

83 396

Бр $\frac{116}{468}$

И Н С Т И Т У Т
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СОАН СССР

ИЯФ 49-71

С.Б.Вассерман

**РАБОТА ПОЯСА РОГОВСКОГО - ТРАНСФОРМАТОРА
ТОКА - ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ТОКОВ НАНОСЕКУНДНОЙ
ДЛИТЕЛЬНОСТИ**

Новосибирск

1971

С.Б.Вассерман

РАБОТА ПОЯСА РОГОВСКОГО - ТРАНСФОРМАТОРА ТОКА -
ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ТОКОВ НАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

А Н Н О Т А Ц И Я

Рассмотрена теория работы пояса Роговского - трансформатора тока - в наносекундном диапазоне длительностей импульсов, когда условие квазистационарности обычно не выполняется. Приводятся основные данные и описана конструкция измерителя тока электронного пучка с амплитудой в десятки кА при длительности импульса 40 - 50 нсек, работающего в ускорителе РИУС-5.

р/с
мис.к
о/с

Работа пояса Роговского с разомкнутой обмоткой, включенной на интегрирующую RC цепочку, при измерении импульсных токов наносекундной длительности рассмотрена в [1,2]. Другая часто применяемая схема пояса Роговского - пояс с обмоткой, замкнутой на малое сопротивление (трансформатор тока), действие которого основано на принципе электромагнитной инерции Ленца и законе полного тока, - изучена при работе с относительно длинными импульсами, когда выполняется условие квазистационарности. Между тем, анализ работы такого пояса при измерении токов наносекундной длительности и опыт измерения тока электронного пучка на ускорителе РИУС-5 [3] при длительности импульса около 40 нсек и амплитуде в несколько десятков ка показали, что и в этих условиях простейшая схема пояса Роговского может успешно использоваться.

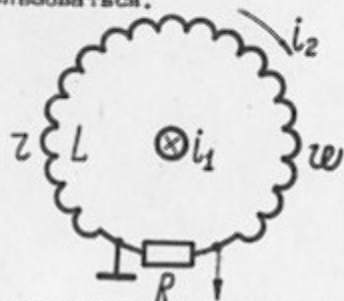


Рис.1. Схема пояса Роговского - трансформатора тока.

1. Работа пояса Роговского в квазистационарном режиме

Прежде, чем приступить к анализу работы пояса Роговского при невыполнении условия квазистационарности, приведём основные соотношения, справедливые в квазистационарном режиме.

При равномерной намотке пояса по азимуту, малом по сравнению с диаметром поперечном размере пояса (в случае расположения измеряемого тока на оси тора последнее ограничение снимается) и при выполнении условия $\tau = L/R + z \gg \tau_u$, где L - индуктивность пояса, z и R - соответственно сопротивление обмотки пояса и внешней нагрузки, τ - постоянная времени цепи обмотки, и τ_u - длительность измеряемого импульса,



$$i_2 \approx \frac{i_1}{W}, \quad (1.1)$$

где W - число витков обмотки пояса (рис.1).

Приближенность соотношения (1.1) обусловлена несколькими причинами. Наибольшее значение обычно имеет меняющаяся во времени погрешность, возникающая из-за конечной величины постоянной времени ядра. В общем случае, при произвольной форме импульса тока i_1 , в момент времени t имеем [4,5]:

$$i_1(t) = W \left[i_2(t) + \frac{1}{\tau} \int_0^t i_2(\nu) d\nu \right]. \quad (1.2)$$

Поправка к току i_2

$$\delta i_2 = \frac{1}{\tau} \int_0^t i_2(\nu) d\nu. \quad (1.3)$$

Формула (1.3) позволяет по измеренной зависимости $i_2(t)$ легко найти поправку для любого момента времени.

