

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ФЕРРОМАГНИТНОГО МАТЕРИАЛА ПРИ НАМАГНИЧИВАНИИ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ НАМАГНИЧИВАЮЩЕЙ СИЛОЙ

Р. А. ВАЙНШТЕЙН, Л. И. ВОРОНОВА, А. В. ШМОЙЛОВ

(Представлена научным семинаром кафедры электрических станций)

Как показано в [1], для определения постоянной составляющей и глубины модуляции индуктивности по известным параметрам катушки параметрического усилителя или для решения обратной задачи необходимо знание двух значений магнитной проницаемости, между которыми происходит периодическое изменение последней.

При этом нужно учитывать, что, например, максимальное значение дифференциальной магнитной проницаемости и другие свойства ферромагнитного материала очень сильно зависят от условий намагничивания. Практически каждому частному циклу соответствует свое значение максимальной и начальной проницаемости.

В связи с этим при измерениях желательно максимально приблизиться к действительным условиям намагничивания. Используемая здесь методика измерения динамической проницаемости в значительной степени удовлетворяет этому требованию. В основу измерения дифференциальной проницаемости положено использование напряжения на периодически изменяющейся индуктивности при протекании по ней постоянного тока. Если по периодически изменяющейся индуктивности $l(t)$ протекает постоянный ток, то напряжение на индуктивности

$$U_L = I \frac{dl(\cdot)}{dt}$$

Путем интегрирования напряжения U_L легко получить напряжение, пропорциональное $l(t)$

$$l(t) = \frac{1}{I} \int U_L dt.$$

Таким образом, для получения осциллограммы кривой динамической индуктивности в функции времени необходимо проинтегрировать напряжение U_L , что можно сделать, например, используя цепь $R_u - C_u$ с соответствующим образом подобранными параметрами.

Если на пластины электронно-лучевой трубки осциллографа подать вместо временной развертки напряжение, пропорциональное напряженности намагничивающего поля, то мы получим кривую $l(H)$, с точностью до масштабных множителей повторяющую кривую $\mu_d(H)$.

Масштаб осциллограммы дифференциальной проницаемости будет равен

$$m_1 = m_0 \frac{R_u C_u I}{2l q W^2},$$

где

m_0 — масштаб осциллографа в в/мм;
 R_u, C_u — параметры интегрирующей цепи;
 I — вспомогательный постоянный ток;
 q — площадь поперечного сечения образца;
 l — длина средней силовой линии образца;
 W — число витков измерительной обмотки.
 Схема измерений приведена на рис. 1.

