

**сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна**

2522/83

16/5-83
9-83-78

**Г.В.Долбилов, А.К.Красных,
В.Н.Разувакин, Р.Халлер**

**ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ
НЕЛИНЕЙНЫХ ЛИНИЙ**

1983

1. ВВЕДЕНИЕ

Как известно, см., например ^{1/1}, для увеличения крутизны исходного перепада мощности в импульсной системе СИЛУНД-1 используются нелинейные линии /НЛ/ передачи. Увеличение крутизны основано на эффекте образования ударной электромагнитной волны /УЭВ/ из простой при распределении последней по НЛ. Этот эффект использовался и при создании генератора, запитывающего корректирующие пластины ^{1/2/}.

Известно также, что в сочетании с линейными участками НЛ могут проявлять и своеобразные ключевые свойства, используемые при формировании импульсов наносекундной длительности. Это свойство использовалось, например, при создании генераторов, описанных в работах ^{3, 4/}.

Изменение мощности в нагрузке обычно достигается изменением уровня зарядного напряжения на накопительной емкости. В общем случае электротехнические параметры НЛ зависят от уровня мощности, передаваемой через них. Ниже будет приведена область изменений параметров НЛ в зависимости от амплитуды действующего напряжения в диапазоне мощности /20 ÷ 200/ МВт.

2. МЕТОДИКА И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Электротехнические параметры НЛ /волновое сопротивление, скорость распространения/ связаны между собой через эффективную магнитную проницаемость μ_y на фронте ударной электромагнитной волны. Методика определения этих параметров заимствована из работы ^{5/}.

На рис. 1 показана основная схема для исследования нелинейных линий. Она позволяет получить почти все интересующие нас зависимости. Работа схемы происходит следующим образом. Задающий генератор 1 формирует стартовые импульсы для двух ключей K_1 и K_2 . При срабатывании K_2 заряженная до напряжения U_p емкость C_2 начинает колебательный разряд через D_p и L_2 . Период собствен-

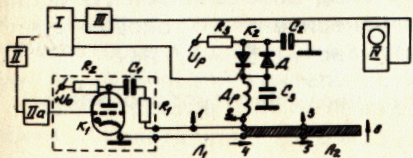


Рис. 1. Принципиальная схема с применением тиратрона ТГИ-2500/50.

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
БИБЛИОТЕКА

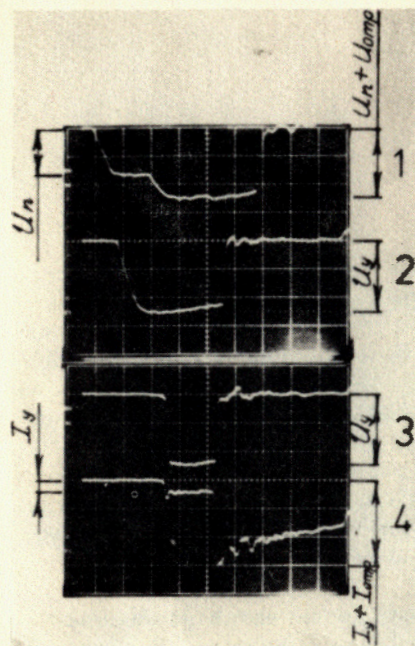


Рис.2. Типичные осциллограммы, снятые в некоторых точках схемы. Развертка по горизонтали 100 нс/см.

ных колебаний этого контура много больше, чем характерные времена процессов в "быстром" генераторе $/K_1, C_1 \text{ и } R_1/$. Амплитудой тока "медленного" генератора $/K_2, C_2, D_2, D_p/$ задается рабочая точка на петле гистерезиса ферромагнетика линии L_2 . Импульс второго канала задающего генератора I, пройдя регулируемую линию задержки II и формирователь стартового импульса Па, попадает на сетку тиратрона $K_1 /TGI1-2500/50/$. Заряженная до напряжения U_0 емкость C_1 разряжается на последовательно включенные ограничивающее ток сопротивление R_1 и фидер длинной линии L_1 с волновым сопротивлением ρ . Постоян-

ная времени разряда емкости была много больше характерных времен распространения импульсов по L_1 и L_2 . Скорость нарастания напряжения и тока в фидере L_1 определялась физическими процессами в K_1 и конструктивным выполнением "быстрого" генератора. Минимальная длительность фронта для указанного типа тиратрона составляла $/70-80/$ нс. Электромагнитная волна, распространяясь по линейному фидеру L_1 , через определенное время падает на исследуемую нелинейную линию L_2 .