Относительная погрешность при измерении амплитуды импульса

$$\frac{\delta i_2}{i_{2m}} = \frac{\frac{1}{\tau} \int_0^{t_m} i_2 dt}{i_{2m}} = \frac{t_m}{\tau} \cdot \frac{i_{2cp}}{i_{2m}}, \quad (1.4)$$

где t_m - момент времени, соответствующий максимуму тока в импульсе, i_{2cp} - средний за промежуток времени от $t=0$ до $t=t_m$ ток i_2 . Для оценок часто удобнее пользоваться не точным выражением (1.4), а получаемым из него путем замены t_m и i_{2cp} соответственно на τ_u и i_{2m} приближенным соотношением:

$$\frac{\delta i_2}{i_{2m}} \leq \frac{\tau_u}{\tau}, \quad (1.5)$$

т.е. относительная погрешность при измерении амплитуды импуль-

са произвольной формы не превышает отношения длительности импульса τ_u к постоянной времени τ цепи обмотки пояса Роговского. Это положение является основным условием при выборе параметров пояса Роговского и величины нагрузочного сопротивления в квазистационарном режиме.

2. Работа пояса Роговского при невыполнении условия квазистационарности

Рассмотрим случай, когда условие квазистационарности

$$\Delta t_u > t_u, \quad (2.1)$$

где Δt_u - время заметного изменения тока в импульсе и t_u - время пробега электромагнитной волны вдоль обмотки пояса, не выполняется.

Определим сначала величину тока, который протекает по обмотке пояса Роговского, если она замкнута накоротко (рис.2).



Рис.2.

Пояс имеет радиальную симметрию и измеряемый ток i_1 проходит строго по оси пояса. Нетрудно видеть, что, поскольку все витки обмотки пояса находятся в совершенно одинаковых условиях, ток в них, как и в квазистационарном режиме, будет всюду один и тот же. Его величина также будет определяться в соответствии с принципом электромагнитной энергии Ленца и законом полного тока

$$i_2 \approx \frac{i_1}{W},$$

а поправка — формулами (1.3 — 1.5), в которых τ — постоянная времени короткозамкнутой обмотки пояса, т.е. при оговоренных условиях работа короткозамкнутого пояса Роговского не зависит от того, выполнено или нет условие квазистационарности. Отметим попутно, что в силу симметрии все витки имеют одинаковый потенциал. Если какой-либо точке обмотки пояса сообщить фиксированный потенциал, в частности, соединить её с экраном, то все витки будут иметь тот же потенциал, т.е. симметрия не нарушится. Это справедливо, конечно, при хорошей экранировке пояса от электростатических наводок.

Поправка к току i_2 (1.5) при укорочении импульса уменьшается и в случае сильно выраженного скин-эффекта, так как τ уменьшается только как $\sqrt{r_u}$.

Используя предыдущие рассуждения, не трудно перейти к анализу работы реальной схемы пояса при измерении коротких импульсов тока. Для этого в схему пояса с нагрузочным сопротивлением R (рис.3а) мысленно введем два равных по величине и направленных встречно источника э.д.с., причём величину этой э.д.с. в каждый момент времени примем в точности равной падению напряжения на нагрузочном сопротивлении R при протекании тока i_2 (рис.3б), т.е. $e(t) = i_2(t)R$.

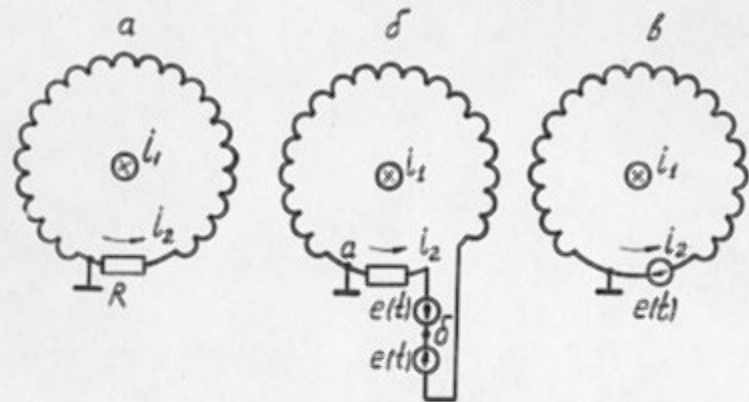


Рис.3. Замена нагрузочного сопротивления пояса (схема а) эквивалентным ему источником э.д.с.(в).