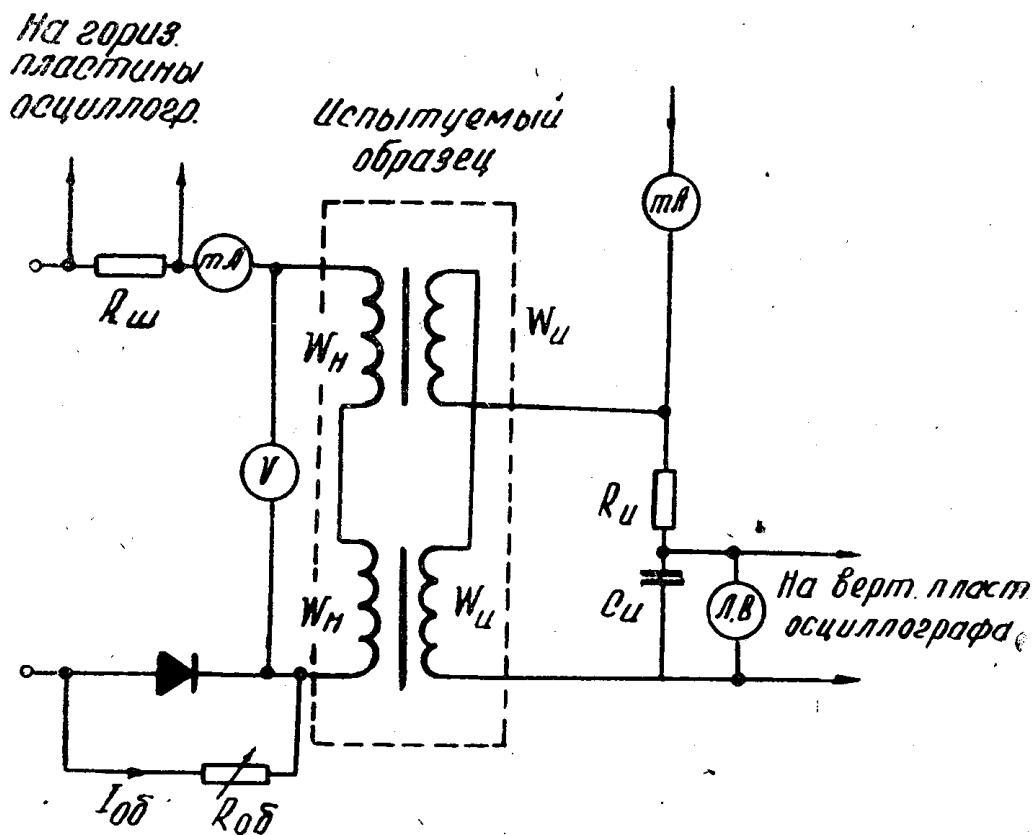


Рис. 1. Схема исследования свойств ферромагнитного материала при намагничивании периодической Н С

Хотя измерения проводятся на образце из ферромагнитного материала, который предполагается использовать для параметрического усилителя ПУ, мы будем и здесь, пользуясь терминологией, принятой в литературе, называть намагничивающий ток током накачки. Результаты измерений, которые обсуждаются ниже, получены на образце, изготовленном из трансформаторной стали УШ-12 марки Э-41, используемой нами для изготовления ПУ.

Имея напряжение, пропорциональное дифференциальной проницаемости при периодическом намагничивании образца, мы можем исследовать изменения проницаемости от величины и формы тока накачки. Нас при этом будут интересовать следующие вопросы:

1) стабильность глубины модуляции проницаемости при изменении напряжения источника тока накачки;

2) условия, при которых глубина модуляции проницаемости имеет наибольшую величину;

3) условия, при которых форма кривой дифференциальной проницаемости в функции времени $\mu(t)$ приближается к оптимальной [2].

Исследуем такие случаи:

1. Питание цепи накачки через вентиль, у которого обратным током можно пренебречь по сравнению с прямым током (рис. 2, а).

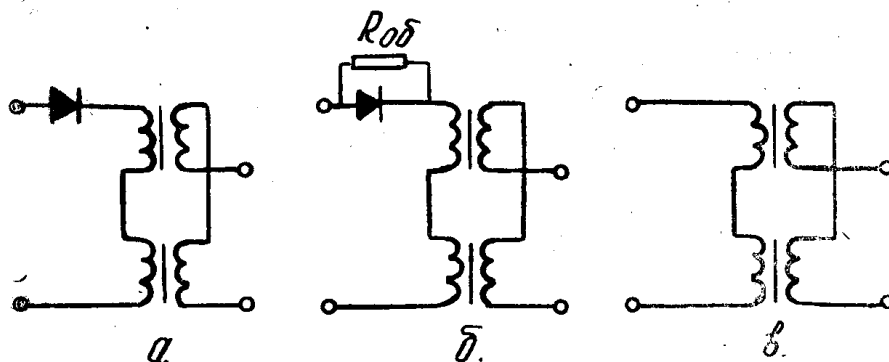


Рис. 2. Схемы образования различных условий намагничивания

На рис. 3 приведена зависимость глубины модуляции проницаемости в функции от напряжения источника тока накачки, приведенного к одному витку обмотки накачки и к единице поперечного сечения образца. Из этих кривых следует, что, начиная с удельного напряжения