На известном расстоянии от генератора в линейном фидере устанавливается датчик 1, фиксирующий амплитуду падающей простой волны, а также через определенное время реакцию на подсоединение участка нелинейной линии L_2 . Датчики 2 и 4 контролируют соответственно напряжение и ток на входе нелинейной линии. Прошедшую в L_2 ударную волну фиксируют датчики напряжения 3 и тока 5. Датчик 6 фиксирует отраженный от короткого замыкания /к.з./ ток. В принципе, через определенное время все датчики будут регистрировать переотраженные от стыков волны. Сигналы с датчиков по кабелям одинаковой длины подавались на вход широкополосного осциллографа IV. Переходная характеристика измерительных токовых шунтов и делителей напряжения составляла около $/1,5 \div 2/$ нс.

На рис.2 приведены типичные осциллограммы, зарегистрированные в некоторых точках схемы.

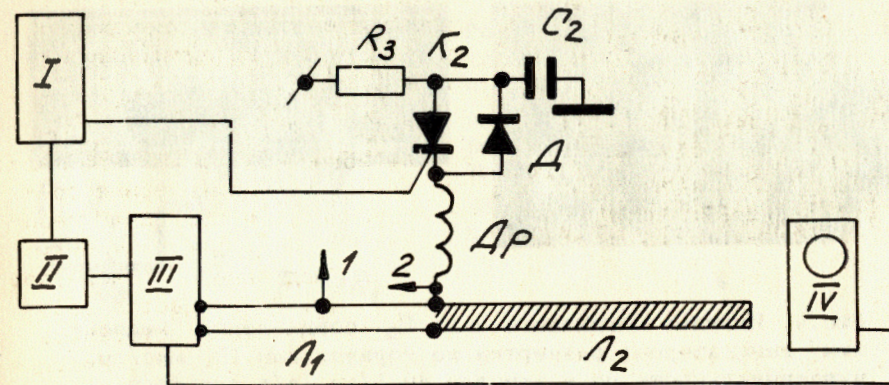


Рис.3. Принципиальная схема исследования с применением генератора на ртутном реле: I - задающий генератор; II - блок задержки с усилителем-формирователем; III - наносекундный генератор на ртутном реле; IV - осциллограф. Элементы K_2, D_p, C_2, D и R_3 образуют "медленный" генератор, задающий рабочую точку в ферритах линии L_2, L_1 - линейный фидер.

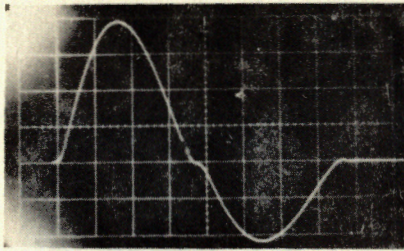
На осциллограмме 1 - сигнал, регистрируемый датчиком 1. Отчетливо видна вначале амплитуда падающей волны U_n . Спустя 200 нс датчик фиксирует и отраженную от НЛ волну $U_n + U_{отр}$. Через 600 нс этот датчик регистрирует сигнал, по которому можно судить о том, что на конце линии L_2 короткозамкнута.

Осциллограммы 2 и 3 иллюстрируют форму импульса на входе /датчик 2/ и в центре /датчик 3/ исследуемой линии. Видно, что $U_y = U_n + U_{отр}$, наблюдается также деформация исходного фронта в НЛ. На осциллограмме 4 показан импульс тока, регистрируемый датчиком 5. В начале видна амплитуда тока ударной волны I_y , а спустя 140 нс - суммарная амплитуда падающего ударного и отраженного $I_y + I_{отр}$ от к.з. тока.

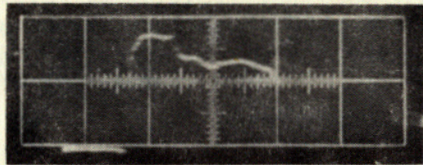
Входное сопротивление НЛ определялось путем непосредственного измерения напряжения U_y тока I_y в центре НЛ /см. осциллограммы 3 и 4/. Точность измерения около 20%. Путем регистрации временной задержки появления сигналов на известной длине вычислялась скорость v распространения электромагнитной волны в НЛ. Точность измерения скорости распространения 10%.

