

РАСЧЕТ МАГНИТНЫХ ЦЕПЕЙ ЛИНЗ ЭЛЕКТРОННЫХ МИКРОСКОПОВ

В. А. Коноваленко

Сумы

Дан расчет проводимости в щели полюсного наконечника электронного микроскопа и по параметру формы полюсного наконечника найдены его размеры.

Расчет магнитной цепи электронного микроскопа позволяет определить следующие величины:

- 1) магнитный поток, соответствующий заданной силе линзы, в щели полюсного наконечника;
- 2) внешний диаметр цилиндрической части полюсного наконечника, соответствующий заданному параметру формы;
- 3) внутренний и внешний диаметры уширенной части полюсного наконечника;
- 4) критические сечения в магнитопроводе;
- 5) магнитную индукцию в критических сечениях — в целях выяснения вопроса о насыщении материала в этих сечениях.

Особенность расчета магнитной цепи электронного микроскопа состоит в сочетании намагничивающей силы, сосредоточенной в щели полюсного наконечника, с параметром формы, предварительно заданным.

Как правило, полюсные наконечники изготавливаются из пермендюра, а магнитопровод — из различных сортов стали или пермаллоя. Для расчета необходимо иметь кривые намагничивания материалов, выражающих магнитную индукцию как функцию напряженности магнитного поля. Исходными уравнениями при расчете магнитных цепей являются для узла магнитной цепи [1]

$$\Sigma \Phi = 0, \quad (1)$$

и для замкнутого контура

$$\Sigma j = \Sigma \Phi R_m, \quad (2)$$

где Φ — магнитный поток;
 j — намагничивающая сила;
 R_m — магнитное сопротивление.

Пусть задан симметричный полюсный наконечник, у которого шири-

на щели $S = 2$ мм, а внутренний диаметр $b = 4$ мм. Параметр формы такого наконечника

$$P = \frac{S}{b} = 0,5.$$

Будем исходить из того, что распределение магнитной индукции вдоль оси z подчиняется закону

$$B(z) = \frac{B_0}{1 + \frac{z^2}{a^2}}. \quad (3)$$

Здесь B_0 — максимальное значение магнитной индукции на оси;
 a — параметр, связанный с полушириной простого колоколообразного поля d соотношением

$$a = \frac{d}{\sqrt{\nu \left(2^{\frac{1}{\nu}} - 1 \right)}}; \quad (4)$$

ν — характеристический показатель, зависящий от параметра формы полюсного наконечника и связанный с функцией $f(\nu)$ [2].

Известно, что сила линзы

$$k_v^2 = \frac{2,2 \cdot 10^{10} B_0^2 d^2}{\nu \left(2^{\frac{1}{\nu}} - 1 \right) u^*}, \quad (5)$$

где u^* — ускоряющее напряжение с учетом релятивистской поправки, в. Кроме того [2],

$$B_0 d = \frac{\mu_0 I}{f(\nu)}. \quad (6)$$

Подставляя (6) в формулу силы линзы (5), получаем

$$k_v^2 = \frac{2,2 \cdot 10^{10} \mu_0^2 I^2}{f^2(\nu) \nu \left(2^{\frac{1}{\nu}} - 1 \right) u^*}. \quad (7)$$

В нашем примере $P = 0,5$ и этому параметру соответствуют [2]

$$\nu = 3,8, f(\nu) = 2,232, \nu \left(2^{\frac{1}{\nu}} - 1 \right) = 0,76, \mu_0 = 12,56 \cdot 10^{-7} \text{ в} \cdot \text{сек/ам}.$$

Подставив эти величины в формулу (7), получим

$$k_v^2 = 9,2 \cdot 10^{-3} \frac{I^2}{u^*}. \quad (8)$$

Принятое ускоряющее напряжение $u = 100\,000$ в с учетом релятивистской поправки $u^* = 110\,000$ в. Исходя из практических соображений, создаем магнитную линзу необходимой силы.