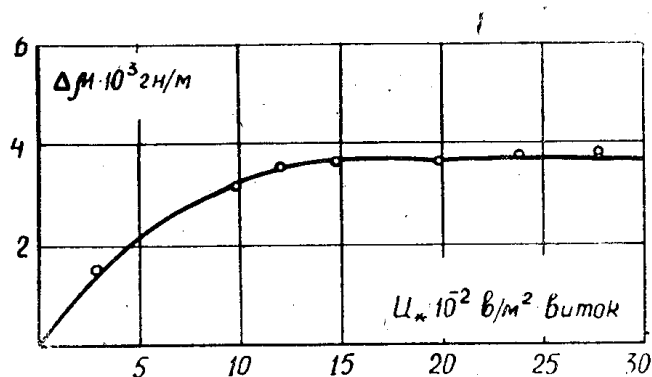


Рис. 3. Зависимость глубины модуляции проницаемости от удельного напряжения при питании цепи накачки через вентиль с пренебрежимо малым обратным током

примерно $15 \cdot 10^2$ в/м²·виток и выше, глубина модуляции проницаемости $\Delta\mu$ изменяется весьма незначительно. Форма кривой $\mu_d(t)$ также практически не изменяется, начиная с того же значения удельного напряжения накачки, что видно по осциллограммам кривой $\mu_d(t)$, снятым при $U_* = 15 \cdot 10^{-2}$ в/м²·виток и при $U_* = 27 \cdot 10^{-2}$ в/м²·виток (рис. 4). Такая относительно высокая стабильность глубины модуляции проницаемости и формы кривой $\mu_d(t)$ объясняется малой деформацией кривой $\mu_d(H)$ в ее начальной части при изменении напряжения накачки. Это проиллюстрировано осциллограммами кривой $\mu_d(H)$ на рис. 4.

2. Питание обмотки накачки через вентиль с конечным значением обратного тока.

Схема приведена на рис. 2, б. Обратный ток нужной величины создается сопротивлением $R_{об}$. При наличии обратного тока мы переходим с несимметричного цикла гистерезиса $B(H)$, целиком расположенного в первом квадранте плоскости $B-H$, на другой несимметричный цикл, на котором максимальное значение динамической проницаемости значительно больше. В то же время форма кривой $\mu_d(t)$ остается благоприятной, так как обратный ток настолько мал, что не вызывает появления заметной 2-й гармоники в кривой $\mu_d(t)$ из-за частичного перехода кривой $B(H)$ в III квадрант плоскости $B-H$.