Если направление начального магнитного поля в исследуемой НЛ совпадает с направлением магнитного поля, создаваемого "быстрым" генератором, то измерение ее параметров затруднено из-за сравнительно большой длительности фронта исходного перепада мощности.

Для исследования параметров линий в этом режиме использовалась схема, приведенная на рис.3. В качестве исходного перепада ис-



а



б

Рис.4. Импульс магнитного поля H_p , создаваемый "медленным" генератором; развертка по горизонтали 100 мкс/см, чувствительность по вертикали 80 А/см /а/; сигнал в точке 1 /рис.3/, развертка по горизонтали 10 нс/см /б/.

пользовался импульс, формируемый генератором со ртутным реле. Длительность фронта генератора около 0,6 нс, что на два порядка меньше, чем в генераторе, показанном на рис.1. Работа этой схемы не отличается от вышеописанной. Следует отметить, что при исследовании линии с помощью этой схемы из-за малости величины амплитуды магнитного поля "быстрого" генератора /~ 10 А/см/ ответственность за ход зависимостей несет спинка предельной квазистатической петли гистерезиса ферритов. Целью этих экспериментов было определение величины магнитного поля насыщения H_s и зависимости волнового сопротивления НЛ вблизи H_s от уровня магнитного поля H . Изменение величины волнового сопротивления зависит от изменения величины остаточной намагниченности в ферритах. На рис.4 приведены осциллограммы, иллюстрирующие процессы в схеме. На рис.4а - форма тока "медленного" генератора. Магнитное поле, создаваемое им в линии, могло регулироваться от /0 ÷ 320/ А/см. Осциллограмма на рис.4б /датчик 1/ показывает реакцию на подключение НЛ. По коэффициенту отражения вычислялось волновое сопротивление НЛ. Точность измерения около 20%.

Как показали исследования НЛ, для исключения возможных ошибок при анализе осциллограмм по вышеприведенным схемам целесообразно экспериментально определять и погонную емкость линии. Схема, по которой она определялась, приведена на рис.5.

Экспериментально проверено, что емкость линии с ферритами остается постоянной при изменении уровня зарядного напряжения U_0 в широком диапазоне /15-6000/ В. Таким образом, диэлектрическая проницаемость ферритов ϵ_f практически не зависит от напряженности электрического поля. Емкость линии с ферритами оставалась неизменной и при изменении постоянной времени разряда в диапазоне /0,2-10 000/ мкс. Для ферритов марок 600 НН, 400 НН, 100 НН и 0,7 ВТ $\epsilon_f = 7 \pm 10$.

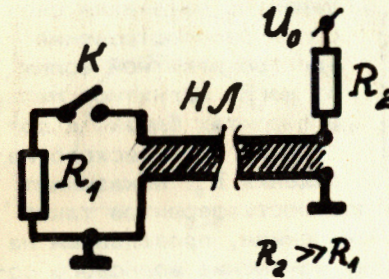


Рис.5. Принципиальная схема для определения погонной емкости нелинейной линии: К - ключевой элемент /реле, тиристор, тиратрон/; НЛ - исследуемая линия; $R_1 \ll R_2$ - эталонное сопротивление; R_2 - сопротивление, ограничивающее ток заряда линии.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ АНАЛИЗ

Исследовались несколько вариантов линий, конструкция которых приведена на рис.6. В таблице представлены размеры исследуемых линий, диэлектрическая проницаемость жидкого заполнителя, характерные диапазоны относительной величины $k = \sqrt{\frac{\mu_{\text{п}}}{\mu_{\text{отр.}}}}$, где $\mu_{\text{п}}$ и $\mu_{\text{отр.}}$ - эффективные магнитные проницаемости соответственно для падающей и отраженной волн, а также скорости распространения v в режиме, когда энергией падающей волны ферриты переводятся из начального состояния ($-B_H$) в состояние насыщения B_s . Знание величины этих параметров необходимо для рационального использования ключевых свойств нелинейных линий. Очевидно, что чем больше величина k , тем более явно эти ключевые свойства выражены. Параметры k и v , приведенные в таблице, характерны в диапазоне напряжений /10 ÷ 40/ кВ.