Пусть $k_v^2 = 0,9$. Из формулы (10) находим намагничивающую силу. Она равна 3260 ас. Максимальное значение магнитной индукции на оси линзы определяем из (5):

$$B_0 = \frac{\sqrt{\nu \left(2^{\frac{1}{\nu}} - 1 \right)} \sqrt{k_v^2 u^*}}{1,48 \cdot 10^5 d}. \quad (9)$$

Подставив в (9) значение [3]

$$d = \frac{S}{f(\nu) th \frac{a'S}{2b}}, \quad (10)$$

где a' — нуль функции Бесселя ($a' = 2,4048$), получаем

$$B_0 = \frac{f(v) \sqrt{\left(2^{\frac{1}{v}} - 1\right)} i k \frac{a'S}{2b} \sqrt{k^2 u^*}}{1,48 \cdot 10^5 S} \quad (11)$$

Зная, что $S = 2 \cdot 10^{-3}$ м, $f(v) = 2,232$, $\sqrt{\left(2^{\frac{1}{v}} - 1\right)} = 0,8718$, $i k \frac{a'S}{2b} = 0,537$, $k^2 = 0,9$, $u^* = 110\,000$ в и подставляя эти значения в (11), имеем :

$$B_0 = 1,1 \text{ в.сек/м}^2.$$

В щели полюсного наконечника магнитная индукция [4]

$$B_p = \frac{B_0}{1 - e^{-1,7 \frac{S}{b}}}. \quad (12)$$

Она составляет $B_p = 1,92 \text{ в.сек/м}^2$.

Напряженность магнитного поля в щели полюсного наконечника

$$H_p = \frac{B_p}{\mu_0} = \frac{1,92}{12,56 \cdot 10^{-7}} = 1,53 \cdot 10^6 \text{ а/м}. \quad (13)$$

Магнитный поток в щели полюсного наконечника

$$\Phi = GH_p S, \quad (14)$$

где G — проводимость в щели полюсного наконечника.

В связи с тем, что в настоящее время отсутствуют аналитические способы определения проводимости, некоторые авторы [1] исходя из идеи подобия на основании математической обработки многочисленных опытных данных получили для проводимости зазора, образованного плоскими концами цилиндрических полюсов, формулу

$$G = \mu_0 \left(\frac{\pi b^2}{4S} + 0,58 \epsilon \right), \quad (15)$$

где b — диаметр торца цилиндра;

S — воздушный зазор.

Для полюсных наконечников электронных микроскопов в центральной области формирования магнитного поля зазор можно считать образованным плоскими концами полых цилиндрических полюсов.

Если внешний диаметр симметричного полюсного наконечника обозначить через b_1 , а внутренний через b_2 , то площадь торца полюсного наконечника определится как

$$Q = \frac{\pi}{4} (b_1^2 - b_2^2), \quad (16)$$

а проводимость в щели полюсного наконечника

$$G = \mu_0 \left[\frac{\pi (b_1^2 - b_2^2)}{4S} + 0,58 \sqrt{b_1^2 - b_2^2} \right]. \quad (17)$$

Формула (17) может быть использована только при условии, что торцы полюсных наконечников имеют форму полых цилиндров.

На практике большинство полюсных наконечников имеет вид, указанный на рис. 1, и, следовательно, пользуясь формулой (17), мы фактически определяем проводимость только в центре зазора, ограниченного параллельными плоскостями колец торцов башмаков полюсных наконечников. Магнитный поток за этими пределами формулой (17) не определяется.

Для того, чтобы устранить этот недостаток, проводимость в щели можно находить с учетом картины плоскомеридианного поля, строя поверхности, ограничивающие трубки магнитной индукции и эквипотен-