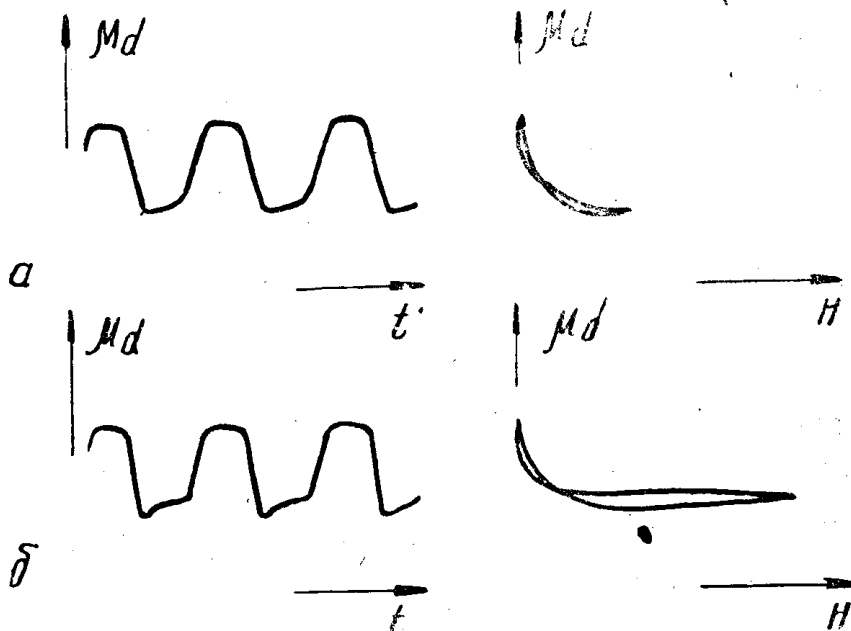


Рис. 4. Осциллограммы кривых $M_d(t)$ и $M_d(H)$
 а) при $U_* = 15 \cdot 10^2 \text{ в/м}^2 \cdot \text{виток}$,
 б) при $U_* = 27 \cdot 10^2 \text{ в/м}^2 \cdot \text{виток}$

Однако в этом случае каждому значению прямого тока соответствует одно единственное значение обратного сопротивления, при котором получаются оптимальные параметры кривой $\mu_d(t)$. Причем значение обратного тока, которому соответствует максимальное значение Δr , практически совпадает с током, при котором достигается наилучшая форма кривой $\mu_d(t)$. Из сказанного выше следует, что как глубина модуляции проницаемости, так и форма кривой $\mu_d(t)$ будут значительно изменяться при изменении напряжения накачки. Это обстоятельство ограничивает использование благоприятного влияния обратного тока теми случаями, когда напряжение источника тока накачки изменяется мало. Сказанное иллюстрируется осциллограммами. На рис. 5 приведены осциллограммы $\mu_d(t)$ при различных напряженностях поля, создаваемых обратным током, и $U_* = 20,0 \cdot 10^2 \text{ в/м}^2 \cdot \text{виток}$. Уже из этих осциллограмм видно, что существует оптимальное значение обратного тока. Искажение кривой $\mu_d(t)$ при $H_{об} > H_{опт}$ объясняется появлением второй гармоники из-за значительного перехода кривой $B(H)$ в III квадрант плоскости $B-H$. Это видно по осциллограммам кривой $\mu_d(H)$, приведенным на рис. 5.

Наличие обратного тока практически не сказывается на режиме работы источника тока накачки, так как требуемый обратный ток значительно меньше прямого тока. Например, для приведенного на рис. 5

случая при $U_* = 20,7 \cdot 10^2 \text{ в/м}^2 \cdot \text{виток}$ амплитуда напряженности прямого тока равна 9350 а/м, а оптимальная амплитуда напряженности обратного поля 71 а/м.

На рис. 6 приведены зависимости глубины модуляции проницаемости от величины напряженности обратного поля при двух значениях напряжения накачки. Для этих зависимостей характерно, что напряженность обратного поля, при которой достигается максимум $\Delta\mu$, почти не зависит от напряжения накачки. Это обстоятельство может быть использовано для определения оптимальной величины обратного сопротивления и свидетельствует о том, что при $R_{об} = \text{const}$ оптимальные условия питания цепи накачки будут нарушаться при изменении напряжения накачки. Это обстоятельство еще раз иллюстрируется на рис. 7, где приведена зависимость глубины модуляции проницаемости от напряжения накачки при $R_{об} = \text{const}$. Как и следовало ожидать, стабильность $\Delta\mu$ здесь низкая. Для этих кривых характерно наличие максимума по U_* , положение которого зависит от величины обратного сопротивления.

Следует заметить, что условия параметрического усиления на нисходящей ветви кривой $\Delta\mu(U_*)$ хуже, чем на восходящей из-за искажения ее формы второй гармоникой.

3. Питание цепи накачки симметричным периодическим током (рис. 2, в).