Минимальным волновым сопротивлением ρ_0 обладал первый вариант линии /см. таблицу/. На рис.7 приведена зависимость волнового сопротивления от амплитуды напряжения для этой линии. Из рисунка видно, что при $U \geq 22$ кВ сопротивление практически не изменяется

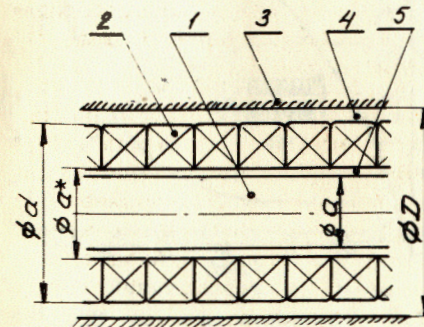


Рис.6. Конструктивное выполнение нелинейных линий: D, а - соответственно внутренний диаметр трубы 3 и диаметр центрального стержня 1; d, а* - наружный и внутренний диаметры ферритовых колец 2; 4 - жидкий диэлектрик, заполняющий пространство между кольцами и трубой; 5 - технологический зазор /0,3 ÷ 0,2/ мм.

Таблица

N	D × d × a мм	ε _d	Марка феррита	$\langle v \rangle$ см/нс	k
1	18 × 10 × 6	4,5	400НН	0,5 ÷ 1,5	3 ÷ 7
2	44 × 10 × 6				
3	44 × 38 × 24	2,2	600НН		
4	44 × 40 × 25				

/см. рис.8/, что диэлектрическая проницаемость ферритов также остается постоянной и соответствует измерениям, проведенным на низких уровнях мощности. Таким образом, изменение волнового сопротивления и, соответственно, скорости распространения зависит только от величины диэлектрической проницаемости.

На рис.9 приведена зависимость величины k от амплитуды напряжения в НЛ. Видно, что максимальная величина k определяется напряжением в линии, величина которого соответствует практическому переводу ферритов в В_с.

Для третьего и четвертого варианта линий /см. таблицу/ экспериментально не достигнута величина волнового сопротивления линии, соответствующая расчетной, когда ферриты находятся в замагниченном состоянии. Этот факт объясняется тем, что при заданном диапазоне напряжений на входе НЛ с увеличением типоразмера ферритовых колец уменьшается действующее магнитное поле. Величина остаточной магнитной проницаемости существенна, она не позволяла достичь расчетной величины волнового сопротивления ρ₀.

На рис.10 и рис.11 показаны зависимости ρ₀√μ и v₀√μ от напряженности магнитного поля (H) в НЛ. На рисунках приведена и геометрия исследуемых линий. Видно, что для ферритов марок 600 НН и 0,7 ВТ величина H_с соответствует 200 А/см. Зависимости иллюстрируют также количественное изменение волнового сопротивления /скорости распространения/ вблизи H_с. Изоляция этих линий рассчитана на напряжение не более 30 кВ,

и составляет около 20 Ом. Характер изменения скорости распространения электромагнитной волны v, когда магнитное поле в ферритах близко к состоянию технического насыщения H_с, показывает

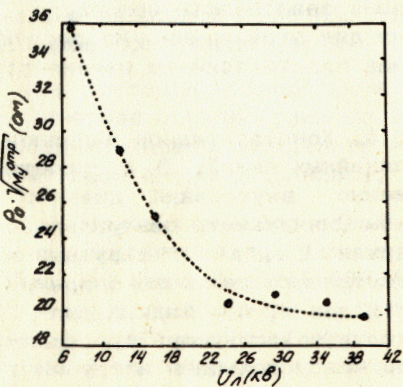


Рис.7. Зависимость ρ₀ от U_л.

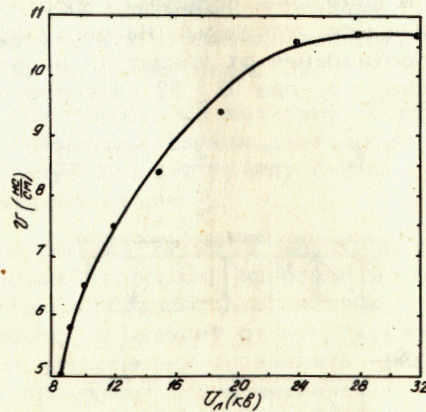


Рис.8. Зависимость v от U_л.

