

# Электрический реактор

## С ПОДМАГНИЧИВАНИЕМ ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ

**Электрический реактор представляет собой индуктивную катушку, используемую в силовой электрической цепи для накопления и передачи магнитной энергии. Заметим, что в слаботочной электрической цепи индуктивную катушку называют дросселем и применяют с целью увеличения электрического сопротивления, устраняя или ограничивая переменную составляющую тока. В колебательном контуре используется добротность индуктивной катушки, и ее в этом случае называют катушкой индуктивности.**

Юрий Стародубцев

yunstar@mail.ru

Как правило, электрический реактор состоит из магнитопровода с нанесенной на него обмоткой. Иногда реактор имеет две обмотки, например в схеме обратного преобразователя. В ней через первичную обмотку двухобмоточного реактора в некоторый интервал времени проходит нарастающий ток, который способствует накоплению магнитной энергии в реакторе, поскольку вторичная обмотка в это время разомкнута. В следующий интервал времени, наоборот, первичная обмотка замыкается, а вторичная замыкается, и уже через нее протекает ток, связанный с изменением (снижением) магнитной индукции в магнитопроводе. Таким образом, работа первичной и вторичной обмоток двухобмоточного реактора разделены во времени, а фактически эти обмотки индуктивно не связаны между собой, поэтому такое электротехническое устройство нельзя назвать трансформатором.

В настоящей статье будет рассмотрен однообмоточный электрический реактор, через который протекает переменный ток  $I_m$  (А) и постоянный ток подмагничивания  $I_0$ . В этом реакторе магнитная энергия накапливается и отдается через одну и ту же обмотку с числом витков  $w$ . Магнитопровод изготовлен из магнитного материала с относительной магнитной проницаемостью  $\mu$ . Считаем, что магнитная проницаемость материала является постоянной вплоть до некоторого численного значения магнитной индукции  $B_{\max}$  (Тл), которое обычно соответствует изгибу на кривой намагничивания при приближении к магнитному насыщению.

Рассмотрим идеальный случай, когда весь магнитный поток, созданный обмоткой с током, сосредоточен внутри магнитопровода, а собственная емкость электрического реактора пренебрежимо мала. Тогда индуктивность обмотки электрического реактора  $L$  (Гн) можно выразить в виде соотношения:

$$L = (\mu\mu_0 S w^2) / l_{\text{ср}}, \quad (1)$$

где  $S$  — площадь поперечного сечения магнитопровода ( $\text{м}^2$ ),  $l_{\text{ср}}$  — средняя длина магнитной силовой линии (м),  $\mu_0$  — магнитная постоянная, равная  $4\pi \times 10^{-7}$  (Гн/м). Напомним, что формула (1) позволяет точно вычислить индуктивность обмотки, нанесенной на маг-

нитопровод, у которого магнитные силовые линии имеют примерно одинаковую длину. При этом чем толще стенка магнитопровода, тем меньше точность результата, полученного из этой формулы.

Закон полного тока для постоянной и переменной составляющих можно записать в виде:

$$H_0 l_{\text{ср}} = I_0 w, \quad (2)$$

$$H_m l_{\text{ср}} = I_m w, \quad (3)$$

где  $H_m$  — максимальная напряженность магнитного поля переменного тока (А/м),  $H_0$  — напряженность магнитного поля постоянного тока.

Обычно перед расчетом известны численные значения следующих величин: переменного тока  $I_m$ , постоянного тока подмагничивания  $I_0$ , индуктивности обмотки  $L$  (Гн), частоты переменной составляющей  $f$  (Гц), допустимой температуры перегрева реактора  $\Delta T$ . В результате расчета необходимо выбрать материал магнитопровода, типоразмер магнитопровода и его относительную магнитную проницаемость  $\mu$ , а также число витков обмотки  $w$  и диаметр провода  $d_{\text{пр}}$ .

