_0 R} \left(\frac{Z_i - Z_{\text{ВХ}}}{Z_i + Z_{\text{ВХ}}} \right) - \frac{t}{8T_0} \frac{R - \rho}{R \cdot \rho} \right]. \quad /7/$$

$$U(\rho, t) \sim \left(\frac{Z_{\text{ВХ}}}{Z_i + Z_{\text{ВХ}}} \right) \left\{ 1 - \frac{at}{4T_0 R(R+a)} \left(\frac{Z_i - Z_{\text{ВХ}}}{Z_i + Z_{\text{ВХ}}} \right) - \frac{t}{8T_0} \left[\frac{R - \rho}{R \cdot \rho} + \frac{R - \rho}{(R+a)(\rho+a)} + \frac{2}{a} \ln \left(\frac{\rho}{R} \frac{R+a}{\rho+a} \right) \right] \right\}. \quad /8/$$

Из выражений /7/ и /8/ видно, что согласование линии с генератором и уменьшение параметра a уменьшают искажение импульса.

Для многозачорных импульсных ускорителей применимы только двойные радиальные линии /ДРЛ/. Каждая ДРЛ /рис.3/ состоит из двух простых радиальных линий /закороченной в центре и незакороченной/, питаемых от общего генератора. Если $Z_i \ll Z_{\text{ВХ}} / Z_{\text{ВХ}}$ - входное сопротивление простой линии/, то влиянием линий друг на друга можно пренебречь и форма импульса напряжения на зазоре будет достаточно точно соответствовать полученным выше переходным характеристикам для простых радиальных линий. Если $Z_i > Z_{\text{ВХ}}$, то на основании проведенных расчетов можно только качественно судить о распространении волн в ДРЛ, так как влияние обеих линий ДРЛ друг на друга будет существенным.

В простой радиальной линии коэффициент отражения на входе для волны, падающей от центра, равен $\frac{Z_i - Z_{\text{ВХ}}}{Z_i + Z_{\text{ВХ}}}$.

В ДРЛ на вход по закороченной и незакороченной линиям одновременно падают две волны. На входе эти волны отражаются и проходят в другую линию. В результате в каждой линии от входа будет распространяться суммарная волна. Можно показать, что в симметричной ДРЛ, у которой закороченная и незакороченная линии одинаковы, сумма коэффициентов отражения и прохождения в течение τ , начиная с момента запитки

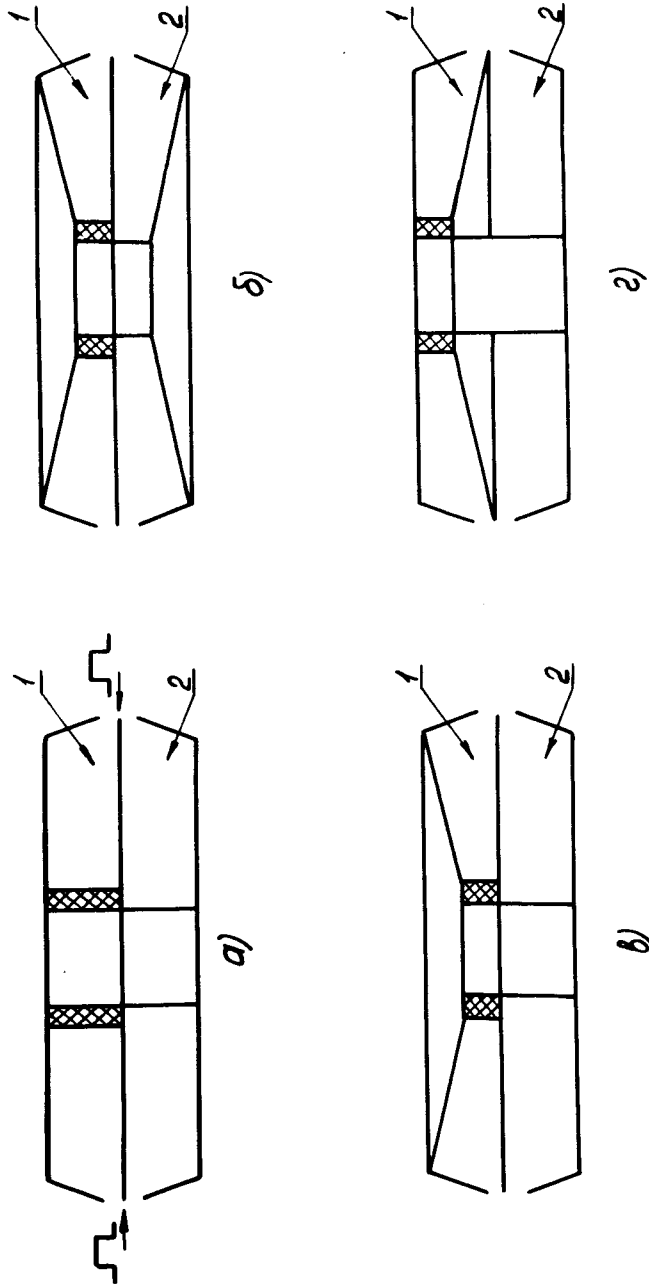


Рис. 3. Двойные радиальные линии. 1 - незакороченная линия, 2 - закороченная линия.