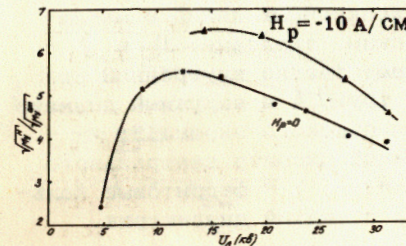


Рис.9. Зависимость k от U_л при разных H_р.

Анализ НЛ показывает, что первый вариант линии позволяет передать около 80 МВт импульсной мощности. Заполнение линии глицерином позволило бы уменьшить величину ρ₀ примерно в 1,5 раза. Однако этот путь увеличения передаваемой мощности связан с некоторым ухудшением дисперсионной характеристики НЛ.

С целью увеличения пропускаемой через НЛ мощности можно искусственно "выносить" электрическое поле из ферритового материала как наиболее слабого диэлектрика. Экспериментально исследованы два варианта таких линий. Их геометрия показана соответственно на рис.12 и рис.13. В первом варианте каждое четвертое кольцо помещалось в незамкнутый металлический экран. Во втором варианте три поверхности каждого кольца покрывались тонким слоем меди. Для исключения электрического контакта между соседними кольцами прокладывались шайбы из полиэтилена. Волновое сопротивление этих линий составляет соответственно 10 и 6 Ом в режиме, когда ферриты находятся в замагниченном состоянии. Предельная мощность, передаваемая через линии, составляет около 200 МВт. Эксперименты показали, что и в этом случае величина k не превышает 7 ÷ 8.

На рис.14 приведена зависимость k = f(U_л) для второго варианта линии. Для этих линий характерно, что величина k сравнительно слабо зависит от уровня напряжения в широком диапазоне амплитуд напряжений. Средняя скорость v ударной электромагнитной волны, переводящей ферриты из -В_н в В_с, составляет также 10,6 ± 0,9 см/нс. На рис.15 приведена зависимость этой скорости распространения от напряжения для второго варианта НЛ. Виден пропорциональный рост скорости с увеличением напряжения.

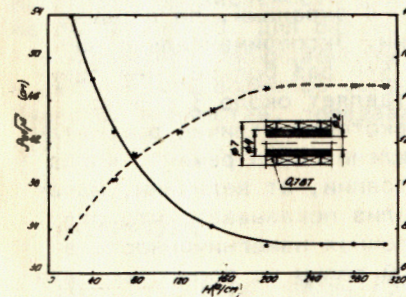


Рис.10. Зависимость ρ₀ и v₀ от H для 0,7 ВТ.

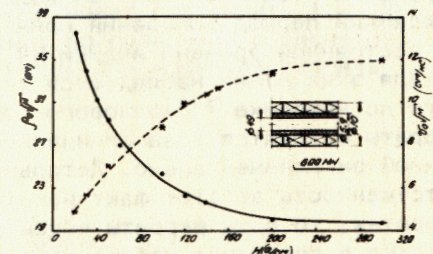


Рис.11. Зависимость ρ₀ и v₀ от H для 600 НН.

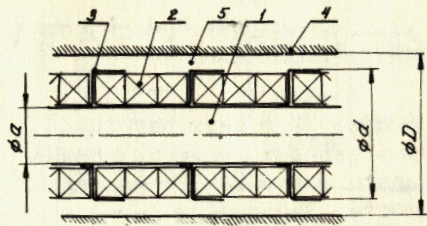
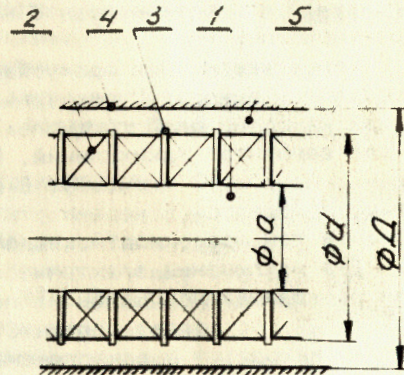


Рис.12. Конструктивное выполнение нелинейных линий с металлическими экранами: D и d - соответственно внутренний диаметр трубы и наружный диаметр металлического экрана 3; a - наружный диаметр центрального стержня 1; 2 - ферритовые кольца; 5 - жидкий диэлектрик.

Рис.13. Конструктивное выполнение нелинейной линии с ферритовыми кольцами; D = 44 мм - внутренний диаметр трубы; d = 40 мм - наружный диаметр колец; a = 24,5 мм - диаметр центрального стержня; 1 - латунный стержень; 2 - ферритовые кольца, три поверхности которых покрыты тонким слоем меди; 3 - шайба из полиэтилена толщиной 0,5 мм; 4 - труба; 5 - каусторовое масло.



