

УДК 621.314

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ  
МАГНИТОПРОВОДА В ТРАНСФОРМАТОРАХ**

Ковзан А.А., Коротченко С.Н.

Научный руководитель – ассистент Протасеня М.Л.

Потери в силовых трансформаторах и автотрансформаторах составляют существенную долю (до 20%) общих потерь электроэнергии в электрических сетях и являются одной из составляющих нормативов технологических потерь электроэнергии на ее передачу.

Основными электрическими параметрами силового трансформатора, характеризующими экономичность его работы, являются потери холостого хода (ПХХ) и короткого замыкания (ПКЗ). При изучении проблем потерь электроэнергии в силовых трансформаторах рассмотрим их основные причины. Потери холостого хода возникают вследствие перемагничивания активной стали сердечника. Они являются постоянной составляющей полных потерь мощности и зависят не от нагрузки трансформатора, а от качества трансформаторной стали (марки, толщины), технологии изготовления магнитной системы, качества проектирования магнитопровода и материальной базы. По этой причине ПХХ являются наиболее значимыми, и для уменьшения потерь энергии, следует стремиться уменьшать в первую очередь потери холостого хода.

По магнитным свойствам вещества делятся на: **диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики.**

Особыми магнитными свойствами обладают вещества, называемые **ферромагнетиками. Ферромагнетики** – вещества, которые значительно усиливают внешнее магнитное поле. **Магнитная проницаемость** ферромагнитных материалов может достигать значений в несколько сотен тысяч, то есть ферромагнитные материалы способны усиливать внешнее магнитное поле в сотни тысяч раз.

**Ферромагнитными свойствами обладают** железо, никель, кобальт и некоторые сплавы.

**Ферромагнетики**, в которых внешнее поле усиливается благодаря сложению собственных магнитных полей электронов, обладают значительно большей магнитной проницаемостью, чем парамагнетики. **Магнитная проницаемость ферромагнетика**  $m = B/H$  непостоянна и зависит от напряженности магнитного поля.

В зависимости от величины потерь на перемагничивание, форм петли гистерезиса, ферромагнитные материалы подразделяются на магнитомягкие и магнитотвердые. Магнитомягкие материалы (электротехнические стали, железоникелевые сплавы, ферриты) имеют малые потери в сердечнике и применяются в устройствах, предназначенных для работы при переменных магнитных потоках (трансформаторы, электродвигатели и др.). Магнитотвердые материалы (углеродистые стали, вольфрамовые сплавы и др.) используются для изготовления постоянных магнитов.

Петля гистерезиса представляет собой кривую намагничивания ферромагнетиков. Если первоначально ненамагниченное вещество намагнитить до насыщения (начальная кривая), а затем уменьшать и потом снова увеличивать напряженность магнитного поля, то изменение индукции не будет следовать начальной кривой.

