

Ветроэнергетическая сфера, как все новое, требует немалых усилий и затрат для становления. И, конечно, деятельности одних только энтузиастов здесь явно недостаточно. Необходимы также адекватные и мудрые действия государственных органов управления. Основными препятствиями к развитию ветроэнергетики в Беларуси как путем внедрения зарубежной ветротехники континентального базирования, так и посредством организации производства собственных ВЭУ остаются проблемы финансирования работ по созданию ВЭУ и ВЭС, тарифной и налоговой политики, отсутствия льгот при закупке и эксплуатации ветроэнергетического оборудования, стандартизации и сертификации продукции.

### Литература

1. Методические указания по обоснованию и разработке схемы размещения площадок под ветроэнергетические установки на территории Республики Беларусь. Т. 1: Отчет о НИР / НИПИ «Белэнергосетьпроект»; Рук. В.Г. Пекелис. – № 12488-02. – Минск: НИПИ «Белэнергосетьпроект», 1995.
2. Формирование информационного банка данных по ветроэнергетическому потенциалу в зонах предполагаемого внедрения ветроустановок: Отчет о НИР 06.4.1 ГНТП «Городское хозяйство» / НППГ «Ветромаш»; Рук. Г.П. Шадурский. – Минск: НППГ «Ветромаш», 1998.
3. Методика оценки ветроэнергетического потенциала в конкретных условиях местности на территории Республики Беларусь: Отчет о НИР 06.4.1 ГНТП «Городское хозяйство» / НППГ «Ветромаш». – Минск: НППГ «Ветромаш», 1998.
4. Лаврентьев Н.А., Жуков Д.Д. Белорусская ветроэнергетика – реалии и перспективы // Энергия и менеджмент. – 2002. – № 3. – С. 12–17
5. Лаврентьев Н.А., Жуков Д.Д. Белорусская ветроэнергетика – реалии и перспективы // Энергия и менеджмент. – 2002. – № 4. – С. 10–12.
6. Лаврентьев Н.А., Жуков Д.Д. Основные виды возобновляемой энергии. Потенциал Беларуси // Энергетика и ТЭК. – 2003. – № 7. – С. 8–12.

УДК 621.3

## ЯВЛЕНИЕ СКИН-ЭФФЕКТА В ПРОВОДНИКАХ

Адамцевич В.А., Гуца Т.Г.

Научный руководитель – СЧАСТНАЯ Е.С.

Скин-эффект – частный случай эффекта близости, который основывается на генерации токов под действием переменного магнитного поля в проводниках.

На рисунке 1 пунктиром показаны вихревые токи в сердечнике катушки, которая включена в цепь переменного тока  $I$ ; указанное направление вихревых токов соответствует моменту увеличения магнитной индукции  $B$ , создаваемой в сердечнике током.

Глубина скин-слоя  $X$  определяется как расстояние ниже поверхности, где амплитуда синусоидального тока в проводнике уменьшается в  $e$  раз от значения на поверхности ( $e$  – основание натурального логарифма) с фазовой задержкой в один радиан.

Сейчас нас интересуют материалы, которые используются для тоководов, а это медь (Cu) и алюминий (Al). Их относительная магнитная проницаемость равна 1.

Глубина проникновения электромагнитного поля определяется по формуле:

$$\Delta = \sqrt{\frac{\rho}{\mu_0 \mu \pi f}}, \text{ см,}$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление, Ом/см;

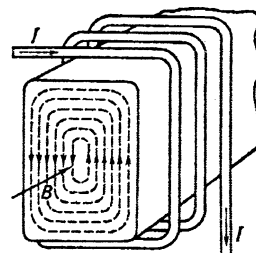


Рис. 1

$\mu$  – относительная магнитная проницаемость материала, для меди (Cu) и алюминия (Al) равна 1;

$\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума, равная  $1,256 \cdot 10^{-8}$  Гн·см<sup>-1</sup>;

$f$  – частота, Гц.

На рисунке 2б показаны результаты расчетов распределения поля в проводнике (рисунок 2а) в виде зависимостей модуля отношения комплексной амплитуды напряженности электрического поля внутри проводника  $E_m$  и на обеих сторонах проводника

$E_{m0}$  от нормированного расстояния  $\frac{z}{d}$  для различных соотношений между толщиной скин-слоя в металле  $\Delta$  и от толщины проводника  $d$ . Рисунок иллюстрирует физическую сущность поверхностного эффекта, а также очень важный факт: наличие скин-эффекта в проводнике зависит от его размера.