ДРЛ, равна $\frac{2Z_i - Z_{BX}}{2Z_i + Z_{BX}}$. Следовательно, можно подобрать генератор с таким Z_i , что в течение τ переходные характеристики простой радиальной линии и симметричной ДРЛ будут описываться одним и тем же выражением /6/. Для окончательного выбора формы электродов линий надо учитывать и другие требования, предъявляемые к ускоряющим элементам ускорителя. Этими требованиями, как правило, лучше удовлетворяют линии, изображенные на рис. 1б и 3б.

Нами найдено, что дальнейшего улучшения переходных характеристик можно добиться в случае несимметричных ДРЛ /рис. 3в и 3г/, для которых характеристическое сопротивление в закороченной линии с изменением радиуса изменяется сильнее, чем в незакороченной. В такой линии, в отличие от симметричной, на вход падают неодинаковые волны: амплитуда падающей по закороченной линии волны больше, чем амплитуда волны, падающей по незакороченной линии, например, в β раз. Можно показать, что сумма коэффициентов отражения и прохождения в незакороченной линии теперь определится выражением

$$K = \frac{2\beta \cdot Z_i - Z_{BX}}{2Z_i + Z_{BX}} \quad /9/$$

Пусть $\beta = 1 + \delta$. Тогда /9/ можно представить в виде

$$K = \frac{2Z_i - Z_{BX}}{2Z_i + Z_{BX}} + \frac{2\delta \cdot Z_i}{2Z_i + Z_{BX}} \quad /10/$$

Последнее слагаемое в /10/ показывает тот выигрыш в выравнивании переходной характеристики, который имеем в несимметричных ДРЛ по сравнению с симметричными.

Суммарная волна, распространяясь к центру ДРЛ, в свою очередь, внутри линии отражается ко входу, и по

аналогии образуются вторичные и т.д. суммарные волны. В незакороченной линии уже вторая суммарная волна может быть обратной полярности и может уменьшить выравнивание переходной характеристики. Но такое влияние исключено, если рассматривать отражения на радиусах $r < \frac{1}{2}R$. Поэтому вторая половина переходной характеристики выравнивается лучше, чем первая.

Методика и результаты измерений переходных характеристик

Для проверки сделанных в предыдущем параграфе выводов были измерены переходные характеристики нескольких простых и двойных радиальных линий. Для запитки использовался ртутный генератор и 24-канальный размножитель на отрезках кабеля РК-50. Длительность импульса генератора и конструкция размножителя выбирались так, чтобы исключить помехи на входе радиальных линий из-за отражений в кабельном размножителе в течение τ . На выходе любого канала при согласовании фронт импульса равнялся 0,6 нс. На рабочем зазоре радиальных линий сигнал измерялся с помощью высокоомного делителя, для которого выполнялось условие $R \gg Z_{\text{вых}}$, и осциллографов И2-7 или SS-212. Сигнал со входа линии можно было снимать непосредственно кабелем типа РК-75.

Конструкция радиальных линий позволяла менять форму электродов и количество присоединяемых каналов размножителя /от 1 до 24/. Все варианты радиальных линий имели $R = 46$ см, $\rho = 6$ см, расстояние на входе линии между соседними электродами $d = 12$ см. При этих размерах входное сопротивление простой радиальной линии /рис. 1а/ на воздухе $Z_{\text{вх}} \approx 16$ Ом, а при заполнении ее дистиллированной водой - $Z_{\text{вх}} \approx 2$ Ом.

Для сравнения расчетов с экспериментом первая серия измерений была проведена на простых радиальных линиях. Для линии, представленной на рис. 1а, измерения проводились при условиях $Z_i \approx Z_{\text{вх}}$ и $Z_i \ll Z_{\text{вх}}$, для линии, представленной на рис. 1б / $a = 14$ см/, - при $Z_i \ll Z_{\text{вх}}$. Результаты этих измерений показаны на рис. 4.

