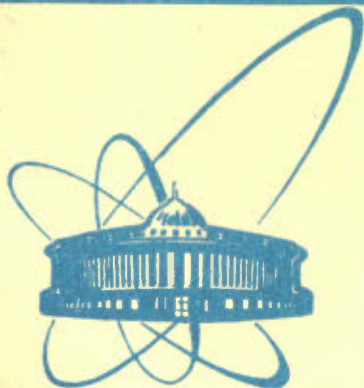


2/VI/84



**сообщения  
объединенного  
института  
ядерных  
исследований  
дубна**

**P9-84-231**

**В.И.Казача, А.К.Красных**

**ИЗМЕРЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ФЕРРОМАГНИТНЫХ СЕРДЕЧНИКОВ  
ИНДУКТОРОВ ЛИУ**

**1984**

## ВВЕДЕНИЕ

Формирование импульсов ускоряющего напряжения в линейных индукционных ускорителях /ЛИУ/ происходит в импульсной и индукционной системах. Индукционную систему ЛИУ образуют индукторы, сердечники которых обычно изготавливаются из высококачественных пермаллоев или ферритов. Для согласования импульсной системы с индукционной необходимо знать входное сопротивление индукторов.

В /1/ приведена методика расчета входного сопротивления индуктора, основанная на составлении его эквивалентной схемы замещения. Выражение, полученное для оригинала входного сопротивления, громоздко и содержит слабеющие, которые находятся методом неопределенных коэффициентов. Вследствие этого вычисление входного сопротивления индуктора оказывается трудоемким.

В /2/ эквивалентное сопротивление индуктора вычисляется по формуле, учитывающей связь между его электродинамическими и конструктивными параметрами. Из /2/ следует, что есть два значения входного сопротивления. Первое зависит от свойств материала сердечника индуктора, его радиальных размеров и справедливо на фронте импульса. Второе значение зависит только от конструктивного выполнения индуктора и справедливо на "плато" импульса ускоряющего напряжения. Из работы /2/ связь этих двух значений не ясна. Двойственность значений входного сопротивления индуктора не отражает сущности физических явлений в моменты времени, соответствующие переходным процессам в индукторе.

В данной работе рассматривается методика, по которой достаточно просто определяются динамические характеристики сердечников индукторов: входное сопротивление  $R_{вх}$ , максимальное значение приведенного динамического сопротивления  $\Gamma_m$  и коэффициент переключения  $S_w$ . Приводятся результаты измерений этих характеристик для группы пермаллоевых и ферритовых сердечников.

### 1. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФЕРРОМАГНИТНЫХ СЕРДЕЧНИКОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ИНДУКТОРАХ ЛИУ

При импульсном перемагничивании ферритовых сердечников и сердечников из высококачественных пермаллоев основным фактором, определяющим отличие динамической петли гистерезиса от статической, является наличие магнитной вязкости. Магнитная вязкость более точно учитывается в спиральной модели перемагничивания /3/. Эта модель была положена в основу изучения динамических свойств ферромагнитных сердечников, применяемых в устройствах автоматики и вычислительной техники /4/. Поскольку величины действующих магнитных полей  $H_d$  в индукторах оказываются того же порядка, что и в малогабаритных сердечниках, применение этой методики представляется правомерным.

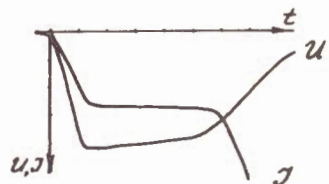


Рис. 1. Типичная форма напряжения  $U(t)$  и тока  $I(t)$  в возбуждающем витке ферромагнитного сердечника.

Динамические характеристики ферромагнитных сердечников определялись по совмещенным осциллограммам тока  $I(t)$  и напряжения  $U(t)$  в цепи первичной обмотки. Типичная форма сигналов показана на рис. 1. Заметим, что аналогичная форма сигналов приведена в работах <sup>/1,2/</sup>. Путем графического интегрирования кривых  $I(t)$  и  $U(t)$  определялось изменение магнитной индукции  $\Delta B(t)$  в сердечнике с поперечным сечением  $S$  и приведенный к длине средней силовой линии сердечника  $\ell_{\text{ср}}$  действующий заряд  $Q_{\text{д}}(t)$ :

$$\Delta B(t) = \frac{\int_0^t U(t') dt'}{W \cdot S}, \quad /1/$$

$$Q_{\text{д}}(t) = \frac{\int_0^t I(t') dt'}{\ell_{\text{ср}}}, \quad /2/$$

где  $W = 1$  - число витков первичной обмотки сердечника. При обработке осциллограмм считалось, что перемагничивание сердечника происходит из начального состояния, соответствующего остаточной индукции -  $B_r$ . В результате можно построить динамическую кривую перемагничивания  $\Delta B = f(Q_{\text{д}})$ , которая описывается выражением

$$\Delta B(Q_{\text{д}}) = B_s \cdot \text{th} \left[ \frac{r_m}{B_s} (Q_{\text{д}} - S_w/2) \right]. \quad /3/$$