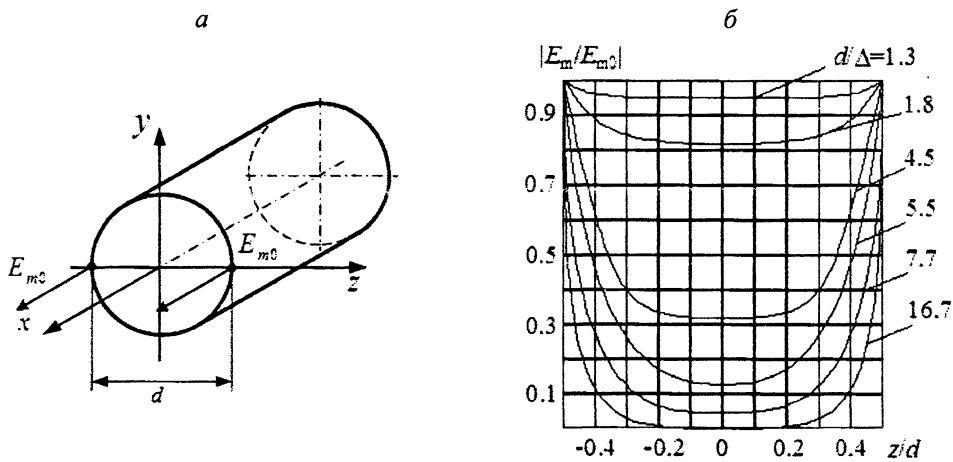


Рис. 2

На рисунке 3 показана эффективность использования площади сечения цилиндрического проводника. Здесь  $X_0$  – глубина проникновения электромагнитного поля.

С ростом частоты  $X_0$  уменьшается. Уменьшается и площадь проводника, по которой течет ток. В этом случае рабочая площадь определяется как:

$$S = S_D - S_d = \pi \frac{D^2 - d^2}{4}, \text{ мм.}$$

Отрицательное действие скин-эффекта проявляется в том, что:

- центральная часть токопроводящего слоя не участвует в переносе электрических зарядов, что вызывает повышенное сопротивление проводника электрическому току, и проводники просто греются;

- скин-эффект в металлических проводах и в обкладках конденсаторов приводит к медленному перераспределению подвижных электронов от центра к поверхности, вследствие чего возникают нежелательные эффекты направленности и «притирки» кабелей, а в конденсаторах усиливается эффект «памяти»;

- химические соединения металла токопроводящего слоя с кислородом и азотом воздуха, образующиеся на поверхности провода в результате коррозии, обладают диэлектрическими и полупроводниковыми свойствами, что, в свою очередь, способствует росту потерь и искажений;

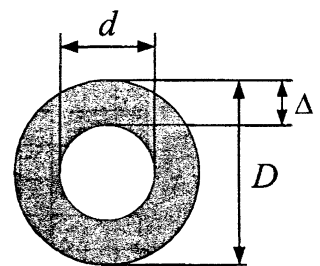


Рис. 3

– в случае широкополосного сигнала, где мгновенная частота с трудом поддается описанию, скин-эффект вызывает беспорядок в размещении подвижных электронов по поперечному сечению проводника;

– в цифровых импульсных устройствах, например компьютерах, из-за скин-эффекта в медных проводниках печатных плат и разъемов искажается форма коротких импульсов, что приводит к срывам синхронизации, сбоям в регистрации импульсов.

Эффект близости, в частности скин-эффект, вызывающий потери в проводниках трансформатора и дросселей на высоких частотах, хорошо поддается теоретическому вычислению.

Для упрощения расчета потерь заменим круглый проводник на квадратный эквивалентного сечения. Процедура определения потерь в обмотках при несинусоидальном токе состоит из определения гармонического состава тока и сопротивления обмотки на переменном токе для каждой гармоники. Полные потери есть сумма произведений  $I^2 R$  на каждой частоте, включая и нулевую. Тогда эффективное сопротивление есть отношение мощности полных потерь к квадрату действующего значения тока в проводнике.

Коэффициент сопротивления  $K_r$  является отношением сопротивления на переменном токе (для любой формы тока) к сопротивлению на постоянном токе. Его использование позволит учесть влияние различных высот проводника (при разных гармонических частотах) на полные потери, и тем самым повысить точность расчетов.

Значение  $K_r$  может быть рассчитано или определено по заранее составленным номограммам для различных комбинаций из формы тока, высоты проводника и числа слоев. Вычисление эффективного сопротивления можно свести тогда к определению сопротивления обмотки на постоянном токе, умножению этого сопротивления на отношение высоты проводника к глубине скин-слоя и на соответствующий коэффициент  $K_r$  для данной высоты проводника при выбранной форме тока. Полные потери в обмотке будут определяться тогда произведением квадрата действующего значения тока на эффективное сопротивление.

На рисунках 4 и 5 изображены зависимости коэффициента сопротивления от фактической высоты проводника, приведенной к глубине скин-слоя на низшей гармонике, и времени фронта (рисунок 4), и числа слоев (рисунок 5), для однополярного прямоугольного импульса.