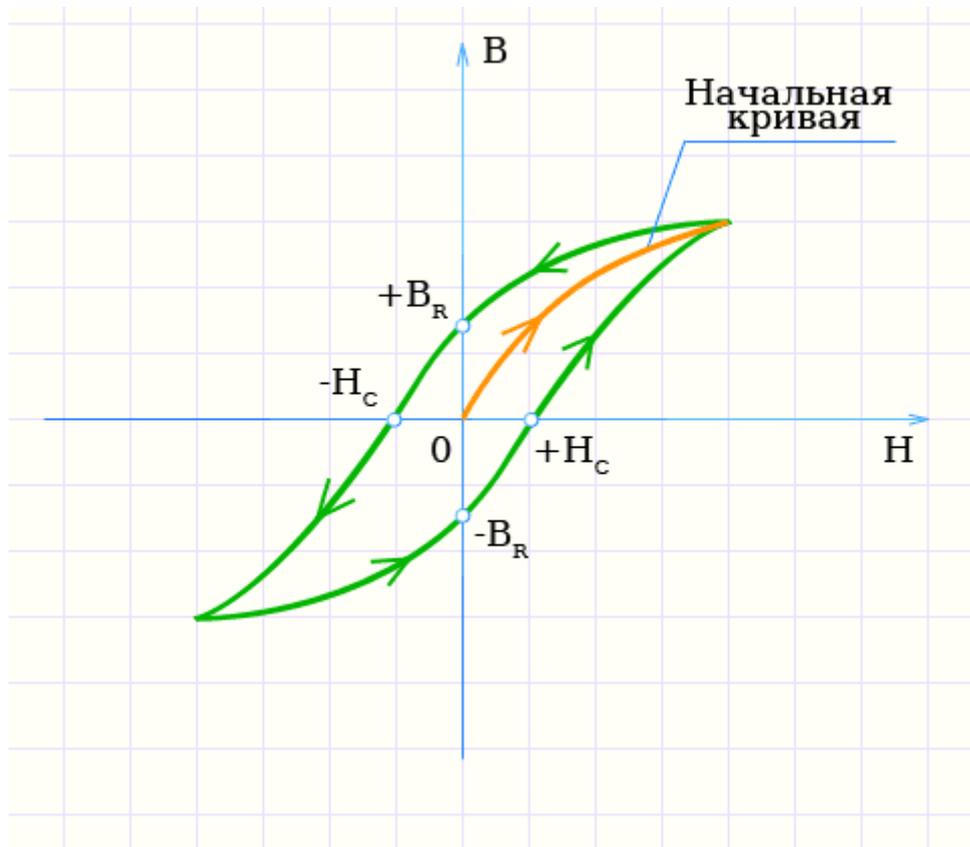


Рисунок 1 – Петля гистерезиса

Разберем основные составляющие петли гистерезиса.

Начальная кривая намагничивания - кривая намагничивания предварительно размагниченого ферромагнетика ( $B=0$ ;  $H=0$ ) при плавном изменении магнитной напряженности  $H$ . Представляет собой зависимость  $B(H)$  и близка к основной кривой намагничивания.

Коэрцитивная (задерживающая) сила - напряженность магнитного поля  $H_c$ , необходимая для доведения магнитной индукции в предварительно намагниченом ферромагнетике до нуля. Остаточная индукция - значение индукции магнитного поля  $B_R$  при равной нулю напряженности магнитного поля. В справочной литературе обычно дается для предельного цикла.

Магнитопровод или сердечник трансформатора позволяет более эффективно преобразовывать напряжение, уменьшая при этом потери. Для изготовления сердечников используют специальную ферромагнитную сталь.

Конструктивно сердечники разделяют на:

- стержневые;
- броневые;
- тороидальные.

Стержневой сердечник имеет вид буквы П. Обмотки насаживаются на стержни, а сами стержни соединяются ярмом. Такая конструкция магнитопровода позволяет легко осматривать и ремонтировать обмотки. Поэтому такой тип характерен для средних и мощных трансформаторов.

Броневой сердечник Ш-образной формы. Обмотки находятся на центральном стержне. Броневые трансформаторы сложнее в производстве. И ремонтировать обмотки в них сложнее.

Тороидальный сердечник имеет вид кольца с сечением прямоугольной формы. Обмотки наматываются прямо на него. Поэтому этот тип сердечников считается самым энергетически эффективным.

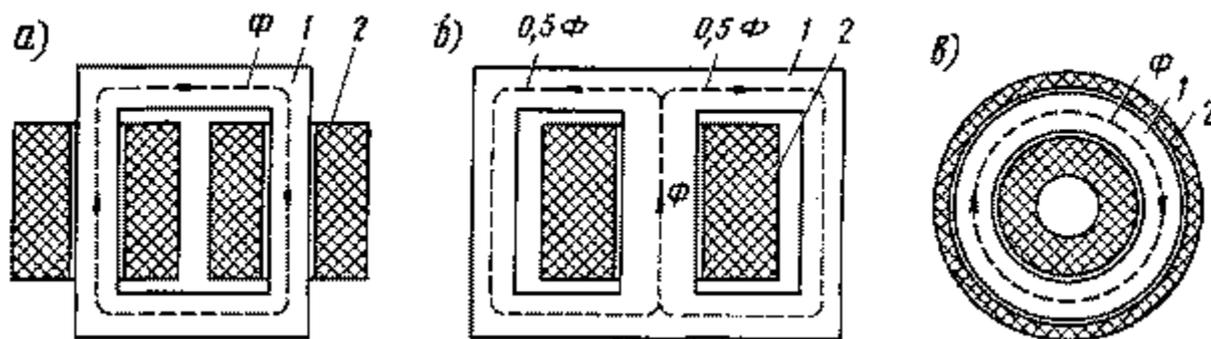


Рисунок 2 – Конструктивное исполнение магнитопровода: 1- сердечник, 2 – обмотка. а – стержневой сердечник, б – броневой сердечник, в – тороидальный сердечник.

В работающем трансформаторе на сердечник воздействует переменное магнитное поле. В результате вокруг сердечника возникают вихревые токи. Из-за них магнитопровод нагревается – то есть часть полезной энергии уходит в тепло.

На потери из-за перемагничивания влияет:

- характер материала сердечника. Чем проще намагничивается металл, тем проще его перемагнитить и тем меньше потери в трансформаторе;
- частота перемагничивания;
- максимальное значение магнитной индукции.

Чтобы снизить потери, для производства сердечников используют сталь с выраженными магнитными свойствами. Такой материал требует меньше энергии на перемагничивание.

В монолитных проводниках вихревые токи приобретают максимальные значения из-за небольшого сопротивления. Следовательно, чтобы уменьшить потери в трансформаторе, нужно увеличить сопротивление материала сердечника. Производители силовых трансформаторов нашли выход: они набирают магнитопровод из металлических листов. Стальные пластины для сердечника берутся не более 0,5 мм толщиной.