Здесь  $B_s$  - индукция насыщения материала сердечника. Из построенной зависимости величины  $r_m$  и  $S_w$  определяются следующим образом:

$$r_m = \left. \frac{d(\Delta B)}{dQ_{\text{д}}} \right|_{\text{max}} \quad /4/$$

и  $S_w = 2Q_{\text{д}}^*$ , где  $Q_{\text{д}}^*$  - значение приведенного действующего заряда, при котором функция  $\Delta B(Q_{\text{д}})$  обращается в ноль. Используя выражения <sup>/4/</sup>

$$R_{\text{max}} = r_m \frac{S}{\ell_{\text{ср}}} \cdot W^2 \quad /5/$$

$$R_{\text{ср}} = \frac{\Delta B}{Q_w} \cdot \frac{S}{\ell_{\text{ср}}} \cdot W^2, \quad /6/$$

можно оценить величину максимального динамического и полного среднего сопротивления сердечника. В формуле /6/  $\Delta B$  - величина перепада индукции сердечника при его перемагничивании, а  $Q_w = S_w + H_0 \cdot t$  - полный приведенный заряд, необходимый для перемаг-

ничивания сердечника за время импульса  $t / H_0$  - поле "трогания" <sup>/4/</sup>. Известно <sup>/4/</sup>, что в случае больших действующих магнитных полей величиной  $H_0 \cdot t$  можно пренебречь, и тогда  $Q_w \approx S_w$ .

Кроме того, величины  $R_{\text{max}}$  и  $R_{\text{ср}}$  вычислялись путем обработки совмещенных осциллограмм  $I(t)$  и  $U(t)$ . Среднее динамическое сопротивление сердечника за отрезок времени  $t_{\text{и}}$  определялось как

$$R_{\text{ср}} = \frac{1}{t_{\text{и}}} \int_0^{t_{\text{и}}} R(t) dt. \quad /7/$$

Таким образом, имелась возможность сравнить величины  $R_{\text{max}}$  и  $R_{\text{ср}}$ , определенные двумя способами.

Величина среднего динамического сопротивления сердечника существенно отличается от среднего входного сопротивления индуктора. Это связано с тем, что, как правило, для большинства известных ЛИУ <sup>/2/</sup> длительность фронта возбуждающего импульса напряжения существенно больше, чем время распространения электромагнитной волны по линии, образованной потенциальным и ближайшим земляным электродами первичных обмоток соседних индукторов. Таким образом, эта линия ведет себя как сосредоточенная емкость /емкость зазора/. Она может сказаться на форме фронта импульса напряжения, но в течение времени, соответствующего "плато" импульса, входное сопротивление индуктора определяется только величиной динамического сопротивления ферромагнитного материала сердечника.

## 2. СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУППЫ ПЕРМАЛЛОВЫХ И ФЕРРИТОВЫХ СЕРДЕЧНИКОВ

Для проведения экспериментов был собран импульсный генератор, схема которого показана на рис. 2. Накопительная емкость  $C$  заряжалась от высоковольтного источника через ограничивающее ток сопротивление  $R_{\text{г}}$ . В качестве коммутатора использовался тиратрон ТГИ-2500/50. Накопительная емкость, тиратрон и исследуемый сердечник  $L_{\text{н}}$  образовывали контур с паразитной индуктивностью  $L$ . Конструктивно элементы располагались так, чтобы  $L$ , а следовательно, и внутреннее сопротивление генератора  $r_{\text{г}}$ , были минимальными. С помощью блока 1 задавалась рабочая точка на кривой гистерезиса материала сердечника. Регистрировались осциллограммы тока в возбуждающем витке сердечника и напряжение на нем. Возбуждающий виток состоял из трех параллельно запитываемых шин, расположенных с интервалом  $120^\circ$ . Волновое сопротивление генератора  $r_{\text{г}} \approx 3 \text{ Ом} / C \approx 60 \text{ нФ}$ ,  $L \approx 550 \text{ нГн}$ .