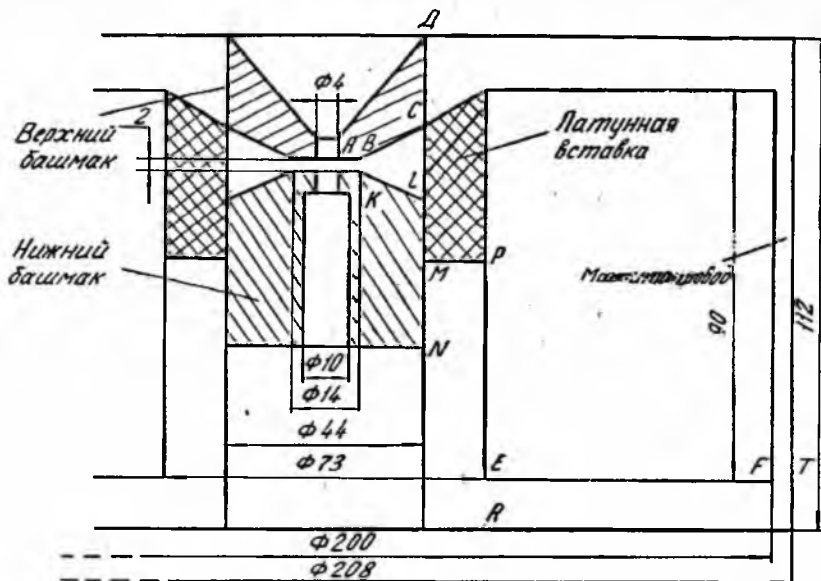


Рис. 1. Магнитная линза.

циальные поверхности. Такое построение осуществляется на основании следующего закона: в плоскомеридианном поле поверхности, ограничивающие трубки магнитной индукции, и эквипотенциальные поверхности являются взаимортогональными поверхностями вращения.

Поскольку процесс разделения воздушного зазора происходит в пространстве, в секущей плоскости, проходящей через ось вращения, получаются клетки, имеющие среднюю ширину и среднюю длину, измеряемую вдоль направления линии магнитной индукции. Все пространство в щели полюсного наконечника можно считать разбитым на m трубок индукции и n колец в трубке.

Для облегчения построения картины поля будем задавать радиус R , на котором должны располагаться клетки, имеющие форму криволинейных квадратов (рис. 2). Тогда проводимость в щели полюсного наконечника [1]

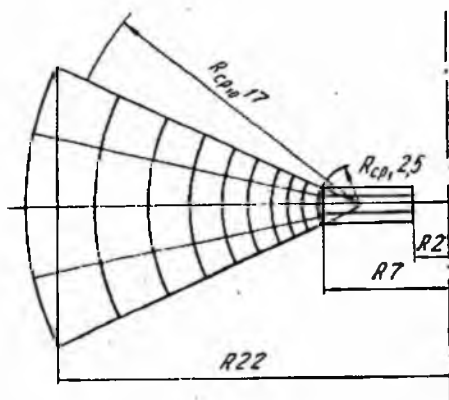


Рис. 2. Картина плоскомеридианного поля в уширенной части щели полюсного наконечника: $m = 10$, $n = 4$, $R_{cp} = 9,75$ мм.

$$G = \mu_0 2\pi R_{cp} \frac{m}{n}, \quad (18)$$

где R_{cp} — средний радиус,

$$R_{cp} = \frac{R_{cp1} + R_{cpm}}{2}.$$

Общий магнитный поток в воздушном зазоре определяем, зная общую проводимость и магнитодвижущую силу, так как произведение $H_p S$ можно заменить j . Эта замена оправдывается, так как в электронных микроскопах 99% н.с. приходится на щель полюсного наконечника и, следовательно,

$$\Phi = Gj. \quad (19)$$

Известно, что магнитная индукция

$$B = \frac{\Phi}{Q}. \quad (20)$$

Подставив (19) в (20), получим

$$B = \frac{Gj}{Q}. \quad (21)$$

Если в выражение (21) подставить значение величин, выраженных формулами (16) и (17), то получим магнитную индукцию, выраженную через размеры полюсного наконечника и намагничивающую силу.

Тогда

$$B = \frac{\mu_0 \left[\frac{\pi (b_1^2 - b_2^2)}{4S} + 0,58 \sqrt{b_1^2 - b_2^2} \right]}{\frac{\pi}{4} (b_1^2 - b_2^2)} j. \quad (22)$$

После упрощения (22) и решения относительно b_1 получим

$$b_1 = \sqrt{\left[\frac{2,32\mu_0 j S}{\pi (SB - j\mu_0)} \right]^2 + b_2^2}. \quad (23)$$

Так как предел насыщения пермендюра равен $2,3 \text{ в} \cdot \text{сек}/\text{м}^2$, значение магнитной индукции в формуле (22) можно принять равным $2,25 \text{ в} \cdot \text{сек}/\text{м}^2$. Остальные величины известны: $\mu_0 = 12,56 \cdot 10^{-7} \text{ в} \cdot \text{сек}/\text{ам}$, $j = 3260 \text{ ав}$, $S = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $b_2 = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. После подстановки в (23) известных величин и упрощения, имеем $b_1 = 14 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 14 \text{ мм}$.