В этом случае перемагничивание сердечников происходит по симметричному циклу, поэтому частота изменения индуктивности в два раза больше частоты тока накачки. При таком режиме питания цепи накачки возможно параметрическое усиление и генерирование колебаний с частотой, равной частоте тока накачки. На рис. 8 приведена зависимость $\Delta\mu(U_*)$. Степень стабильности глубины модуляции проницаемости здесь ниже, чем в случае 1. Абсолютная величина $\Delta\mu$ здесь также меньше. Кроме того, форма кривой $\mu_d(t)$ здесь значительно отклоняется от прямоугольной. На рис. 9 приведены осциллограммы кривых $\mu_d(t)$ и соответствующие им

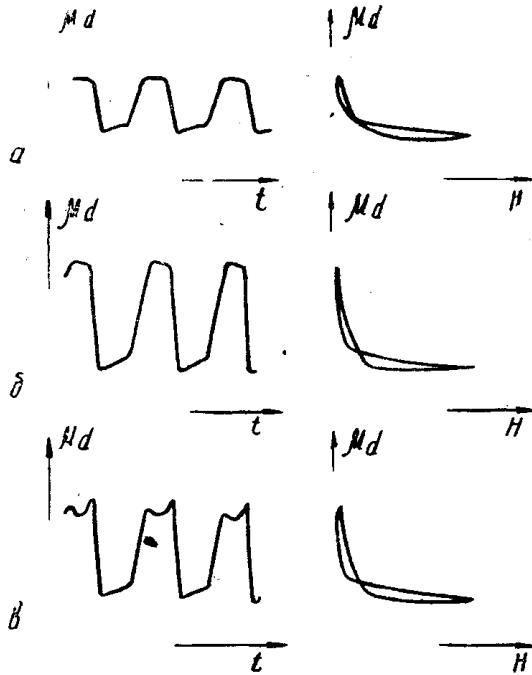


Рис. 5. Осциллограммы кривых $\mu_d(t)$ и $\mu_d(H)$ при $U_* = 20 \cdot 10^2 \text{ в/м}^2 \cdot \text{виток}$.
 а) при $H_{об} = 0$,
 б) при $H_{об} = H_{опт} = 71 \text{ а/м}$,
 в) при $H_{об} = 120 \text{ а/м}$

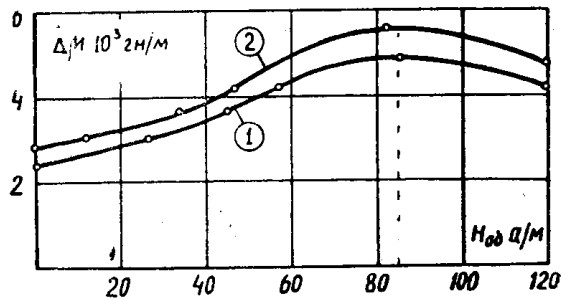


Рис. 6. Зависимость глубины модуляции проницаемости от величины напряженности обратного поля.

1 — $U_* = 9 \cdot 10^2 \text{ в/м}^2 \cdot \text{виток}$,
 2 — $U_* = 20 \cdot 10^2 \text{ в/м}^2 \cdot \text{виток}$

1 — $U_* = 9 \cdot 10^2 \text{ в/м}^2 \cdot \text{виток}$,
 2 — $U_* = 20 \cdot 10^2 \text{ в/м}^2 \cdot \text{виток}$

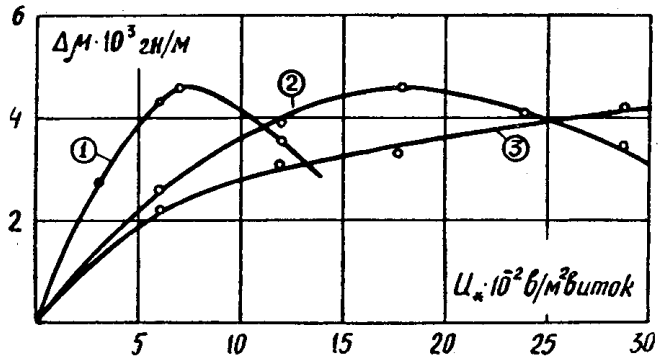


Рис. 7. Зависимость глубины модуляции проницаемости от удельного напряжения накачки.
 1 — при $R_{об} = 15 \text{ ком}$,
 2 — при $R_{об} = 50 \text{ ком}$,
 3 — при $R_{об} = 100 \text{ ком}$