Исследовалась группа сердечников, изготовленных в НИИЭФА из пермаллоя марки 50НП, толщина ленты  $\delta = 10 \text{ мкм}$ . Наружный диаметр сердечников  $D = 430 \text{ мм}$ , внутренний  $d = 200 \text{ мм}$ , толщина сердечников  $h = 25 \text{ мм}$ . Площадь сечения сердечников по пермаллою  $S = 1,87 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ ,  $\ell_{\text{ср}} = 99 \text{ см}$ ,  $B_r = 140 \text{ сТ}$ . Для каждого сер-



дечника снимались синхронизированные осциллограммы  $U(t)$  и  $I(t)$ , которые затем обрабатывались по изложенной выше методике. На рис.3 приведены осциллограммы сигналов  $U(t)$  и  $I(t)$  для сердечников с лучшими /рис.3а/ и худшими /рис.3б/ динамическими характеристиками. На рис.4 представлены зависимости  $B(Q_d)$ ,

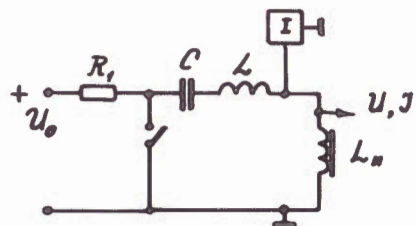


Рис.2. Схема импульсного генератора.

Рис.3. Синхронизированные осциллограммы напряжения и тока в возбуждающем витке сердечника из пермаллоя марки 50НП. Осциллограммы /а/ соответствуют сердечнику с лучшими, /б/ - сердечнику с худшими динамическими характеристиками.

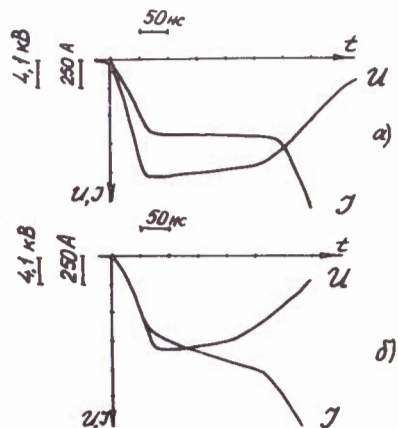


Рис.4. Динамические кривые перемагничивания. Кривые 1 и 2 построены в результате обработки осциллограмм, приведенных на рис.3а и 3б соответственно.

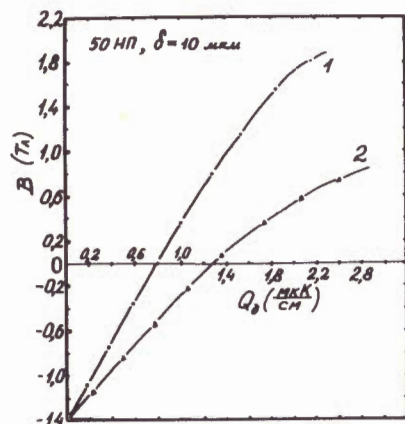


Рис.5. Зависимости динамического сопротивления сердечников от времени. Кривые 1 и 2 получены в результате обработки осциллограмм, приведенных на рис.3а и 3б соответственно.

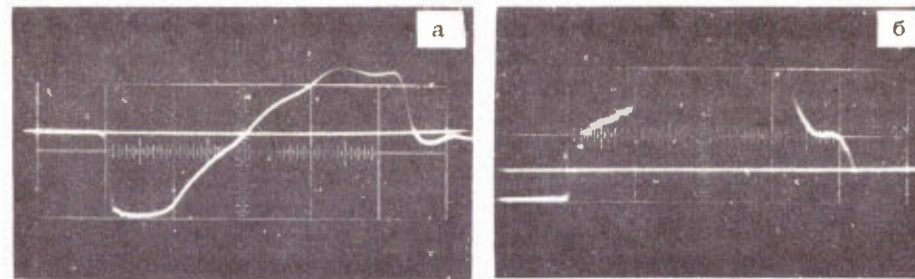
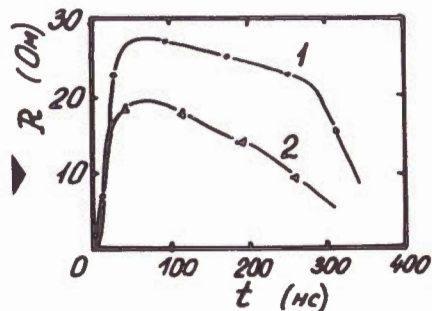


Рис.6. Осциллограммы напряжения /а/ и тока /б/ в возбуждающем витке сердечника из феррита марки 300НН. Масштаб по оси абсцисс - 200 нс/дел., по оси ординат - 20 кВ/дел. и 620 А/дел.