По определению максимальное значение допустимой магнитной индукции в магнитопроводе должно соответствовать условию:

$$B_{\max} \geq B_m + B_0, \quad (4)$$

где магнитная индукция постоянного тока:

$$B_0 = \mu\mu_0 H_0 \quad (5)$$

и максимальная магнитная индукция переменного тока:

$$B_m = \mu\mu_0 H_m, \quad (6)$$

Из (2) и (5) находим:

$$\mu\mu_0 = (B_0 l_{\text{ср}}) / (I_0 w) \quad (7)$$

и после подстановки в (6) получаем соотношение:

$$B_m = B_0 (I_m / I_0). \quad (8)$$

Последнее выражение позволяет представить (4) в виде:

$$B_{\max} \geq B_0(1 + I_m/I_0), \quad (9)$$

тогда соответствующее ограничение для постоянной составляющей магнитной индукции:

$$B_0 \leq B_{\max}/(1 + I_m/I_0), \quad (10)$$

в правой части этого выражения стоят величины с известными численными значениями, если предварительно был сделан выбор магнитного материала магнитопровода.

Найдем наиболее удобные для расчета формулы. Запасенная магнитная энергия электрического реактора  $w_0$  (Дж), выраженная через магнитные величины:

$$w_0 = ((B_0 H_0)/2) V = (B_0^2 S l_{cp})/2\mu\mu_0. \quad (11)$$

После подстановки  $H_0$  из (2) получаем запасенную магнитную энергию электрического реактора, выраженную через электрические величины:

$$w_0 = ((\mu\mu_0 H_0^2)/2) V = (\mu\mu_0/2)(I_0 w/l_{cp})^2 S l_{cp} = L I_0^2/2. \quad (12)$$

Из сравнения (11) и (12) находим отношение объема магнитопровода к относительной магнитной проницаемости:

$$V/\mu = (\mu_0 L I_0^2)/B_0^2. \quad (13)$$

После подстановки (7) в (1) получаем выражение для произведения площади поперечного сечения магнитопровода на число витков обмотки:

$$S w = (L I_0)/B_0. \quad (14)$$

В правой части выражений (13) и (14) стоят величины с известными численными значениями, а в левой части — те величины, численные значения которых необходимо найти. Естественно, что эту систему уравнений нельзя решить однозначно. Приходится на основе личного опыта выбирать тип материала магнитопровода, а это в соответствии с формулой (10) дает нам численное значение максимально допустимой постоянной магнитной индукции  $B_0$ . Объем найдем из формулы (13) для нескольких номинальных значений магнитной проницаемости, например 90, 140, 200, 250, которые поставят выбранный нами производитель данного материала. Остановиться следует на численном значении пары величин  $V$  и  $\mu$ , учитывая, что наибольшую плотность магнитной энергии  $W_0$  (Дж/м<sup>3</sup>):

$$W_0 = (B_0 H_0)/2 = B_0^2/(2\mu\mu_0) \quad (15)$$

при заданном значении магнитной индукции имеют магнитопроводы с более низкой относительной магнитной проницаемостью.

Для выбранного объема подбирается магнитопровод подходящего типоразмера, для

которого вычисляется площадь поперечного сечения магнитопровода, а из формулы (14) — соответствующее число витков обмотки реактора. Пара численных значений  $w$  и  $S$  подбирается так, чтобы коэффициент заполнения окна кольцевого магнитопровода проводом обмотки:

$$k_m = (S_{пр} w)/S_{ок} \quad (16)$$

не превышал 0,2. В формуле (16) обозначены:  $S_{пр}$  — площадь поперечного сечения провода обмотки;  $S_{ок} = \pi d^2/4$  — площадь окна магнитопровода;  $d$  — внутренний диаметр кольцевого магнитопровода. Диаметр провода  $d_{пр}$  можно выбрать из условия, что плотность тока в проводе не превышает численного значения  $2,5 \times 10^6$  А/м<sup>2</sup>.

