

Б 71
К-438

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



1810/2-76

10/6-76

9 - 9549

Ю.Т.Кирюшин, Ю.М.Колесников

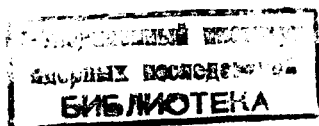
К РАСЧЕТУ ПОЯСА РОГОВСКОГО
С ФЕРРИТОВЫМ СЕРДЕЧНИКОМ
ДЛЯ ТОЧНОГО ИЗМЕРЕНИЯ
МОЩНЫХ ИМПУЛЬСОВ ТОКА

1976

9 - 9549

Ю.Т.Кирюшин, Ю.М.Колесников

К РАСЧЕТУ ПОЯСА РОГОВСКОГО
С ФЕРРИТОВЫМ СЕРДЕЧНИКОМ
ДЛЯ ТОЧНОГО ИЗМЕРЕНИЯ
МОЩНЫХ ИМПУЛЬСОВ ТОКА



Введение

Применение пояса Роговского для измерения импульсов тока имеет ряд достоинств, к числу которых можно отнести:

- 1/ отсутствие непосредственного контакта с измеряемой цепью, что удобно для измерений в высоковольтных цепях;
- 2/ малое входное сопротивление;
- 3/ простота изготовления и надежность в эксплуатации.

Необходимость обеспечить высокую точность измерений в использовании пояса часто играет решающую роль. Для этого нужно изготовить пояс, обладающий достаточно большой постоянной интегрирования. Сложность состоит в том, что эта величина ограничена /когда заданы размеры и чувствительность пояса/ из-за существования в его обмотке активного сопротивления. С применением ферритовых сердечников точность измерения нелинейно изменяется в соответствии с зависимостью магнитной проницаемости сердечника от напряженности магнитного поля. Допустимое изменение точности накладывает ограничение на максимальную величину магнитного поля, насыщающего сердечник.

Ниже изложен метод, использующий указанные ограничения как основные при расчете пояса Роговского. Исходными данными для него служат параметры импульса /амплитуда, длительность/ первичного тока и точность его измерения. Приведены экспериментальные результаты, полученные для рассчитанных этим методом поясов.

Метод расчета пояса Роговского

Для коэффициента самоиндукции L обмотки пояса Роговского и ее активного сопротивления r справедливы соотношения $L = L_0 N^2$ и $r = p_s \rho N$. Здесь L_0 - индуктивность обмотки на виток, p_s - периметр сечения обмотки, ρ - сопротивление единицы длины провода, N - число витков обмотки. С помощью этих соотношений, если зафиксировать размеры сердечника пояса, величину чувствительности $V/i = R_{II}/N$ /где R_{II} - величина сопротивления нагрузки/ и значение постоянной интегрирования $\tau = L/(R_{II} + r)$, можно вычислить количество витков обмотки и величину сопротивления нагрузки по формулам

$$N = \frac{\left(\frac{V}{i} + p_s \rho\right) \tau}{L_0}$$

$$R_{II} = (V/i)N \quad /1/$$

Подстановка в первую из формул /1/ равенств $N = \ell_{BH}/kD$ и $\rho = \alpha/D^2$, /где ℓ_{BH} - длина внутреннего периметра сердечника, D - диаметр провода, $k > 1$ - коэффициент, характеризующий плотность намотки, α - коэффициент пропорциональности/ дает возможность определить зависимость постоянной интегрирования от диаметра провода

$$\tau = \frac{L_0 \ell_{BH} D}{k \left(\frac{V}{i} + \alpha p_s\right)}$$

Из нее следует, что при выполнении условия

$$V/i = p_s \rho \quad /2/$$

достигается наибольшая величина постоянной интегрирования τ_{max} , для которой справедливо соотношение

