

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА**

13-86-638

А.А.Фатеев

**УСИЛЕНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ МОЩНОСТИ  
В НЕЛИНЕЙНЫХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ЛИНИЯХ**

Направлено в журнал "Приборы и техника  
эксперимента"

**1986**

Явление образования ударных электромагнитных волн в нелинейных ферромагнитных линиях  $\sqrt{I}$  может использоваться не только для формирования коротких ( $\sim 10^{-9}$  с) перепадов тока и напряжения, но и для усиления импульсной мощности. В случаях, когда относительная эффективная магнитная проницаемость на фронте ударной волны  $\mu_y \gg 1$ , скорость распространения фронта в  $\sqrt{\mu_y}$  раз меньше скорости волны в замагниченной линии, и зарядка линии происходит за время большее, чем разрядка ее на нагрузку. Таким образом, фронт ударной волны действует подобно обычному коммутатору. Эта аналогия становится более полной по отношению к короткозамкнутым нелинейным линиям, которые используются в различных импульсных схемах <sup>1,2,3/</sup>.

В данной работе определены значения максимальных коэффициентов усиления мощности, условия их получения, а также даны рекомендации по выбору оптимальных волновых сопротивлений линий.

На фронте ударной электромагнитной волны напряжение  $V_y$  и ток  $I_y$  связаны соотношением  $\sqrt{I}$

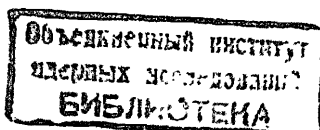
$$V_y = I_y \rho_0 \sqrt{\mu_y}, \quad (1)$$

где  $\rho_0$  - волновое сопротивление линии в насыщенном состоянии.

Эффективная магнитная проницаемость  $\mu_y$  зависит от конструкции линии и от амплитуды перемагничивающего поля:

$$\mu_y = 1 + \frac{K \Delta M}{H_y}, \quad (2)$$

где  $\Delta M$ , А/М - изменение намагниченности феррита;  $H_y$ , А/М - средняя напряженность магнитного поля в феррите непосредственно за



фронтом ударной волны;  $K$  - коэффициент, характеризующий степень заполнения линии ферритом. Для коаксиальных линий можно считать  $K \approx S_f/S_0$ , где  $S_0$  и  $S_f$  - соответственно площади общего сечения и сечения феррита в линии. Коэффициент передачи мощности ударной волны  $P_y = V_y I_y$  в активную нагрузку можно записать следующим образом

$$K_p = P_H/P_y = \frac{S_0 \sqrt{M_y'}}{R_H} \left( \frac{1 + \sqrt{M_{отр}}/\sqrt{M_y'}}{1 + S_0 \sqrt{M_{отр}}/R_H} \right)^2, \quad (3)$$

где  $M_{отр}$  - эффективная магнитная проницаемость для отраженной от нагрузки волны.

Выражение (3) имеет максимум при  $R_H = S_0 \sqrt{M_{отр}}$ , равный

$$K_p^M = \frac{\mathcal{L}(1+1/\mathcal{L})^2}{4}, \quad (4)$$

где  $\mathcal{L} = \sqrt{M_y'}/\sqrt{M_{отр}}$ .

Из (4) видно, что  $K_p^M$  - монотонно растущая функция от  $\mathcal{L}$ , а поскольку в пределе очень малых или очень больших  $H_y$   $\mathcal{L}$  стремится к 1, то заведомо существует область полей  $H_y$ , в которых  $K_p^M$  максимален.

Для экспериментального определения области оптимальных полей  $H_y$  использовалась схема рис.1. Коммутатором служил тиратрон ТТИ-2500/50. Фиксировались напряжение  $V_{вх}$  и ток  $I_{вх}$  на входе в линию, а также напряжение  $V_H$  на нагрузке  $R_H$ . Постоянная нарастания для делителей и пояса Роговского вместе с измерительными кабелями не превышала  $\sim 3$  нс, осциллографа  $\sim 0,5$  нс. Длительность фронта входного импульса несколько менялась в зависимости от входного сопротивления линии, но не превышала 75 нс. Нелинейные линии выполнены в виде коаксиалов длиной 0,75 м, заполненных ферритовыми кольцами марки 600 НН М 40х25х6 и жидким диэлектриком. Волновое сопротивление  $S_0$  линий менялось за счет диэлектрика (масло, глицерин) и за счет введения дополнительных диафрагм, т.е. за счет изменения погонной емкости. В экспериментах использовались линии с  $S_0 = 16, 10, 7$  Ом, причем коэффициент заполнения линий ферритом  $K \approx 0,8$  для всех трех линий. Для выбора оптимальной рабочей точки на петле гистерезиса феррита линии подмагничивались двуполярным импульсом тока от блока размагничивания (БР, на рис.1). Регулировка осуществлялась изменением момента запуска БР относительно запуска тиратрона. Начальное состояние намагниченности выбиралось  $M_H \approx -M_z$  ( $M_z$  - остаточная намагничен-