Расчет можно считать законченным, если переменная составляющая тока мала. В противном случае необходимо учитывать температуру перегрева реактора  $\Delta T$ . Поверхность реактора рассеивает в окружающую среду мощность:

$$P_{рас} = \alpha \Delta T S_T, \quad (17)$$

где  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи, численное значение которого равно 12 Вт/(м<sup>2</sup>·град) при естественной конвекции в интервале температуры 20...50 °С,  $S_T$  — площадь поверхности трансформатора, равная для кольцевого магнитопровода:

$$S_T = k l_{cp} (D - d + 2h), \quad (18)$$

где  $D$  — наружный диаметр магнитопровода,  $h$  — высота магнитопровода,  $k$  — коэффициент увеличения площади поверхности трансформатора по сравнению с площадью поверхности магнитопровода, обычно равный примерно 1,5. Источником нагрева являются магнитные потери в магнитопроводе  $p_m$  (Вт), связанные с переменной составляющей магнитной индукции, и потери в обмотке  $p_{об}$  (Вт) при прохождении через нее электрического тока:

$$I = I_0 + I_m/\sqrt{2}. \quad (19)$$

Потери в обмотке:

$$p_{об} = (P w/S_{пр}) \rho l_{вит}, \quad (20)$$

где  $\rho = 1,7 \times 10^{-8}$  Ом·м — удельное электрическое сопротивление медного провода при температуре +20 °С;  $l_{вит}$  — средняя длина одного витка провода. При необходимости вводится коэффициент, учитывающий увеличение удельного электрического сопротивления с ростом температуры, и коэффициент увеличения удельного электрического сопротивления, связанный со скин-эффектом [1].

Если принять, что потери в магнитопроводе и обмотке равны, то условие теплового равновесия реактора можно записать в виде:

$$2p_m = \alpha \Delta T S_T. \quad (21)$$

Удельные магнитные потери  $P$  (Вт/м<sup>3</sup>) часто представляют в виде зависимости от частоты  $f$  (Гц) и максимальной магнитной индукции  $B_m$  (Тл):

$$P = 2rf^{\beta} B_m^{\delta}, \quad (22)$$

поэтому условие (21) принимает вид:

$$2PV = 2rf^{\beta} B_m^{\delta} V = \alpha \Delta T S_T. \quad (23)$$

Из него можно найти допустимую максимальную магнитную индукцию, при которой температура перегрева реактора не превышает заданного значения:

$$B_m = [(\alpha \Delta T S_T)/(2rf^{\beta} V)]^{1/\delta}. \quad (24)$$

За корректировкой численного значения  $B_m$  последует изменение численного значения постоянной магнитной индукции  $B_0$  в соответствии с соотношением (8).

Следует заметить, что справочные формулы для расчета магнитных потерь обычно приводятся для синусоидальной формы магнитной индукции без подмагничивания постоянным током. При наличии постоянной составляющей тока петля магнитного гистерезиса становится несимметричной. Однако если максимальная магнитная индукция ( $B_0 + B_m$ ) не переходит за изгиб кривой намагничивания, то такая асимметрия слабо влияет на удельные магнитные потери. В качестве примера на рис. 1 представлена зависимость удельных магнитных потерь  $P_{0,01/100}$  (максимальная магнитная индукция — 0,01 Тл, частота — 100 кГц) от постоянной составляющей магнитной индукции  $B_0$  в магнитопроводе из нанокристаллического сплава 414 [1]. Видно, что заметный рост удельных магнитных потерь начинается только выше изгиба кривой намагничивания  $B_0 > 0,9$  Тл.