Значительное уменьшение волнового сопротивления достигнуто с помощью введения в конструкцию экранов, находящихся под потенциалом внутреннего стержня [8]. Геометрии, подобные рассмотренным, являются как бы промежуточными между коаксиальными и искусственными линиями. Известно, что длительность фронта в последних ограничена постоянной времени ячейки τ_0 . Если длительность фронта t_f будет меньше τ_0 , то амплитуда волны будет содержать высокочастотные колебания. Этот факт иллюстрируется осциллограммой, приведенной на рис.16. Нижний луч - ток в к.з. части НЛ, верхний - ток в центре линии с экранами. На вершине отраженный ток "изрезан" ВЧ колебаниями. Экспериментально наблюдаемый период колебаний примерно в 5-6 раз больше, чем оценка постоянной времени ячейки НЛ, и составляет около 3 ÷ 5 нс.

Для этих линий наблюдается также некоторое отличие рассчитанного по методике [7] волнового сопротивления НЛ в режиме, когда ферриты находятся в намагниченном состоянии, от величины, измеренной экспериментально. Детальный анализ показывает, что ответственность за этот факт несет остаточная намагниченность в ферритах, то есть ферриты полем ударной волны не полностью переводятся в состояние насыщения. Величина остаточной магнитной проницаемости на спинке кривой намагничивания может составлять

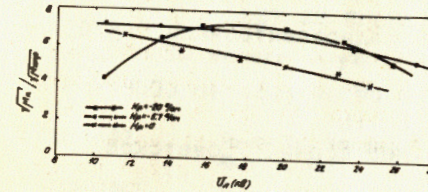


Рис.14. Зависимость $k = f(U_d)$.

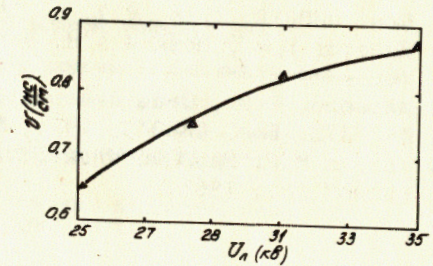


Рис.15. Зависимость v от U_d .

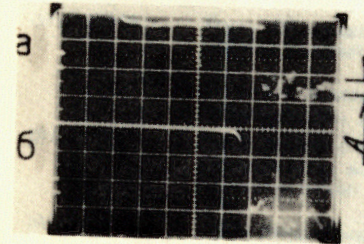


Рис.16. Осциллограммы тока в линии с ферритовыми кольцами: а/ ток в центре линии; б/ ток в к.з. части линии. Развертка по горизонтали 50 нс/см. А - амплитуда ВЧ составляющей.

$\mu^{ост.} = 1,4 \div 2,5$ в зависимости от марки феррита и величины исходного перепада мощности. Этот факт необходимо учитывать при сочленении нелинейных участков с линейными.

ВЫВОДЫ

Для нескольких вариантов НЛ определен диапазон изменений электротехнических параметров в зависимости от уровня напряжений в них. Из анализа зависимостей следует, что величина отношения магнитной проницаемости для падающей и отраженной ударных волн не превышает 50. Для рассмотренных НЛ характерно наличие остаточной магнитной проницаемости, которая может составлять 1,4 ÷ 2,5 и увеличивать волновое сопротивление по сравнению с расчетом. Диапазон мощностей, передаваемых через НЛ, может составлять /20 ÷ 200/ мВт.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гитт В.Д. и др. ОИЯИ, Р9-5601, Дубна, 1971.
2. Долбилов Г.В. и др. В кн.: II Симпозиум по коллективным методам ускорения. ОИЯИ, 9-10500, Дубна, 1976, с.57.
3. Катаев И.Г. и др. ПТЭ, 1976, №3, с.145.

4. Катаев И.Г. и др. Авторское свидетельство СССР №508914. Бюл. ОИПОТЗ, 1976, №12, с. 150.
5. Липатов Н.Ф., Мешков А.Н. Вопросы радиоэлектроники, 1970, №6, вып. 5.
6. Харьюзов Р.В., Швец В.А. Авторское свидетельство СССР №539372. Бюл. ОИПОТЗ, 1976, №46, с. 164.
7. Катаев И.Г. Ударные электромагнитные волны. "Советское радио", М., 1963.