Из рисунка 4 получаем, что при уменьшении времени фронта амплитуды высокочастотных гармоник и их число возрастают, а потери устойчиво растут. На рисунке 5 приведены аналогичные рисунку 4 зависимости для обмоток с числом слоев от 1 до 10 при времени фронта 0,5 %. Заметим, что при увеличении высоты (толщины) проводника, коэффициент сопротивления первоначально снижается, достигает какого-то минимального значения при некоторой «оптимальной» толщине проводника, а затем увеличивается.

Данные о потерях для разнополярной прямоугольной формы тока имеют тот же характер при оптимальной толщине, что и для однополярного импульса. Следует заметить, что оптимальная толщина меньше, чем для однополярной формы тока, однако коэффициент сопротивления больше.

На рисунке 6 представлена зависимость коэффициента сопротивления от высоты и числа слоев при треугольной форме тока. Когда в обмотке протекает постоянная составляющая тока, минимум потерь сдвигается в сторону большей толщины проводника. Может произойти исчезновение минимума, если постоянная тока будет иметь значительную величину. Например, для двухслойной обмотки это произойдет, если постоянная составляющая будет составлять 70 % от размаха переменной составляющей.



Магнитное поле вообще менее интенсивно на концах, что могло бы приводить к небольшому снижению потерь. Если же в качестве сердечника используется магнитопровод закрытого типа, то дивергенция поля и соответствующие потери «свертываются».

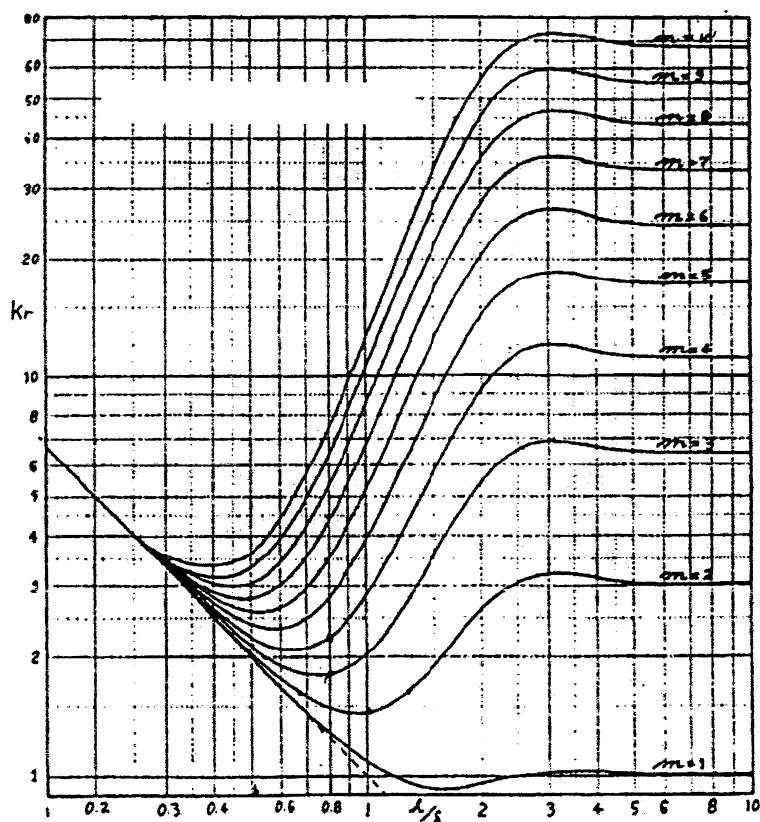


Рис. 6

#### *Эффект зазора в сердечнике магнитопровода.*

Трансформатор или дроссель, имеющий воздушный зазор (зазоры), создает дополнительные потери от вихревых токов, обычно состоящие из двух составляющих. Первая – из-за сильного магнитного поля, которое сосредоточено около зазора, пересекает проводник вблизи зазора и вызывает вихревые токи. Вторая – из-за менее интенсивного, но более обширного магнитного поля, созданного магнитодвижущей разностью потенциалов сердечника на каждой стороне зазора.

#### *Эффект внешнего проводника.*

Любой дополнительный проводящий материал, расположенный в области сильного магнитного поля трансформатора или дросселя, вызывает появление в нем вихревых токов, и, следовательно, дополнительные потери мощности. Это могут быть: толстые экраны, выводы, крепежные детали или другие моточные элементы.

На высоких частотах в обмотке оптимальной толщины могут еще оставаться очень высокими потери. Можно применить ряд методов проектирования различной эффективности, позволяющих дополнительно снизить высокочастотные потери в проводниках.

### Литература

1. Фридман Б.Э. Скин-эффект в массивных проводниках электроимпульсных установок. Массивные проводники в электрических цепях // Журнал технической физики. Т. 72, вып. 9. – 2002. – С. 52–56.
1. Герасимов А.А., Кастров М.Ю. Электромагнитные компоненты преобразователей напряжения // Практическая силовая электроника. – 2001. – № 1. – С. 32–38.