$$\tau_{max} = L_0 \ell_{BH} / 2k(V/i)D. \quad /3/$$

Магнитное поле, действующее на сердечник пояса Роговского, является суммой полей, созданных первичным током i и током обмотки i_n . Когда первичный проводник проходит по оси симметрии тороидальной системы, связь между величинами токов и напряженностью магнитного поля после преобразования закона Ампера запишется в виде:

$$i_n = (H\ell - i)/N,$$

где ℓ - средняя длина сердечника. Первичный ток и ток в обмотке также связаны временным соотношением

$$L \frac{di_n}{dt} + (R_{II} + r)i_n = -M \frac{di}{dt} \quad /4/$$

$$/L = \frac{\mu\mu_0 S}{\ell} N^2 \quad \text{и} \quad M = \frac{\mu\mu_0 S}{\ell} N, \quad \text{где} \quad \mu\mu_0 - \text{магнитная}$$

проницаемость сердечника, S - площадь поперечного сечения обмотки, t - координата времени/. Последние два уравнения позволяют найти уравнение для напряженности магнитного поля

$$\tau (dH/dt) + H = i/\ell,$$

решение которого дает выражение

$$H(t) = \frac{1}{\ell} \frac{e^{-t/\tau}}{\tau} \int_0^t i(\nu) e^{\nu/\tau} d\nu.$$

Для применения пояса в большинстве случаев достаточно заменить функцию $i(t)$ прямоугольным импульсом, длительность t_{II} которого совпадает с реальной, а амплитуда равна максимальной величине первичного тока i_{max} . Добавив к этому предположению условие интегрирования $t_{II} \ll \tau$, можно дать оценку верхней границе магнитного поля, действующего на сердечник:

$$H \leq \frac{i_{max}}{\ell} \frac{t_{II}}{\tau} \quad /5/$$

Характерная зависимость $\mu = \mu(H)$ магнитной проницаемости ферритов от напряженности магнитного поля приведена на рис. 1. В области изменения магнитного поля, где выполняется неравенство

$$\mu(H) \geq \mu(0) \quad /6/$$

$\mu(0)$ - начальная магнитная проницаемость/, индуктивность обмотки не меньше первоначальной и, как следует из интеграла уравнения /4/

$$i_n + \frac{R_{II+r}}{L} \int_0^t i_n(\nu) d\nu = -\frac{i}{N},$$

точность измерений не хуже, чем при малой величине магнитного поля, насыщающего сердечник. Уменьшение расчетного значения начальной магнитной проницаемости приведет к расширению указанной области. Однако использовать такую возможность не всегда удобно, так

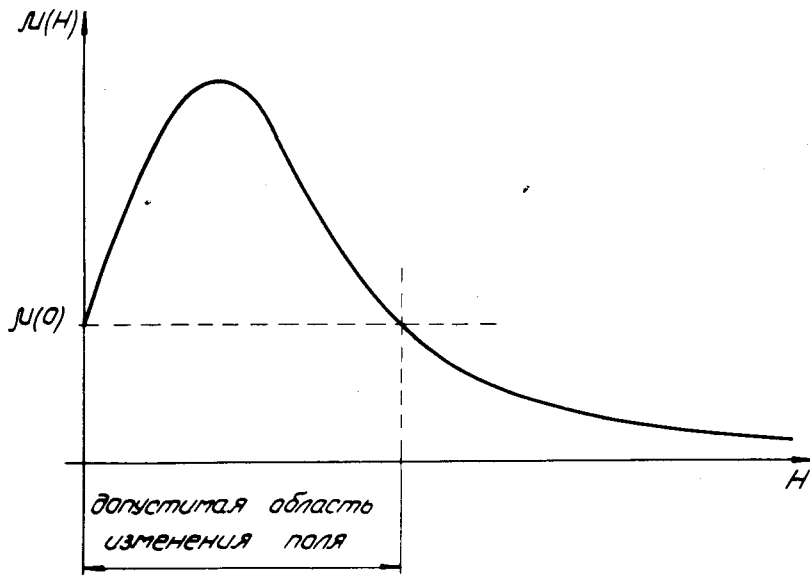


Рис. 1. Зависимость магнитной проницаемости ферритов от напряженности магнитного поля H .