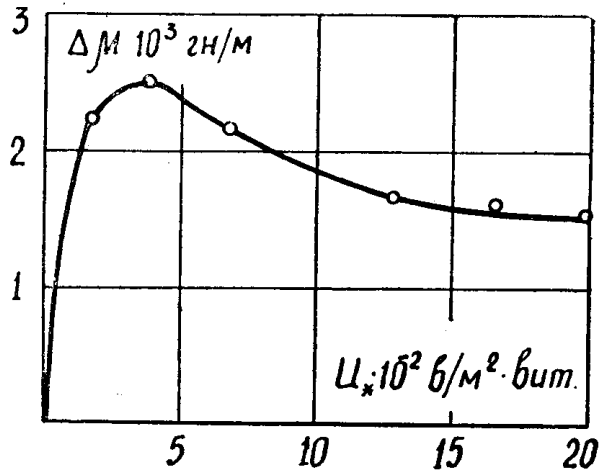


Рис. 8. Зависимость глубины модуляции проницаемости от удельного напряжения накачки при питании симметричным периодическим током

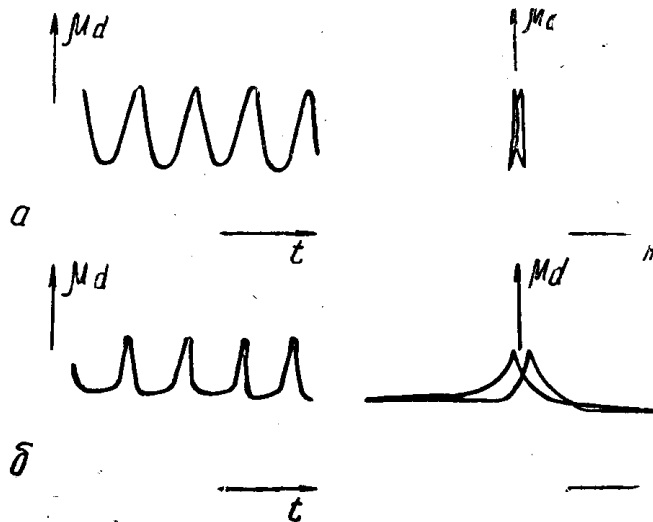


Рис. 9. Осциллограммы кривых $\mu d(t)$ и $\mu d(H)$ при питании цепи накачки симметричным периодическим током
 а) при $U_* = 3.5 \cdot 10^2 \text{ в/м}^2 \cdot \text{виток}$,
 б) при $U_* = 20 \cdot 10^2 \text{ в/м}^2 \cdot \text{виток}$

осциллограммы $\mu_a(H)$ при напряжении накачки, соответствующем максимуму $\Delta\mu$ и при $U_* = 20,0 \cdot 10^2$ в/м² · виток.

Выводы

1. Наибольшая стабильность глубины модуляции проницаемости наблюдается при питании цепи накачки через вентиль с очень большим обратным сопротивлением.

2. Достигается значительное увеличение глубины модуляции проницаемости без изменения мощности, потребляемой цепью накачки, путем установки соответствующего обратного тока. Стабильность $\Delta\mu$ в этом режиме значительно ниже.

3. В режимах питания по п. 1 и 2 форма кривой изменения индуктивности близка к прямоугольной.

4. При намагничивании симметричным периодическим током стабильность $\Delta\mu$ низкая. Форма кривой значительно отличается от прямоугольной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Р. А. Вайнштейн. Параметрический усилитель. Авторское свидетельство № 178862 с приоритетом от 15.12.1964.
2. Н. В. Зернов, В. Г. Карпов. Теория радиотехнических цепей. «Энергия», 1965.