Для определения проводимости в щели полюсного наконечника необходимо рассчитать размеры его уширенной части. Площадь уширенной части полюсного наконечника представляет боковую поверхность усеченного конуса

$$Q_{\text{кон}} = \frac{\pi}{2} (D_1 l_1 - D_2 l_2), \quad (24)$$

где D_1 и D_2 — соответственно диаметры нижнего и верхнего оснований усеченного конуса;

l_1 — образующая конуса;

l_2 — образующая усеченной части конуса.

Диаметр верхнего основания усеченного конуса равен внешнему диаметру цилиндрической части полюсного наконечника: $D_2 = b_1 = 14 \text{ мм}$. Угол заточки полюсного наконечника $\alpha = 25^\circ$, высота усеченного конуса $h = 7 \text{ мм}$.

Таким образом,

$$\frac{D_1 - D_2}{2} = h \operatorname{ctg} \alpha, \quad (25)$$

$$D_1 = 2 \cdot 7 \operatorname{ctg} 25^\circ + 14 = 44 \text{ мм}.$$

Образующая конуса

$$l_1 = \frac{D_1}{2 \cos \alpha}, \quad (26)$$

$$l_1 = 24,3 \text{ мм}.$$

Образующая усеченной части конуса

$$l_2 = \frac{D_2}{2 \cos \alpha} = 7,7 \text{ мм}. \quad (27)$$

Проводимость в щели между параллельными торцами башмаков полюсного наконечника мы определяем по формуле (17), а проводимость в уширенной части полюсного наконечника — по формуле (18).

Величины, которые следует подставить в выражение (17), следующие: $\mu_0 = 12,56 \cdot 10^{-7}$ в.сек/ам; $b_1 = 0,014$ м; $b_2 = 0,004$ м, $S = 0,002$ м.

После подстановки и вычисления получим

$$G_{AB} = 9,8 \cdot 10^{-8} \text{ в.сек/а.}$$

Проводимость в уширенной части полюсного наконечника определяется по формуле (18). Из рис. 2 следует, что $R_{ср.} = 0,00975$ м, $m = 10$, $n = 4$.

Таким образом, согласно (18)

$$G_{BC} = 1,92 \cdot 10^{-7} \text{ в.сек/а.}$$

Общая проводимость

$$G = G_{AB} + G_{BC} = 2,9 \cdot 10^{-7} \text{ в.сек/а.}$$

Общий магнитный поток согласно (19)

$$\Phi = Gj = 2,9 \cdot 10^{-7} \cdot 3260 = 9,45 \cdot 10^{-4} \text{ в.сек.}$$

Магнитный поток в щели полюсного наконечника, ограниченного параллельными башмаками полюсных наконечников,

$$\Phi_{AB} = G_{AB}j = 9,8 \cdot 10^{-8} \cdot 3260 = 3,2 \cdot 10^{-4} \text{ в.сек.}$$

Назовем критическими сечения kL и MN , для которых определим магнитную индукцию, предварительно определив площади этих сечений.

Площадь кольца kL находим по формуле (16)

$$Q_{kL} = \frac{3,14(44^2 - 10^2)}{4} = 1441,26 \text{ мм}^2,$$

$$Q_{kL} = 1,44 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Площадь кольца MN при выходе магнитного потока из полюсного наконечника в магнитопровод представляет боковую поверхность цилиндра диаметром $D_1 = 44$ мм и высотой $MN = 20$ мм:

$$Q_{MN} = \pi DH, \quad (28)$$

$$Q_{MN} = 3,14 \cdot 44 \cdot 20 = 2760 \text{ мм}^2 = 2,76 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Магнитная индукция в сечении kL полюсного наконечника:

$$B_{kL} = \frac{\Phi}{Q_{kL}} = \frac{9,45 \cdot 10^{-4}}{1,44 \cdot 10^{-3}} = 0,656 \text{ в.сек/м}^2. \quad (29)$$

В сечении MN магнитная индукция

$$B_{MN} = \frac{\Phi}{Q_{MN}} = \frac{9,45 \cdot 10^{-4}}{2,76 \cdot 10^{-3}} = 0,342 \text{ в.сек/м}^2. \quad (30)$$

Магнитная индукция в сечениях AB и ABC полюсного наконечника не проверяется, так как размеры этих сечений определены исходя из значений магнитной индукции, равной $2,3$ в.сек/м², и, следовательно, насыщения в этих сечениях быть не может.