как она связана с увеличением размеров сердечника. Поэтому можно считать, что неравенство /6/ определяет допустимые пределы области изменения магнитного поля.

При скачке первичного тока чувствительность пояса со временем экспоненциально падает. Функцию $\exp(-t/\tau)$ при выполнении соотношения $10t \leq \tau$ уже можно представить ее линейными членами разложения с достаточно хорошей точностью /~ 2%/ , величину постоянной интегрирования оценить по формуле

$$\tau \geq \frac{100 t_{II}}{\Delta}, \quad /7/$$

где Δ - величина изменения чувствительности, определяемая экспоненциальным спадом, выражена в процентах.

Для расчета пояса Роговского обычно задают его размеры, чувствительность, характеристики импульса /фронт, длительность и максимальную амплитуду/ первичного тока и точность измерения тока. Соотношения /1/÷/3/ и /5/÷/7/ дают возможность полностью произвести такой расчет следующим образом. Сначала, с помощью формулы /7/, предварительно оценивается величина постоянной интегрирования пояса. Затем выбирается тип ферритового кольца. Условия /5/ и /6/ позволяют окончательно установить величину постоянной интегрирования, а соотношения /2/ и /3/ - возможность ее получения. Наконец, когда сердечник выбран, вычисляется число витков обмотки и величина сопротивления нагрузки по формулам /1/.

Часто из-за отклонения магнитной проницаемости $\delta\mu$ сердечников относительно номинальной μ появляется дополнительная ошибка измерения $\delta(t_{II}/\tau)$. Ее можно вычислить по формуле

$$\delta(t_{II}/\tau) \approx (t_{II}/\tau)(\delta\mu/\mu),$$

которую удобно использовать для отбора сердечников. При большом количестве витков погрешность, обусловленная неточностью измерения величины сопротивления нагрузки, обычно очень мала, и ее можно не учитывать.

Экспериментальные результаты

Изложенный метод был использован для расчета 14 одинаковых поясов Роговского. Их изготовление проводилось по серийному технологическому процессу. Один пояс показан на рис. 2. Он содержит замкнутый вдоль своей длины латунный экран, в котором размещена обмотка из 200 витков, намотанных на два ферритовых кольца типа М 100ОНН-3-К125х80х12. Для устранения паразитных колебаний каждый пятый виток обмотки через сопротивление МЛТ-О, 125-1 кОм соединен с экраном^{1/2/}.

Сопротивление нагрузки состоит из резисторов типа МЛТ. При соединении этих резисторов по схеме "Звезда" и при отклонении первичного тока от оси пояса меньше 5 мм пояс имеет следующие основные характеристики:

- чувствительность - $2 \cdot 10^{-3}$ В/А,
- постоянная интегрирования - 0.09 с,
- фронт передаваемого импульса - 10 нс.

Дальнейшее увеличение несоосности первичного тока с поясом и применение других схем соединения резисторов сопротивления нагрузки приводит к увеличению фронта сигнала с пояса.