а на рис.5 - зависимости  $R(t)$ , полученные при обработке осциллограмм, показанных на рис.3а /кривые 1/ и рис.3б /кривые 2/ соответственно. Для каждого сердечника определялись значения  $r_m$ ,  $S_w$ ,  $R_{max}$ ,  $R_{cp}$ ,  $t_{и}$  и величина среднего тока перемагничивания  $I_{cp} = \frac{1}{t_{и}} \int_0^{t_{и}} I(t) dt$ . При этом отличие величин  $R_{max}$ , полу-

ченных при обработке кривых  $R(t)$ , от рассчитанных по формуле /5/, было не более 15%, а отличие  $R_{cp}$  от рассчитанных по формуле /6/, не превышало 10%.

Анализ полученных результатов показал, что основная группа сердечников имела практически одинаковые динамические характеристики:  $r_m = 150 \div 150$  Ом/см;  $S_w = 1,8$  мкК/см;  $R_{cp} \approx 19 \div 20$  Ом;  $R_{max} = 23 \div 24$  Ом. Часть сердечников / ~10% от общего количества/ имела в ~1,5 раза худшие характеристики.

Были измерены динамические характеристики ферритовых колец марки 300НН с размерами:  $D = 180$  мм,  $d = 110$  мм,  $h = 20$  мм. На рис.6 приведены типичные осциллограммы напряжения и тока для этого случая. Измерения показали, что основные динамические характеристики этого материала следующие:  $r_m = 180$  Ом/см и  $S_w = 0,42$  мкК/см. Таким образом, среднее динамическое сопротивление одного кольца из феррита марки 300НН типоразмера К180х110х20 мм составляет  $R_{cp} \approx 15$  Ом. Если индуктор включает в себя пару таких колец, то в режиме холостого хода динамическое сопротивление одного индуктора составит ~30 Ом.

На рис.7 приведена зависимость входного сопротивления индуктора от времени в режиме холостого хода. Зависимость получена путем обработки совмещенных осциллограмм воздействующего напряжения и тока. Индуктор при этом содержал два ферритовых кольца и был выполнен по аналогии с индукторами ЕТА и АТА /5/, но с одним возбуждающим фидером.

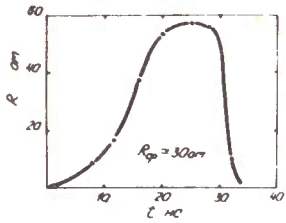


Рис.7. Зависимость динамического сопротивления ферритового сердечника /два кольца К250х170х25 мм 200НН/ от времени.

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ. ВЫВОДЫ

Представляет интерес сравнение полученных экспериментальных данных с результатами исследования феррита как заполнителя волновода при формировании мощных видеоимпульсов /6/ и с результатами исследований магнитных сердечников, предназначенных для устройств автоматики и вычислительной техники /4/.

Вначале установим общие моменты, характерные для методик, изложенных в работах /8,4/, и их различия.

Общим в обоих случаях является то, что в основу описания динамики процессов, происходящих в материале сердечников, положена спиральная модель перемангничивания. Согласно этой модели, скорость изменения относительного значения коэффициента намагниченности  $\vec{m}(t) = \vec{M}(t) / M_s$  /текущий вектор намагниченности  $\vec{M}(t)$  нормирован на намагниченность насыщения  $M_s$  / описывается уравнением

$$\frac{d\vec{m}}{dt} = \gamma [\vec{m}, \vec{H}] + \alpha [\vec{I}_0, \frac{d\vec{m}}{dt}], \quad /8/$$

где  $\gamma$  - гиромангнитное отношение,  $\alpha$  - коэффициент вязкого демпфирования,  $\vec{H}$  - вектор действующего магнитного поля,  $\vec{I}_0$  - единичный вектор в направлении спина. Для сердечников тороидальной формы с тонкой стенкой ( $D/d \rightarrow 1$ ) выражение /8/ упрощается:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{\alpha}{1 + \alpha^2} \cdot \gamma \cdot (1 - m^2) H_D. \quad /9/$$