В источниках вторичного питания часто применяют переменное напряжение прямоугольной формы. По сути, такое напряжение можно представить в виде последовательности знакопеременных импульсов длительностью  $\tau_n$  с периодом  $T$  и скважностью  $q$ :

$$q = T/2\tau_n. \quad (25)$$

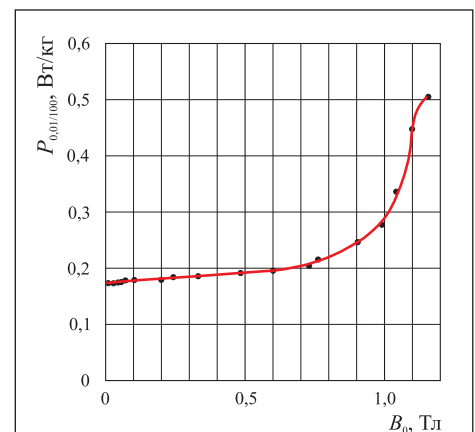
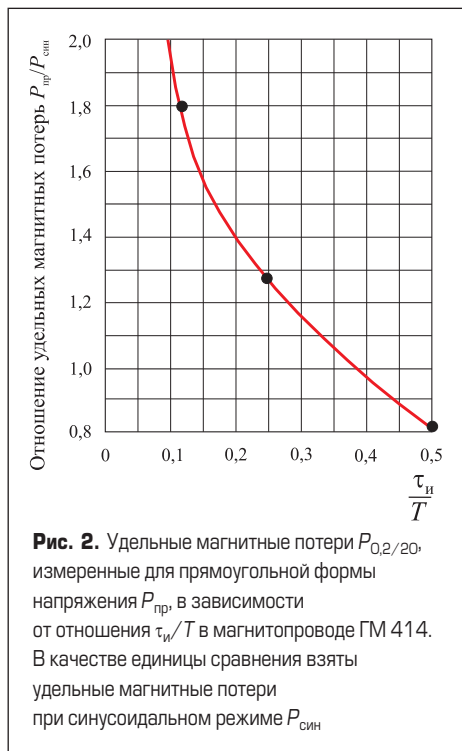


Рис. 1. Зависимость удельных магнитных потерь  $P_{0,01/100}$  от постоянной составляющей магнитной индукции  $B_0$  в магнитопроводе из нанокристаллического сплава 414



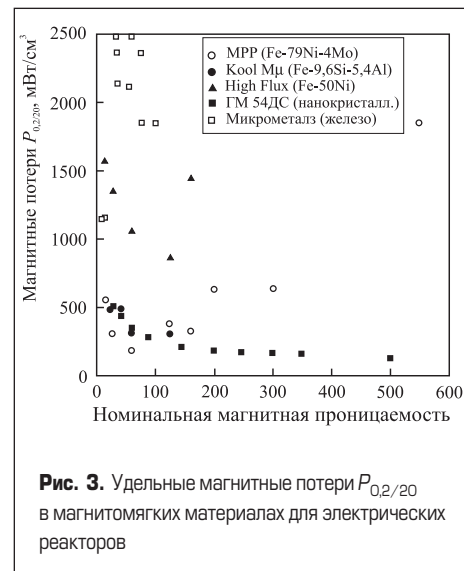
На рис. 2 показаны результаты измерения удельных магнитных потерь при частоте 20 кГц и максимальной магнитной индукции 0,2 Тл в магнитопроводе ГМ 414 при синусоидальном режиме  $P_{сн}$  и для прямоугольной формы напряжения  $P_{пр}$  с разным отношением  $\tau_n/T$ . Видно, что заметное расхождение (более 20%) удельных магнитных потерь при синусоидальном и прямоугольном режимах перемагничивания наблюдается для коэффициента скважности более 2. Поэтому использование аналитических выражений удельных магнитных потерь, полученных при синусоидальной форме напряжения, ограничено допустимо также для прямоугольной формы напряжения.