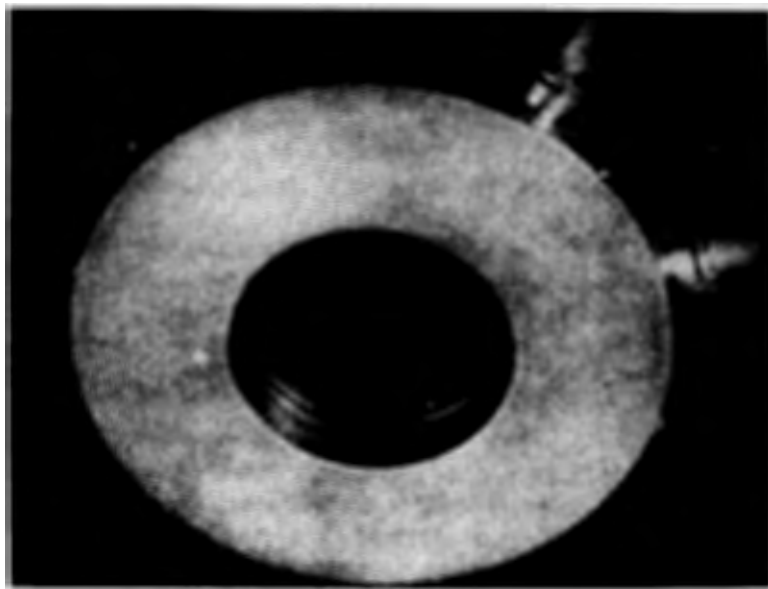


Рис. 2. Внешний вид пояса Роговского.

Калибровка поясов с точностью до 2% проводилась на стенде, блок-схема которого представлена на рис. 3. Формирование импульсов тока амплитудой до 250 А и длительностью до 2 мс обеспечивает специальный электрон-

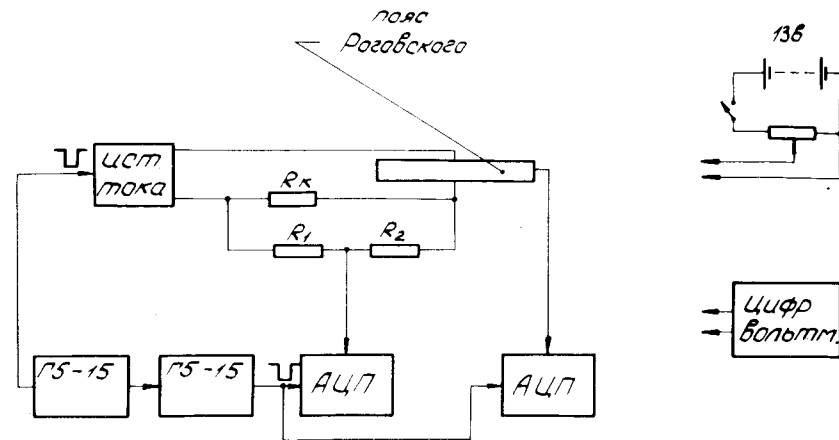


Рис. 3. Блок-схема стенда для калибровки поясов Роговского.

ный блок. Падение напряжения на калиброванном сопротивлении R_k подано через делитель (R_1, R_2) на 1024-канальный аналого-цифровой преобразователь /АЦП/. Такой же АЦП используется для измерения сигналов с пояса Роговского. Цифровой вольтметр и источник постоянного напряжения дают возможность следить за правильностью измерений во время калибровки.

Для проверки работы поясов при напряженности магнитного поля, насыщающего сердечник, близкой к допустимому значению, проводилось их испытание импульсами тока амплитудой 6 мА и длительностью 1,4 мс. Калиброванный пояс Роговского промышленного изготовления применен для контроля тока, а сравнение сигналов с точностью не хуже 2% осуществлено на двух 1024-канальных АЦП.

Заключение

1. Показано, что при использовании пояса Роговского с ферритовым сердечником в широкой области нелинейного изменения магнитной проницаемости в зависимости от напряженности магнитного поля, точность измерений не ухудшается.

2. Изложен метод расчета пояса Роговского, исходными данными для которого служат параметры импульса первичного тока и точность его измерения. Результаты расчета хорошо согласуются с экспериментом.

Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность И.А.Голутвину за постановку задачи и интерес к работе, а также В.С.Хабарову за предоставление точной и надежной электроники.

Литература

1. С.Б.Вассерман. ПТЭ, 1972, №2, 99.
2. Андерсон. Приборы для научных исследований, 1971, №7, 3.

Рукопись поступила в издательский отдел
18 февраля 1976 года.