Из выражений (29), (30) следует, что магнитная индукция в критических сечениях полюсного наконечника и на стыке его с магнитопроводом не достигает насыщения, поскольку магнитная индукция насыщения в пермендуре составляет $2,3$ в.сек/м², а в электротехнической стали марки Э — $1,5$ в.сек/м². Размеры магнитопровода, изготовленного из электротехнической стали, оцениваются исходя из площади окна обмотки [1]. Площади сечений на всех участках магнитопровода должны быть такими, чтобы мог свободно проходить магнитный поток, равный Φ , который, как было показано, зависит от параметра формы полюсного наконечника. Напряженность магнитного поля в магнитопроводе, кроме

щели полюсного наконечника, не вычислялась, так как несложно найти напряженность магнитного поля по магнитной индукции и кривой намагничивания материала.

При определении размеров магнитопровода по заданному параметру формы полюсного наконечника нет необходимости рассчитывать намагничивающую силу на каждом участке магнитопровода в силу того, что основная часть п. с. сосредоточена в щели полюсного наконечника и зависит от параметров магнитной линзы.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. В. Гордон, А. Г. Сливинская. Электрsmагниты постоянного тока. Госэнергоиздат, 1960.
2. В. Глазер. Основы электронной оптики. Гостехтеоретиздат, 1957.
3. В. А. Коноваленко. Определение оптических параметров электронных линз магнитостатических микроскопов в зависимости от размеров полюсных наконечников. «Оптико-механическая промышленность», 1963, № 1.
4. З. Лейзенганг. Электронная микроскопия. Изд-во иностр. лит., 1960.
5. Электронная микроскопия (под ред. акад. А. А. Лебедева). Гостехтеоретиздат, 1954.

ИЗМЕРЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ ЦЕМЕНТНЫХ СЫРЬЕВЫХ ШЛАМОВ

А. Я. Левчинский, О. Д. Орлова

Харьков

При мокром способе приготовления цемента исходное сырье (глина и известняк) предварительно измельчается в водной среде, образуя мслкодисперсную смесь материала и воды — шлам. Глиняный и меловой шламы смешиваются в определенной пропорции, усредняются в специальных бассейнах и поступают в печь для обжига. Увеличение влажности шлама на 1% приводит к перерасходу топлива на 2%. В связи с этим возникает задача определения влажности по крайней мере на двух этапах технологического передела: приготовление сырьевой смеси и обжиг сырья.

Шлам представляет собой смесь окислов кальция, алюминия, железа и кремния. Ориентировочно химический состав его можно представить так: Al_2O_3 — 1 — 5%, CaO — 15 — 55, Fe_2O_3 — 0,5 — 5, SiO_2 — 5 — 25%. В отдельных случаях для коррекции химического состава в шлам добавляются пиритные огарки — до 2,5% общего веса твердого и сульфито-спиртовая барда, являющаяся разжижителем. Удельный вес компонент (сухих): глина — $2,400 \pm 0,012 \text{ г/см}^3$; известняк — $2,600 \pm 0,013$; огарки — $3,50 \pm 0,02$.

Наличие больших усреднительных емкостей предопределяет относительно медленное изменение влажности и температуры сырьевых шламов. Среднее значение влажности шлама для большинства заводов составляет 37 — 45%, колебания влажности сырьевых шламов — до 2%, однокомпонентных — 3 — 4%. Это предъявляет определенные требования к разрешающей способности и точности разрабатываемой аппаратуры.

При измерениях была принята методика определения влажности по изменению коэффициента затухания амплитуды колебаний волны СВЧ, прошедших через образец. Попытки использования для этой цели отраженного сигнала не дали положительного результата вследствие незначительных изменений амплитуды и фазы сигнала при изменении влажности.