Чтобы получить высокую запасенную магнитную энергию в электрическом реакторе, магнитопровод должен иметь низкую относительную магнитную проницаемость, обычно  $\mu < 1000$ , поскольку эта энергия обратно пропорциональна  $\mu$  (11). Низкую магнитную

проницаемость получают за счет создания в магнитопроводе немагнитного зазора. Этот зазор может быть распределенным (в магнитодиэлектриках) или сосредоточенным (в магнитопроводах с разрезом). В качестве магнитного материала магнитодиэлектриков используют порошковые материалы: железо, кремнистое железо (Fe-6,5Si), молибденовый пермаллой (Fe-79Ni-4Mo), железоникелевый сплав (Fe-50Ni), альсифер (сендаст, Fe-9Si-6Al). В качестве магнитопроводов с разрезом используют электротехническую сталь, магнитомягкие железоникелевые сплавы, ферриты, аморфные и нанокристаллические сплавы. В таблице представлены некоторые физические свойства магнитодиэлектриков и магнитопроводов с разрезом (ГМ 54ДС из нанокристаллического сплава). Все данные соответствуют средним по объему значениям указанных величин.

На рис. 3 приведены удельные магнитные потери  $P_{0,2/20}$  при частоте 20 кГц и максимальной магнитной индукции 0,2 Тл, взятые из справочных данных разных производителей. В магнитопроводах с относительной магнитной проницаемостью менее 100 наименьшие удельные потери имеют магнитодиэлектрики из молибденового пермаллоя МРР, а наиболее высокие — магнитодиэлектрики из порошкового железа. Повышение магнитной проницаемости в магнитодиэлектриках достигается за счет укрупнения размера частиц, утончения диэлектрической прослойки, что приводит к ухудшению изоляции частиц и повышению магнитных потерь на вихревые токи.

Качественно другая зависимость наблюдается у магнитопроводов ГМ 54ДС, имеющих два разреза. Наиболее высокие магнитные потери имеют магнитопроводы с низкой магнитной проницаемостью, которая достигается за счет большого немагнитного зазора. Именно с ним связаны значительные магнитные поля рассеяния и дополнительные потери на вихревые токи. Уменьшение немагнитного зазора и соответствующее увеличение магнитной проницаемости приводит к непрерывному снижению магнитных потерь. Магнитопровод с разрезом имеет еще одно немаловажное пре-



имущество: он может иметь большой размер и использоваться в мощных силовых преобразователях.

**Заключение**

Приведены основные формулы для расчета электрического реактора с подмагничиванием постоянным током и рассмотрен один из вариантов расчета реактора. Показано, что справочные данные для удельных магнитных потерь, полученные в режиме синусоидальной магнитной индукции, в определенных пределах можно использовать для оценки температуры перегрева реактора, работающего в других режимах. Приведена оценка магнитных свойств магнитопроводов для электрических реакторов, показаны преимущества и недостатки магнитопроводов с распределенным и сосредоточенным немагнитным зазором.

**Литература**

1. Стародубцев Ю. Н. Теория и расчет трансформаторов малой мощности. М.: РадиоСофт, 2005.

**Таблица.** Физические свойства магнитопроводов для электрических реакторов

Марка, производитель	Материал	Относительная магнитная проницаемость	Магнитная индукция насыщения $B_s$ , Тл	Точка Кюри $T_c$ , °C	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент линейного термического расширения $\times 10^6$ , К <sup>-1</sup>
MPP, Magnetics (США)	Fe-79Ni-4Mo	14–550	0,75	460	8700	12,9
High Flux, Magnetics (США)	Fe-50Ni	14–160	1,5	500	8200	5,8
Kool Mμ, Magnetics (США)	Fe-9Si-6Al	26–125	1,05	500	7000	10,8
Fe-Si, Arnold Magnetic Technologies (США)	Fe-6,5Si	14–147	1,5	>500	6500	–
Micrometals (США)	Fe	10–100	>1,8	>700	до 7000	10–12
ГМ 54ДС, «Гаммамет» (РФ)	FeCuNbMoSiB	30–1000	0,8	600	5200	–