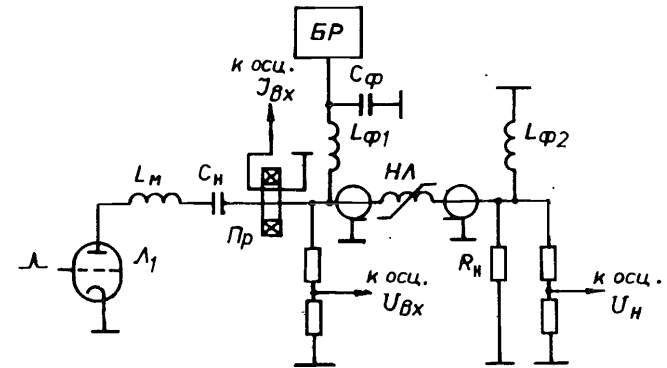


Рис.1. Схема экспериментальной установки:

$L_M$  - паразитная индуктивность соединений,  
 $\Pi_P$  - пояс Роговского, НЛ - нелинейная линия,  
 $L_{\Phi 1,2}$  - защитные дроссели, БР - блок размагничивания.

ность при перемагничивании по полной петле), поскольку при  $M_H > -M_z$  уменьшается  $\Delta M$ , а при  $M_H < -M_z$  возникают нежелательные предимпульсы на нагрузке.

В экспериментах изменялись сопротивление нагрузки нелинейных линий, амплитуда входного напряжения (и соответственно тока) и по измеренным величинам вычислялись:

$$\sqrt{M_y'} = V_y/I_y S_0; \quad V_{отр} = V_H - V_y; \quad I_{отр} = I_H - I_y,$$

$$\sqrt{M_{отр}} = -V_{отр}/I_{отр} S_0; \quad \mathcal{L} = \sqrt{M_y'}/\sqrt{M_{отр}}; \quad P_H = V_H^2/R_H;$$

$$P_y = V_y I_y, \quad K_p = P_H/P_y,$$

причем в качестве  $V_y$  и  $I_y$  принимались значения соответственно  $V_{вх}$  и  $I_{вх}$  в момент появления импульса на нагрузке.

На рис.2 представлены графики зависимостей  $\sqrt{M_y'}$  (1),  $\sqrt{M_{отр}}$  (2) и  $\mathcal{L}$  (3) от амплитуды магнитного поля ударной волны (при вычислении  $H_y$  средний радиус ферритовых колец полагался  $r_{ср} \approx 1,6$  см). Зависимость  $\sqrt{M_y'}$  от  $H_y$  хорошо совпадает с вычисленной при помощи формулы (2), если положить  $\Delta M \approx 3,6 \cdot 10^5$  А/м.

Из рис.2 видно, что  $M_{отр}$  несущественно отличается от 1 в области полей  $H_y > 16$  кА/м, а в области  $H_y < 8$  кА/м  $M_{отр}$  начинает резко расти с уменьшением  $H_y$ , что нужно учитывать в расчетах.

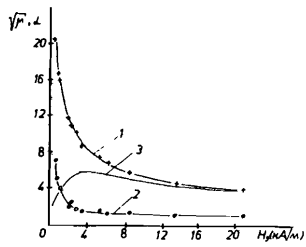


Рис.2. Зависимости  $\sqrt{M_0}$  (1),  $\sqrt{M_{отр}}$  (2),  $d = \sqrt{M_0} / \sqrt{M_{отр}}$  (3) от амплитуды ударной волны.