Для принятой величины $e(t)$ напряжение между точками а и б (рис.3б) в каждый момент времени равно нулю, и, следовательно, эту схему можно заменить схемой, изображенной на рис.3в^х). Последнюю можно рассматривать как цепь, содержащую два источника — источник тока i_1 и источник э.д.с.

$e = i_2(t)R$. Пользуясь методом наложения (цепь — линейная) можно представить ток i_2 как алгебраическую сумму токов, обусловленных раздельным действием источника тока i_1 и источника э.д.с. e (рис.4). Первая составляющая, i_2' , представляет собой ток в короткозамкнутой обмотке пояса Роговского. Такой режим был рассмотрен выше.

$$i_2'(t) = \frac{i_1(t)}{w} - \frac{1}{\tau} \int_0^t i_2'(v) dv \quad (2.2)$$

Вторая составляющая, Δi_2 , есть ток, протекающий в одной спиральной линии, образуемой обмоткой пояса Роговского, под действием источника э.д.с. $e = i_2(t)R$, т.е.:

$$\Delta i_2(t) = i_2(t) \frac{R}{\rho} \quad (2.3)$$

где ρ — волновое сопротивление обмотки пояса.

Выражение (2.3) справедливо в течение промежутка времени, равного $2t_n$, за который волна тока Δi_2 вернется к началу пояса, отразившись от его конца (места заземления). Суммарный ток, протекающий через источник э.д.с. (т.е. через нагрузочное сопротивление пояса)

$$i_2(t) = i_2'(t) - \Delta i_2(t) = \frac{i_1(t)}{w} - \frac{1}{\tau} \int_0^t i_2'(v) dv - i_2(t) \frac{R}{\rho},$$

откуда

$$i_2(t) = w \left[i_1(t) \left(1 + \frac{R}{\rho} \right) + \frac{1}{\tau} \int_0^t i_2'(v) dv \right] \quad (2.4)$$

^х) Такая замена пассивного элемента цепи источником э.д.с. известна в теории цепей как теорема компенсации.

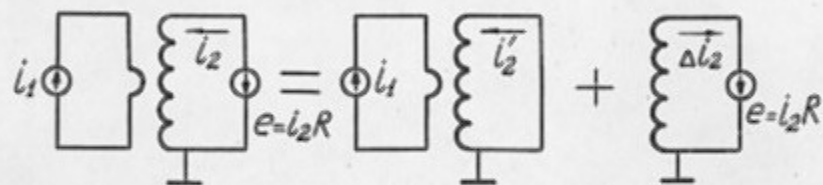


Рис.4. Представление тока i_2 составляющими, обусловленными раздельным действием источников i_1 и e .

В практически интересных случаях, когда $\Delta i_2 \ll i_2$, т.е. в соответствии с (2.3) при $R \ll \rho$, $i_2' \approx i_2$. Заменяя в (2.4) под знаком интеграла $i_2'(v)$ на $i_2(v)$ (это даёт погрешность 2-го порядка) получим окончательную формулу для определения измеряемого поясом Роговского тока i_1 :

$$i_1(t) = W \left[i_2(t) \left(1 + \frac{R}{\rho} \right) + \frac{1}{c} \int_0^t i_2(v) dv \right] \quad (2.5)$$

справедливую, если выполнены следующие условия:

- а) пояс имеет равномерно намотанную по всей окружности обмотку;
- б) измеряемый ток i_1 проходит по оси пояса;
- в) длительность импульса тока меньше удвоенного времени пробега волны по обмотке пояса; лучше, вероятно, если она меньше времени пробега обмотки в одном направлении, так как после достижения волной конца пояса может появиться наводка в сигнале из-за магнитной связи конца обмотки с её началом;
- г) сопротивление нагрузки пояса много меньше величины волнового сопротивления обмотки пояса.