В /4/ из соображений размерности в уравнении /9/ вводится функция, называемая приведенным динамическим сопротивлением  $r(B)$ . Аппроксимация этой функции в виде

$$r(B) = r_m (1 - m^2), \quad /10/$$

где  $r_m$  - максимальное приведенное динамическое сопротивление, дает хорошее согласие с экспериментальными данными. Величина  $r_m$  при этом определяется выражением:

$$r_m = \left( \frac{\alpha}{1 + \alpha^2} \cdot \gamma \cdot B_s \right)_{\max}. \quad /11/$$

Из /8/ и /11/ видно, что при  $\alpha \rightarrow 0$  диссипативный член исчезает, нелинейность вырождается и  $r_m \rightarrow 0$ . Теоретически возможен случай, когда  $\alpha \gg 1$ , при этом также  $r_m \rightarrow 0$ . Максимальное значение  $r_m$  получается при  $\alpha = 1$ . В этом случае

$$r_m^{\max} = \frac{\gamma}{2} \cdot B_s. \quad /12/$$

В /4/ показано, что для большинства исследованных ферритов в области сильных полей порядка  $10 \cdot H_c / H_c$  - коэрцитивная сила/ соотношение /12/ выполняется с точностью ~ 25%. В области слабых действующих полей ( $\sim H_c$ ), как правило, расчетная величина  $r_m$  оказывается больше экспериментальной. Это объясняется тем, что в области  $H_D \leq H_c$  процесс перемангничивания нельзя описывать только с помощью спиральной модели.

В /6/ связь  $m(t)$  с  $H_D$  в уравнении /9/ выражается через частоту релаксации  $\lambda$ , которая характеризует скорость переключения ферромагнитного материала. Связь между максимальным приведенным динамическим сопротивлением  $r_m$  /4/ и частотой релаксации  $\lambda$  /5/ выражается формулой

$$r_m = \lambda \cdot \mu_0. \quad /13/$$

Из анализа результатов работы /6/ видно, что для исследованных марок ферритов соотношение /13/ выполняется практически точно при изменении  $m$  от -0,5 до +0,5. Хотя для разных марок ферритов частота релаксации различна, однако все частоты релаксации лежат в интервале  $3,8 \div 8,2 \cdot 10^{10}$  Гц, при этом  $\lambda$  слабо зависит от  $m$ .

Различие в формах зависимостей  $r(m)$  /4/ и  $\lambda(m)$  /6/ связано, по-видимому, со следующим фактом. Если зависимость  $r(m)$  определяется для ферритового материала одного сердечника по совмещенным осциллограммам напряжения и тока в возбуждающем витке, то зависимость  $\lambda(m)$  определяется по длительности фронта ударной волны в нелинейной линии передачи. В последнем случае фронт ударной электромагнитной волны укладывается в несколько колец. Кроме того, амплитудные измерения тока и напряжения проще и точнее фиксировать и обрабатывать, чем анализировать разные формы фронта ударных электромагнитных волн. Зависимость  $\lambda(m)$  носит усредненный характер, поэтому в ней не наблюдается такого максимума, как у  $r(m)$ .

Анализ результатов работ /4,6/ показывает, что в области сильных действующих полей кратность диапазонов изменения как  $\lambda(m)$ , так и  $r(m)$  примерно одинакова и составляет величину  $2 \div 2,5$  для большинства исследованных марок ферритовых материалов. Таким образом, нет существенной разницы в динамических свойствах ферритовых материалов в сильных полях.

Вернемся к полученным нами результатам. Измерения показали, что величина приведенного динамического сопротивления для сердечников индукторов ЛИУ, выполненных из пермаллоя 50НП /толщина ленты  $\delta = 10$  мкм/, составляет 155 Ом/см, коэффициент переключения  $S_w = 1,8$  мкК/см. Измеренная максимальная величина приведенного динамического сопротивления примерно на порядок меньше рассчитанной для ферромагнетиков по формуле /12/. Однако это не означает, что спиральная модель перемангничивания здесь не работает.



Как указано в /7/, для сверхтонкого пермаллоя  $\alpha \gg 1$ . Неоднородность перемагничивания в случае, когда отношение  $D/d$  существенно отличается от единицы, вносит свои коррективы в измеренные значения параметров ферромагнитного материала. Причем еще одним фактором, обуславливающим отличие экспериментальных результатов от рассчитанных, является несовершенство технологии получения пермаллового материала и изготовления сердечников. Следует отметить, что полученный нами результат с точностью  $\sim 25\%$  совпадает с результатами, приведенными в /4/, где даны измеренные динамические характеристики малогабаритных сердечников.