Поскольку  $M_{отр}$  зависит не только от  $H_y$ , но и от сопротивления нагрузки, следует отметить, каким образом выбирались  $M_{отр}$  для графика на рис.2. По мощностным нагрузочным характеристикам  $R_H$  ( $R_H$ ) определялось сопротивление нагрузки, при котором достигается максимум, и для этой точки вычислялось  $\sqrt{M_{отр}}$ . С хорошей точностью выбранные  $R_H$  совпадали с  $\rho_0 \sqrt{M_{отр}}$ .

Из графика  $d(H_y)$  видно, что максимального значения ( $\approx 5,8$ )  $d$  достигает при  $H_y \approx 50$  Э. При этом максимальный коэффициент усиления мощности в соответствии с (4) должен составлять  $K_p^M \approx 2$ . На рис.3 показан график зависимости  $K_p^M(H_y)$ , вычисленной по (4) из зависимости  $d(H_y)$ . Там же приведены экспериментальные точки (2). Видно, что в полях  $H_y > 8$  кА/м расхождение не превышает 5%, в меньших полях 10%. Это расхождение связано, по-видимому, с неточностью определения  $V_y$  и  $I_y$  по напряжению и току на входе линии.

Величина  $M_{отр}$  определяется непрямоугольностью петли гистерезиса, т.е. наличием остаточной намагниченности  $\Delta M_{ост}$  при данном  $H_y$  и амплитудой отраженной волны  $H_{отр}$ .

При условии достаточности амплитуды  $H_{отр}$  для насыщения феррита ( $H_y + H_{отр} > 16$  кА/м)

$$M_{отр} = 1 + \frac{K \Delta M_{ост}}{H_{отр}} \quad (5)$$

Отсюда, вычисляя для каждого значения  $H_y$  величину  $\Delta M_{ост}$  при малых  $R_H$ , можно получить зависимость  $\Delta M_{ост}$  от  $H_y$  (рис.4). В некоторых схемах и устройствах используются нелинейные короткозамкнутые линии [2,3]. В этом случае для отраженной волны:

$$H_{отр}^{K.3.} = d^{K.3.} H_y; K_p^{K.3.} = -d^{K.3.} = -\sqrt{M_0} / \sqrt{M_{отр}^{K.3.}} \quad (6)$$

Величину коэффициента усиления мощности для отраженной от короткозам-

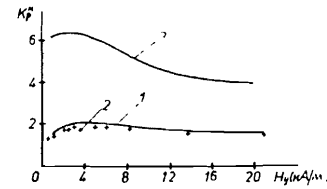


Рис.3. Зависимость максимального коэффициента усиления от  $H_y$ : 1 - расчет по формуле (4), 2 - экспериментальные точки при работе на согласованную нагрузку, 3 - для короткозамкнутой линии.

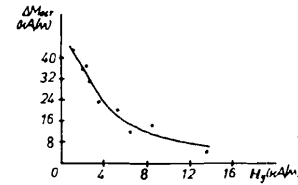


Рис.4. Зависимость  $\Delta M_{ост}$  от  $H_y$ .

кнутого конца линии волны  $K_p^{K.3.}$  можно вычислить для любого  $H_y$ , зная величину  $\Delta M_{ост}$  (рис.4). Данные вычислений приведены на рис.3. Видно, что максимум  $K_p^{K.3.}$  достигается в области  $H_y \approx 2+4$  кА/м и равен  $\sim 6$ . При расчете оптимальных параметров нелинейной линии будем считать заданным напряжение в линии  $V_y$ . Прежде всего следует выбрать рабочее магнитное поле ударной волны  $H_y$ . Оно может определяться, в частности, требованием достижения максимального коэффициента усиления мощности или необходимой длительностью фронта  $1/\tau$ .

Далее, используя (1) и (2), можно вычислить необходимую величину  $\rho_0$ :

$$\rho_0 = \frac{V_y}{2\pi z_{cp} \sqrt{K \Delta M H_y}}; \quad (7)$$

$\Delta M = \Delta M_0 - \Delta M_{ост}$ . Для ферритов марки 600 НН  $\Delta M_0 \approx 3,6 \cdot 10^5$  А/м, а  $\Delta M_{ост}$  определяется по рис.4. Таким образом, каждому значению  $z_{cp}$  соответствует определенное значение  $\rho_0$ , т.е. выбор типоразмеров ферритовых колец определяет необходимое значение волнового сопротивления линии. Если полученная величина  $\rho_0$  слишком мала ( $< 5$  Ом) или велика ( $> 30$  Ом), следует выбрать кольца другого типоразмера, т.к. реализовать ферритовую коаксиальную линию с высоким коэффициентом заполнения и с  $\rho_0 > 30$  Ом или  $\rho_0 < 5$  Ом - затруднительно. Если же не удается выбрать разумные размеры ферритовых колец ( $1$  мм  $< z_{cp} < 250$  мм) для данного  $V_y$ , то в случае малых

$V_g$  следует перейти на линии с сосредоточенными параметрами, а в случае больших  $V_g$  использовать несколько последовательно соединенных по входам и выходам линий.