Как видно из (2.2) и (2.5), по сравнению с короткозамкнутым поясом наличие нагрузочного сопротивления приводит к появлению постоянного поправочного коэффициента к току i_2 , равного $(1 + R/\rho)$ (т.е. в этом случае ток i_2 , протекающий через нагрузочное сопротивление, уменьшается в $(1 + R/\rho)$ раз

по сравнению с током в короткозамкнутой обмотке без искажения формы). Уменьшение поправочного коэффициента можно получить либо за счёт увеличения ρ , либо за счёт уменьшения R ; последнее не всегда желательно из-за уменьшения чувствительности пояса (при заданном числе витков W). Увеличение волнового сопротивления обмотки в поясах рассматриваемой схемы может, в частности, достигаться применением сердечника из высокочастотного феррита. (Благодаря практически полной компенсации намагнивающего действия тока i_1 током i_2 , напряженность магнитного поля в сердечнике, как правило, ниже порога насыщения феррита).

В заключение параграфа рассмотрим влияние паразитных параметров нагрузки: последовательной индуктивности L_s и шунтирующей ёмкости C_w на работу пояса Роговского при измерении коротких импульсов (рис.5).

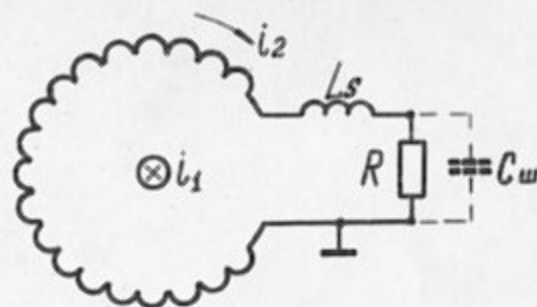


Рис.5. Схема пояса Роговского с паразитными параметрами в цепи нагрузки.

Действие шунтирующей сопротивление R емкости C_w будет таким же, как и в квазистационарном режиме работы пояса. Ответвление в емкость C_w части тока i_2 приводит к искажениям сигнала на фронтах импульса. Постоянная времени нарастания сигнала на нагрузочном сопротивлении R при скачкообразном изменении тока i_1 равна RC_w . Следует отметить, что в отличие от квазистационарного режима в рассматриваемом случае в эквивалентную величину шунтирующей емкости не входит собственная емкость обмотки пояса, поскольку последняя представляет собой в этом случае линию.

Влияние паразитной индуктивности L_s на ток i_2 можно установить тем же методом, который был применен выше для R . Эквивалентный источник, заменяющий индуктивность, будет иметь величину э.д.с.

$$e = L_s \frac{di_1}{dt} \quad (2.6)$$

Дополнительный ток, вызываемый источником,

$$\Delta i_{2L} = \frac{e}{\rho} = \frac{L_s}{\rho} \cdot \frac{di_1}{dt} \quad (2.7)$$

Ток Δi_{2L} направлен против тока i_2 , когда последний нарастает, и согласно с током i_2 при его спадании. Для оценки влияния индуктивности L_s на ток i_2 полезно определить долю Δi_{2L} от амплитуды тока i_{2m}

$$\frac{\Delta i_{2L}}{i_{2m}} \approx \frac{L_s}{\rho} \cdot \frac{i_{2m}}{T_{\varphi}} = \frac{L_s}{\rho \cdot T_{\varphi}} \quad (2.8)$$

3. Особенности конструкции пояса. Экспериментальные

результаты

Конструктивно пояс Роговского рассматриваемого типа представляет собой правильной формы кольцо с равномерно намотанной по всей окружности обмоткой, помещенное в замкнутый по азимуту корпус из проводящего материала (экран). Корпус пояса (рис.6) помимо чисто конструктивной детали является важным

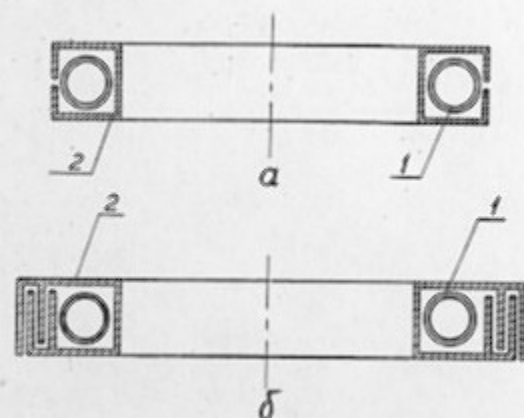


Рис.6. Пояс Роговского в простом экране (а) и в экране (корпусе) с лабиринтом (б).
1 - обмотка пояса, 2 - корпус.