Исследование крупногабаритных ферритовых сердечников показывает, что для марки 300НН приведенное динамическое сопротивление составляет  $r_m \approx 180 \text{ Ом/см}$ , а  $S_w = 0,42 \text{ мкК/см}$ . Сравнение этих результатов с результатами, полученными для малогабаритных сердечников /4/, показывает, что они незначительно отличаются друг от друга. Незначительное отличие измеренной величины  $r_m$  от рассчитанной говорит о том, что динамические характеристики ферритовых сердечников хорошо описываются приведенными выше уравнениями, и можно достаточно просто с инженерной точностью вычислить входное сопротивление индуктора.

Проанализирована связь между двумя подходами в определении динамических характеристик ферромагнитных материалов. Наиболее просто можно определить входное сопротивление индукторов ЛИУ, используя методику, разработанную в /4/. Зная параметры запитывающего генератора, подводящего фидера и нагрузки, можно сравнительно просто получить нагрузочную характеристику, которая даст представление о возможностях ЛИУ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Букаев П.В., Саранцев В.П. ОИЯИ, Р9-5129, Дубна, 1970.
2. Вахрушин Ю.П., Анацкий А.И. Линейные индукционные ускорители. "Атомиздат", М., 1978, с.66.
3. Gyorgy M. J.App.Phys., 1953, 29, p.1709.
4. Пирогов А.И., Шамаев Ю.М. Магнитные сердечники для устройств автоматики и вычислительной техники. "Энергия", М., 1973.
5. Regenato L. et al. IEEE Trans.Nucl.Sci., 1983, NS-30, No.4, p.2970.
6. Липатов Н.Ф., Мешков А.Н. Вопросы радиоэлектроники, серия № 6, 1970, вып.5.
7. Катаев И.Г. и др. Изв.вузов, Радиоэлектроника, 1968, т.XVI, № 4, с.399.

Рукопись поступила в издательский отдел  
10 апреля 1984 года

Казача В.И., Красных А.К.  
Измерение динамических характеристик  
ферромагнитных сердечников индукторов ЛИУ

Р9-84-231

Рассматривается возможность применения методики, развитой для измерения динамических характеристик малогабаритных ферромагнитных сердечников, к крупногабаритным ферромагнитным сердечникам индукторов ЛИУ. Приводятся результаты измерения динамической кривой перемагничивания  $\Delta B(Q_d)$ , коэффициента переключения  $S_w$  и приведенного динамического сопротивления  $r_m$  для пермаллоевых сердечников марки 50 НП /толщина ленты  $\delta = 10 \text{ мкм}$ , типоразмер  $430 \times 200 \times 25 \text{ мм}$ / и для ферритовых сердечников марки 300 НН /типоразмер  $180 \times 110 \times 20 \text{ мм}$ /. Показано, что отличие измеренных по вольт-амперным характеристикам значений максимального и среднего динамического сопротивления пермаллоевых сердечников от их рассчитанных величин не превышает  $\sim 15\%$ . Сравняются полученные экспериментальные данные с результатами исследований феррита как заполнителя волновода при формировании мощных видеопульсов и с результатами исследований ферромагнитных сердечников, предназначенных для устройств автоматики и вычислительной техники.

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1984

Перевод О.С.Виноградовой

Kazacha V.I., Krasnykh A.K.  
Measurement of Dynamic Characteristics  
of LIU Inductor Ferromagnetic Cores

Р9-84-231

The possibility of using the method developed for dynamic characteristics measurements of ferromagnetic cores with small overall dimensions, to ferromagnetic cores in LIU inductors with big overall dimensions is considered. The measurement results of the kinetic  $B-H$  curve  $\Delta B(Q_d)$ , switching coefficient  $S_w$  and reduced dynamic resistance  $r_m$  are given for 50 NP permalloy cores (the tape thickness  $\delta = 10 \text{ мкм}$ , dimensions  $430 \times 200 \times 25 \text{ мм}$ ) and for 300 NN ferrite cores (dimensions  $180 \times 110 \times 20 \text{ мм}$ ). It is shown that the difference between the maximum and mean values of the permalloy cores, kinetic resistance, measured according to volt-ampere characteristics, and their calculated values do not exceed  $\sim 15\%$ . The obtained experimental data are compared with the results of investigations on ferrite used as a waveguide filler for forming powerful videopulses, and ferromagnetic cores for automatic equipment and computers.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1984