Чтобы действительно снизить сопротивление вихревым токам в сердечнике, металлические пластины нужно изолировать. Для этого производители трансформаторов используют лак и окалину. Прослойка не дает влиять вихревым токам на магнитный поток в сердечнике. Поэтому потери снижаются.

Производители собирают пластины двумя способами:

- встык – при этом собирается сам сердечник, потом на него насаживаются обмотки и только после этого все скрепляется ярмом в единую

- конструкцию;
- впереплет (шихтованные сердечники) – когда каждый следующий ряд пластин перекрывает стыки на предыдущем.

Встык магнитопровод проще монтировать, но уровень потерь в них выше, чем у шихтованных сердечников. Поэтому большим спросом пользуются шихтованные трансформаторы.

Также на потери в трансформаторах сильно влияют материалы, используемые для изготовления магнитопровода.

Листовая электротехническая сталь - основной магнитно-мягким материал массового использования. Наличие кремния повышает удельное сопротивление, что снижает потери на вихревые токи, способствует выделению углерода в виде графита, а также почти полному раскислению стали. Это дает увеличение  $\mu$ , уменьшение  $H$  и снижение потерь на гистерезис. Но кремний ухудшает механические свойства железа, увеличивает его хрупкость и затрудняет прокатку в листы и штамповку. При содержании кремния до 4% сталь обладает еще достаточно хорошими механическими свойствами, но при содержании кремния выше 5% она становится очень хрупкой. Путем комбинированной горячей и холодной прокатки кремнистой стали и особой термической обработки можно изготовить текстурованную сталь крупнокристаллического строения. Магнитные свойства такой стали в направлении прокатки значительно выше, чем стали, не подвергавшейся подобной обработке.

Пермаллой - это железоникелевые сплавы, обладают весьма большой начальной магнитной проницаемостью в области слабых полей, что связано с практическим отсутствием у них анизотропии и магнитострикции. Различают высоконикелевые и низконикелевые пермаллои. Высоконикелевые пермаллои содержат 72—80% Ni, низконикелевые 40—50% Ni. Наибольшим значением максимальной магнитной проницаемости обладает сплав, содержащий 78,5% Ni. Магнитные свойства пермаллоев чувствительны к внешним механическим напряжениям, зависят от химического состава и наличия инородных примесей в сплаве, а также очень резко меняются от режимов термообработки материала. (температуры, скорости нагрева и охлаждения, состава окружающей среды и т. д.).

Альсиферы — сплавы железа с кремнием и алюминием. Оптимальный состав альсифера: 9,5% Si, 5,6% Al, остальное Fe. Такой сплав отличается твердостью и хрупкостью, но может быть изготовлен в виде фасонных отливок. Основные свойства альсифера:  $\mu=35\ 500$ ,  $\mu_{\text{макс}}=120\ 000$ ,  $H_c=18\ \text{А/м}$ ,  $\rho=0,8\ \text{мкОм}\cdot\text{м}$ , т.е. не уступают свойствам высоконикелевых пермаллоев. Изделия из альсифера: магнитные экраны, корпуса приборов и т. д. — изготавливаются методами литья с толщиной стенок не менее 2—3 мм из-за хрупкости сплава. Из-за хрупкости альсифера его можно размалывать в порошок и использовать наряду с карбонильным железом для изготовления высокочастотных прессованных сердечников.

После анализа вышеизложенного можно сделать вывод, что уменьшение мощности потерь холостого хода (потерь в магнитопроводе), очевидно, связано с изменением конструкции и материала магнитопровода. Наиболее перспектив-

ный путь снижения затрат на производство и эксплуатацию силовых распределительных трансформаторов - это применение магнитопроводов из аморфных (нанокристаллических) сплавов, при этом обеспечивается более чем пятикратное снижение потерь холостого хода трансформаторов по сравнению с магнитопроводами из холоднокатаной электротехнической стали. Перемагничивание ферромагнитного материала связано с расходом энергии на этот процесс. Как уже указывалось, площадь петли гистерезиса характеризует энергию, выделяемую в единице объема ферромагнетика за один цикл перемагничивания.

#### Литература

1. Богородицкий Н. П., Пасынков В. В., Тареев Б. М. Электротехнические материалы: Учебник для вузов. — 7-е изд., перераб. и доп.—Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985. — 304 с.
2. Кацман, М. М. Электрические машины: учебник [для учреждений среднего профессионального образования] / М. М. Кацман. - 15-е изд., стер. - Москва: Академия, 2016. - 492 с.
3. Шевчик Н. Е. Электрические машины: учебное пособие для средних специальных учебных заведений / Н. Е. Шевчик, Г. Д. Подгайский. - Минск: Дизайн ПРО, 2000.