элементом, обеспечивающим нормальную работу измерителя. Корпус обеспечивает азимутальную однородность параметров обмотки. При измерении тока заряженных частиц защищает обмотку от попадания рассеянных частиц. Значительно снижает электростатическую наводку. Устраняет также наводки от переменных магнитных полей, в том числе от полей, пронизывающих пояс внутри тора, так как для таких полей корпус представляет собой массивный короткозамкнутый виток. Поэтому в применении для этой цели, как это часто делается, обратного витка нет необходимости. Более того, наличие обратного витка, представляющего собой в данном случае короткий отрезок линии с низким по сравнению со спиральной линией волновым сопротивлением, может привести к появлению на кривой тока L_2 высокочастотного "звона". Благодаря скин-эффекту в стенках корпуса нормальная составляющая магнитной индукции на поверхности металла отсутствует и магнитное поле в поясе получается практически однородным по азимуту (особенно при наличии

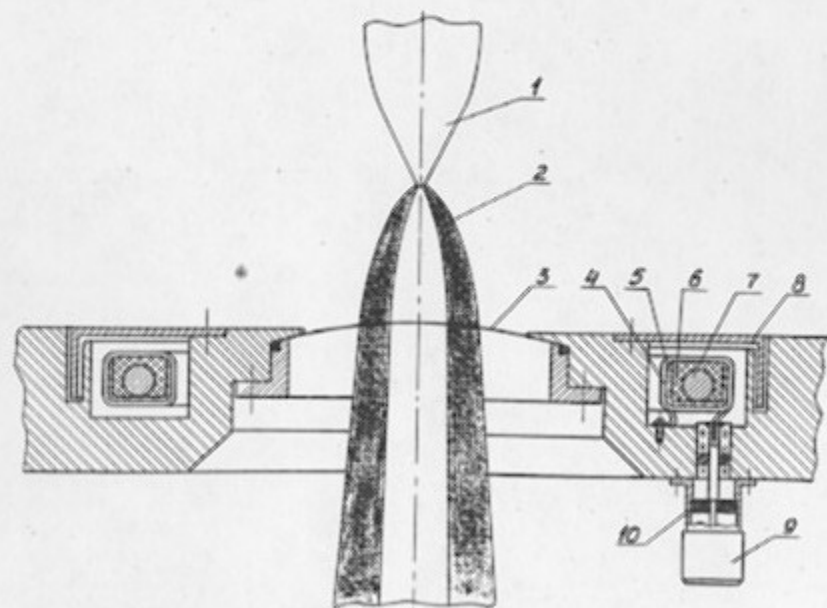


Рис.7. Расположение и конструкции пояса Роговского ускорителя РИУС-5.

- 1 - холодный катод ускорительной трубки; 2 - пучок электронов; 3 - выпускное окно; 4 - обмотка пояса; 5 - изоляционный каркас обмотки; 6 - эпоксидная смола; 7 - ферритовые стержни; 8 - крышка пояса (лабиринт); 9 - разъем; 10 - нагрузочный резистор типа УНУ-Ш-0,25.

лабиринта) даже при смещении измеряемого тока от оси, что существенно улучшает эксплуатационные характеристики пояса.

На рис.7 показана конструкция пояса Роговского, встроенного в анод ускорительной трубки установки РИУС-5 /3/. Пояс предназначен для измерения импульсов тока пучка ускоренных электронов с амплитудой до 50 кА с длительностью импульсов 40 - 50 нсек при работе ускорителя в нормальном режиме (с выпуском и без выпуска пучка) и - токов с длительностью до нескольких сот наносекунд при некоторых испытаниях ускорителя, связанных с закорачиванием ускорительного промежутка. Конструкция коаксиального вывода с дисковым нагрузочным резистором позволяет исключить из выходного сигнала падение напряжения на индуктивности вывода.