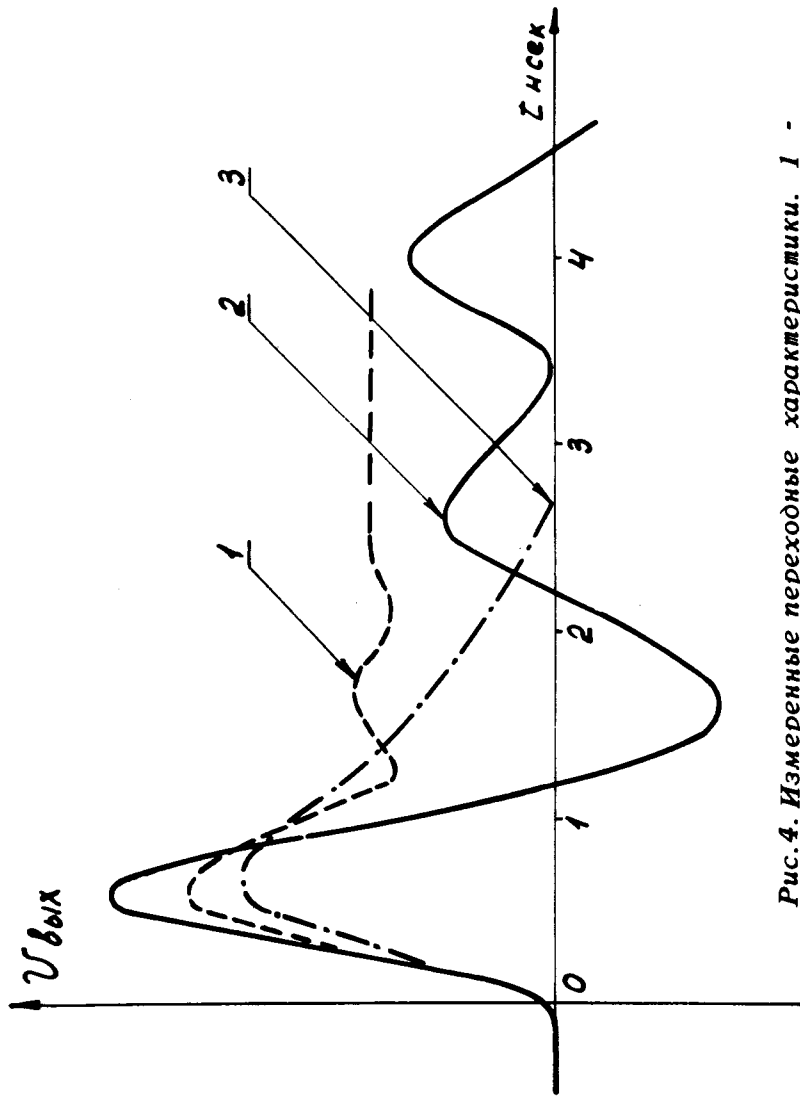


Рис. 4. Измеренные переходные характеристики. 1 - $Z_i \approx Z_{\text{вх}}$ /рис. 1а/, 2 - $Z_i \ll Z_{\text{вх}}$ /рис. 1а/, 3 - $Z_i \ll Z_{\text{вх}}$ /рис. 1б/, $a = 14$ см/.

Видно хорошее согласие результатов измерений с расчетом. Разница объясняется в основном двумя причинами: 1/ Z_1 генератора не равно нулю и 2/ фронт импульса генератора на входе радиальной линии увеличивается до 1,2 нс. Последнее существенно сказывается на уменьшении коэффициента трансформации N .

Вторая серия измерений была проведена для ДРЛ, заполненных дистиллированной водой. ДРЛ запитывалась в 1, 2, 4 и 24 точках. Результаты измерений представлены соответственно на рис. 5. Из этих осциллограмм видно, что с помощью конического электрода можно выровнять переходную характеристику ДРЛ почти до прямоугольной. Как и ожидалось, лучшие результаты /большая амплитуда и небольшие искажения вершины импульса/ были получены для несимметричной ДРЛ, представленной на рис. 3г. При запитке ДРЛ в нескольких точках коэффициент трансформации оказывался меньше теоретического $N = \sqrt{\frac{Z_{\text{ВЫК}}}{Z_{\text{ВХ}}}}$, приближаясь к нему с увеличением точек запитки. Например, для ДРЛ, представленной на рис. 3а, при запитке в одной точке $N \approx 1$, а при запитке в 24 точках $N \approx 3,4$ /расчетный коэффициент $N \approx 5,5$ /. Оказалось, что несимметричное расположение точек подключения генераторов мало влияет на форму переходных характеристик.