Рукопись поступила в издательский отдел
9 февраля 1983 года.

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

ДЗ-11787	Труды III Международной школы по нейтронной физике. Алушта, 1978.	3 р. 00 к.
Д13-11807	Труды III Международного совещания по пропорциональным и дрейфовым камерам. Дубна, 1978.	6 р. 00 к.
	Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1978 /2 тома/	7 р. 40 к.
Д1,2-12036	Труды V Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1978	5 р. 00 к.
Д1,2-12450	Труды XII Международной школы молодых ученых по физике высоких энергий. Приморско, НРБ, 1978.	3 р. 00 к.
	Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1980 /2 тома/	8 р. 00 к.
Д11-80-13	Труды рабочего совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике, Дубна, 1979	3 р. 50 к.
Д4-80-271	Труды Международной конференции по проблемам нескольких тел в ядерной физике. Дубна, 1979.	3 р. 00 к.
Д4-80-385	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1980.	5 р. 00 к.
Д2-81-543	Труды VI Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1981	2 р. 50 к.
Д10,11-81-622	Труды Международного совещания по проблемам математического моделирования в ядерно-физических исследованиях. Дубна, 1980	2 р. 50 к.
Д1,2-81-728	Труды VI Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 60 к.
Д17-81-758	Труды II Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1981.	5 р. 40 к.
Д1,2-82-27	Труды Международного симпозиума по поляризационным явлениям в физике высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 20 к.
Р18-82-117	Труды IV совещания по использованию новых ядерно-физических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач. Дубна, 1981.	3 р. 80 к.
Д2-82-568	Труды совещания по исследованиям в области релятивистской ядерной физики. Дубна, 1982.	1 р. 75 к.
Д9-82-664	Труды совещания по коллективным методам ускорения. Дубна, 1982.	3 р. 30 к.
ДЗ,4-82-704	Труды IV Международной школы по нейтронной физике. Дубна, 1982.	5 р. 00 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:
101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79
Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

**ТЕМАТИЧЕСКИЕ КАТЕГОРИИ ПУБЛИКАЦИЙ
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ**

Индекс	Тематика
1.	Экспериментальная физика высоких энергий
2.	Теоретическая физика высоких энергий
3.	Экспериментальная нейтронная физика
4.	Теоретическая физика низких энергий
5.	Математика
6.	Ядерная спектроскопия и радиохимия
7.	Физика тяжелых ионов
8.	Криогеника
9.	Ускорители
10.	Автоматизация обработки экспериментальных данных
11.	Вычислительная математика и техника
12.	Химия
13.	Техника физического эксперимента
14.	Исследования твердых тел и жидкостей ядерными методами
15.	Экспериментальная физика ядерных реакций при низких энергиях
16.	Дозиметрия и физика защиты
17.	Теория конденсированного состояния
18.	Использование результатов и методов фундаментальных физических исследований в смежных областях науки и техники
19.	Биофизика

Долбилов Г.В. и др.
Исследование свойств нелинейных линий

9-83-78

Описано несколько конструкций нелинейных линий в диапазоне мощности /20-200/ МВт, которые могут применяться в сильноточных линейных индукционных ускорителях наносекундного диапазона. Путем регистрации сигналов в фиксированных точках определены характерные времена распространения для падающего и отраженного перепада мощности. Исследованы диапазоны изменения волновых сопротивлений и скоростей распространения перепадов мощностей в зависимости от величины действующего напряжения или поля. Полученные результаты позволяют более правильно выбирать параметры модулятора для линейного индукционного ускорителя /ЛИУ/, содержащего нелинейные линии передачи.

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1983

Dolbilov G.V. et al.
Investigation of Nonlinear Line Properties

9-83-78

A few constructions of nonlinear lines at the level of power (20-200) MW, that can be used in high-current linear inductive accelerators of nanosecond range are described. The ranges of the wave resistance changes and the velocities of propagation of power drops in dependence on the value of the pulse voltage or field were investigated. The characteristic times of propagation for an incident and reflected power drop have been obtained by registering signals in the fixed points of the lines. The obtained results allow one to select more correctly the modulator parameters of LINAC containing nonlinear lines of power transfer.

The investigation has been performed at the Department of New Methods of Acceleration, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1983

Перевод О.С.Виноградовой.