Основные данные пояса: средний диаметр - 20 см; площадь сечения - 3 см²; число витков обмотки - 360; нагрузочное сопротивление (с учетом параллельно включенного волнового сопротивления кабеля - 75 Ом) - 7,2 Ом. В изоляционный каркас обмотки вложен сердечник из стержней феррита 100В4, собранный в виде многоугольника и залитый эпоксидной смолой. Индуктивность обмотки - 1 мГн, емкость обмотки на корпус - 200 пФ, волновое сопротивление - 2,2 Ом, постоянная времени короткозамкнутой обмотки с учетом скин-эффекта - 50 мсек. Чувствительность пояса

$$\frac{i_2 R}{i_1} = \frac{R}{W} = 0,02 \text{ \%}.$$

Время пробега волны вдоль обмотки

$$t_n = \sqrt{LC} \cong 450 \text{ нсек},$$

что больше длительности импульса тока ускорителя во всех режимах. Поправки к выходному току пояса, обусловленные нагрузочным сопротивлением и индуктивностью вывода ($L_s \cong 10^{-8}$ Гн) пренебрежимо малы. Действительно, согласно (2.3) и (2.8) и учитывая, что фронты измеряемых токов имеют длительности не менее 10 нсек,

$$\frac{\Delta i_2}{i_2} = \frac{R}{\rho} \cong 3 \cdot 10^{-3},$$

$$\frac{\Delta i_2 L}{i_2 m} \cong \frac{L_s}{\rho \tau_{\phi}} \leq 5 \cdot 10^{-4}.$$

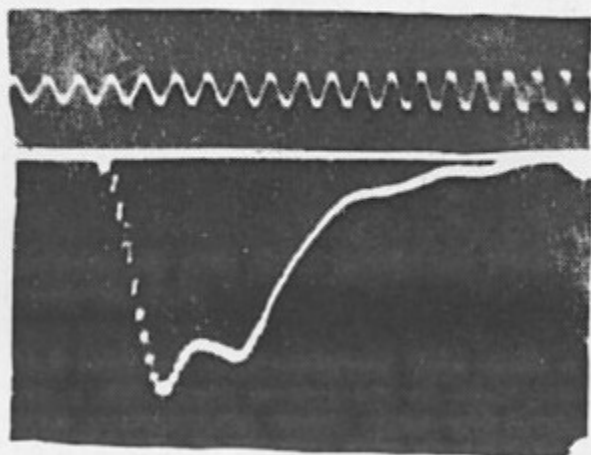


Рис.8. Осциллограмма тока пучка ускорителя РИУС-5. Метки времени—100 Мгп.

На рис.8 показана осциллограмма тока пучка с амплитудой 30 ка, снятая с описанного измерителя на осциллограф ОК-18М. Для измерения относительно малых токов чувствительность пояса может быть повышена по крайней мере на порядок за счёт соответствующего увеличения R , при этом поправка к току i_2 (2.3) не будет превышать 3%, а постоянная времени интегрирования фронта импульса будет в пределах нескольких нсек.

Постоянное отношение токов i_1 и i_2 , равное числу витков обмотки, делает не обязательной калибровку пояса. Это подтвердилось при сравнении показаний, снятых с пояса и с безиндуктив-

ного шунта, включенного последовательно в цепь тока с амплитудой 250а и длительностью импульса 60 нсек. Оба импульса в пределах точности измерений совпали по амплитуде и не отличались по форме друг от друга.

Л и т е р а т у р а

1. J. Cooper, J. Nucl. Energy, 1963, 5, 285.
2. А.М. Стефановский, ПТЭ, 1967, № 2, 148.
3. Е.А. Абрамян, С.Б. Вассерман, В.М. Долгушин, Л.А. Моркин,
О.П. Печерский, В.А. Цукерман. ДАН СССР, 192, № 1, 1970.
4. С.Б. Вассерман. Диссертация ИЯФ СО АН СССР, Новосибирск,
1967.
5. И.З. Охумь, ПТЭ, 1968, № 6, 120.

Ответственный за выпуск С.Б. Вассерман
Подписано к печати 25.8.71 МН 02726
Усл. 0,8 печ.л., тираж 200 экз. Бесплатно.
Заказ № 49 . ПРЕПРИНТ

Отпечатано на ротационной в ИЯФ СО АН СССР, нв.