Заключение

В результате теоретического изучения переходных характеристик были выявлены особенности распространения простой Е-волны в радиальных линиях различных типов, что послужило основой для выбора необходимой конфигурации ДРЛ с целью использования их в многозазорных импульсных ускорителях. Измерения на стенде подтвердили правильность выводов, сделанных на основании расчетов, и показали, что с помощью несимметричной ДРЛ, представленной на рис. 3г, при запитке ее в двух точках можно сформировать на зазоре для ускорения кольцевых электронных сгустков импульсное

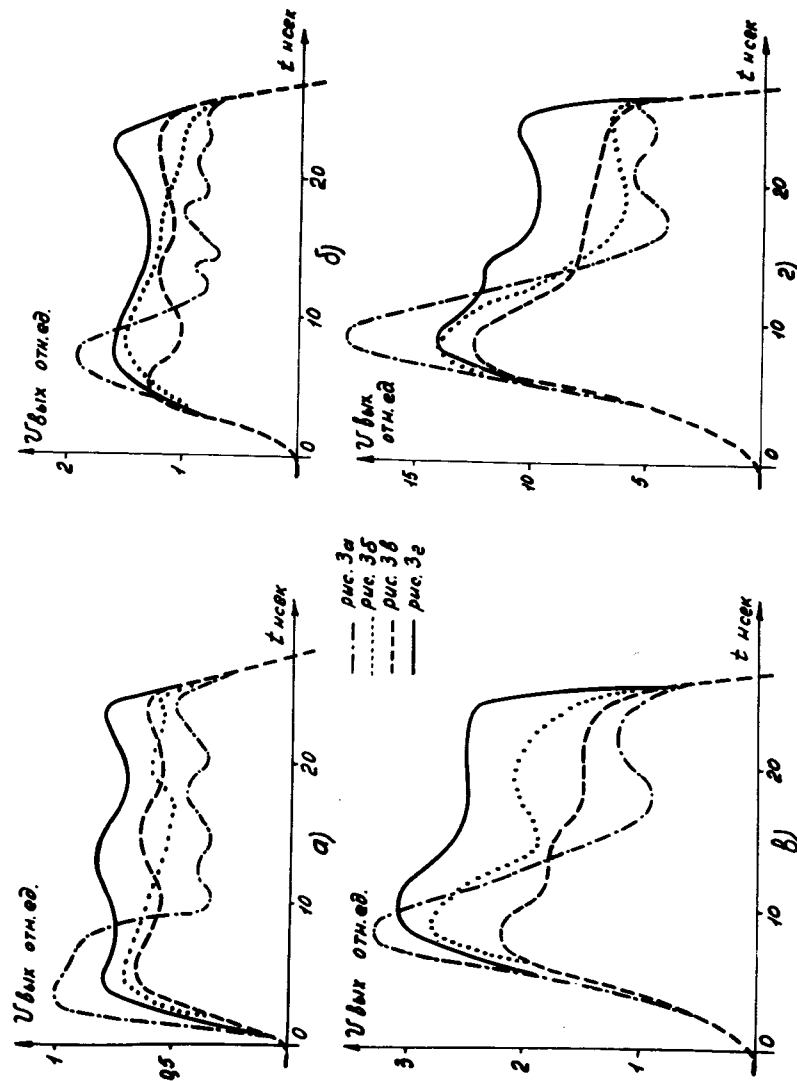


Рис. 5. Импульсное напряжение на зазоре ДРЛ при запитке в одной /а/, двух /б/, четырех /в/ и двадцати четырех точках /г/.

электрическое поле длительностью $0,9\tau$, неравномерное в пределах $\pm 10\%$, с коэффициентом трансформации $N \approx 2$. При запитке ДРЛ в четырех точках можно сформировать импульсное поле той же длительности и степени однородности с $N \approx 3,3$.

В заключение авторы благодарят М.В.Бабыкина за полезные советы, Н.Б.Рубина и В.П.Саранцева за участие в обсуждении результатов и Г.И.Коннова за помощь при проведении измерений.

Литература

1. Г.Валлис и др. УФН, 113, 435 /1974/.
2. B.Bernstein, I.Smith. IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-20, 294 (1973).
3. E.S.Hartwig. Symposium on Electron Ring Accelerators, Berkeley, 44 (1968).
4. С.Рамо, Дж.Уиннери. Поля и волны в современной радиотехнике. ОГИЗ, М., 1948.
5. М.С.Нейман. Обобщение теории цепей на волноводные системы. Госэнергоиздат, М., 1956.
6. А.А.Самарский. Введение в теорию разностных схем. Изд. "Наука", М., 1971.
7. E.R.Shatz, E.M.Williams. Proceedings of the IRE, 39, 1208 (1950).
8. И.Льюис, Ф.Уэлс. Миллимикросекундная импульсная техника. ИЛ., М., 1956.

Рукопись поступила в издательский отдел
28 февраля 1975 года.