Выводы:

1. Для достижения максимальных коэффициентов усиления мощности в нелинейных ферритовых линиях необходимо использовать линии с высоким коэффициентом заполнения ферритом, а амплитуда магнитного поля в феррите должна лежать в области  $H_y \approx 4$  кА/м.

2. Максимальный коэффициент усиления равен  $\sim 2$  в случае работы на согласованную нагрузку ( $R_H \approx \xi_0 \sqrt{M_{отр}}$ ) и 6 для короткозамкнутых линий (для ферритов марки 600 НН).

#### Литература

1. Катаев И.Г. Ударные электромагнитные волны. "Сов.радио", М., 1963.
2. Долбиллов Г.В., Красных А.К., Разувакин В.Н. ПТЭ, 1984, № 4, с.26.
3. Долбиллов Г.В., Петров В.А., Фатеев А.А. ПТЭ, 1986, № 1, с.98.

### 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

Рукопись поступила в издательский отдел  
26 сентября 1986 года.

## НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

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

D2-82-568	Труды совещания по исследованиям в области релятивистской ядерной физике. Дубна, 1982.	1 р. 75 к.
D9-82-664	Труды совещания по коллективным методам ускорения. Дубна, 1982.	3 р. 30 к.
D3,4-82-704	Труды IV Международной школы по нейтронной физике. Дубна, 1982.	5 р. 00 к.
D11-83-511	Труды совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1982.	2 р. 50 к.
D7-83-644	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Алушта, 1983.	6 р. 55 к.
D2,13-83-689	Труды рабочего совещания по проблемам излучения и детектирования гравитационных волн. Дубна, 1983.	2 р. 00 к.
D13-84-63	Труды XI Международного симпозиума по ядерной электронике. Братислава, Чехословакия, 1983.	4 р. 50 к.
D2-84-366	Труды 7 Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1984.	4 р. 30 к.
D1,2-84-599	Труды VII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1984.	5 р. 50 к.
D17,84-850	Труды III Международного симпозиума по обратным проблемам статистической механики. Дубна, 1984. /2 тома/	7 р. 75 к.
D10,11-84-818	Труды V Международного совещания по проблемам математического моделирования, программированию и математическим методам решения физических задач. Дубна, 1983	3 р. 50 к.
	Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1984 /2 тома/	13 р. 50 к.
D4-85-851	Труды Международной школы по структуре ядра, Алушта, 1985.	3 р. 75 к.
D11-85-791	Труды Международного совещания по аналитическим вычислениям на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1985.	4 р.
D13-85-793	Труды XII Международного симпозиума по ядерной электронике. Дубна 1985.	4 р. 80 к.

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

Фатеев А.А.

Усиление импульсной мощности  
в нелинейных ферромагнитных линиях

13-86-638

Рассмотрены вопросы усиления импульсной мощности в нелинейных ферромагнитных линиях. Экспериментально определена зависимость максимального коэффициента усиления  $K_P^M$  от амплитуды магнитного поля в линии. Показано, что  $K_P^M \approx 2$  при работе на согласованную нагрузку и  $\sim 6$  для волны, отраженной от короткозамкнутого конца линии. Приведена зависимость остаточной намагниченности феррита от амплитуды ударной волны.

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1986

Перевод О.С.Виноградовой

Fateev A.A.

The Pulse Power Amplification in Nonlinear  
Ferromagnetic Lines

13-86-638

The questions of the pulse power amplification in nonlinear ferromagnetic lines are described. The maximum gain factor  $K_P^M$  as a function of the magnetic field amplitude in the line is determined experimentally. It is shown that  $K_P^M \approx 2$  on the matched load and  $K_P^M \sim 6$  for the wave reflected from short-grounded end of the line. The dependence of residual magnetization as a function of the shock wave amplitude is also given.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1986