

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЭФФЕКТЫ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ АКУСТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН И ИХ РАСЧЕТ

Г.В. Суханкин, Н.Т. Герцен

Одним из способов повышения надежности электрических машин является своевременная диагностика состояния изоляции статора. Одним из перспективных методов является диагностика изоляции обмотки с помощью акустических волн. Суть этого метода сводится в измерении акустического шума порождаемого магнитным взаимодействием проводников обмотки при пропускании через них диагностического тока. Однако при таком методе возникают помехи, вызываемые электромагнитными эффектами. При этом важно знать насколько полезный сигнал искажен помехами.

Звуковые волны, излучаемые в изоляцию при магнитном взаимодействия проводников обмотки, испытывают в ней затухание, обусловленное ее вязкоупругими характеристиками. Преимуществом такой диагностики является достоверность, быстроедействие, безопасность, неразрушаемость изоляции, компактность используемого при этом диагностического оборудования. Информация, получаемая с помощью измерения затухания акустических волн, тесно связана с физикомеханическими параметрами изоляции, что позволяет качественно и объективно оценивать ее состояние.

Измеряя диагностический параметр важно понять, насколько он искажен помехами. При акустической диагностики изоляции, возникающие помехи в основном обуславливаются действием магнитострикции и эффектов магнитного и электродинамического взаимодействий [1]. Для количественной оценки степени воздействия электромагнитного поля на ферромагнитный материал, из которого состоит магнитопровод электрической машины, необходимо определить акустические напряжения, возникающие в нем. Если акустические напряжения в магнитопроводе соизмеримы или хуже того, более значительны, чем полезный диагностический сигнал, то правильно произвести диагностику изоляции обмоток станет невозможно.

При подключении электрической машины к симметричной трёхфазной цепи возникает круговое магнитное поле с индукцией B (рис. 1, 2) [2]. Величина электромагнитных эффектов определяется векторным умножением напряженности поля H и магнитной индукцией B . Механизм возникновения механических напряжений в сердечнике статора объясняется взаимодействием «элементарных магнитиков», обладающих индукцией B и

внешнего магнитного поля с напряжённостью H . Пусть r_0 – равновесное расстояние между магнитиками, соответствующее минимуму энергии их взаимодействия с H . При повороте H на 90° , магнитики повернутся по полю, энергия взаимодействия их изменится и минимуму энергии будет соответствовать другое равновесное расстояние r_1 . Изменение длины $r_0 - r_1$ в нашем случае и есть магнитострикция, которая приводит к возникновению акустических шумов [1]. Известно, что даже в магнитомягких материалах, из которых изготавливают сердечник электрической машины имеет место гистерезис, что объясняется несовпадением направлений векторов H и B (рис. 2). Поэтому в общем случае величина акустического напряжения в магнитопроводе, определяемая взаимодействием сориентированных и несориентированных магнитиков будет связана с количеством. Следовательно, акустическое напряжение должно иметь связь либо с остаточной магнитной индукцией либо с коэрцитивной силой магнитного материала, из которого изготовлен статор. Однако, в рассматриваемом нами диагностическом методе предусматривается подключение к гармоническому источнику тока только одной из трёх фаз, и в этом случае круговое магнитное поле не возникает. Для этого случая расчёт электромагнитных эффектов производится исходя из модели, изображённой на рис. 3, представляющую собой два проводника с током с линейной плотностью $I = I_0 e^{j\omega t}$ расположенных параллельно поверхности магнитопровода. Он наводит ток $I_f = I$ и создаёт однородное магнитное поле с амплитудой $|H| = I_0$.

Электродинамические силы равны векторному произведению наведённого тока I_f на индукцию B . Тогда тангенциальное акустическое напряжение, действующее вдоль оси y

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЭФФЕКТЫ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ АКУСТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН И ИХ РАСЧЕТ

$$F_{yx}^{\partial} = I_f B_x e^{-jk_t x}. \quad (1)$$

Акустическое напряжение, действующее по нормали

$$F_{xx}^{\partial} = I_f B_y e^{-jk_t x}.$$

Объемное распределение вихревых токов

$$T_{yx}^{\partial} = HB_x \frac{1}{1 - j\beta_t^2} e^{-jk_t x}, \quad (2)$$

где β_t – безразмерный параметр, равный отношению волновых величин акустических и электромагнитных волн $\beta_t^2 = \frac{\omega}{c_t^2 \mu_0 \mu \sigma}$.

$\mu_0 - 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, μ – относительная магнитная проницаемость, σ – удельная электрическая проводимость материала сердечника статора [3].

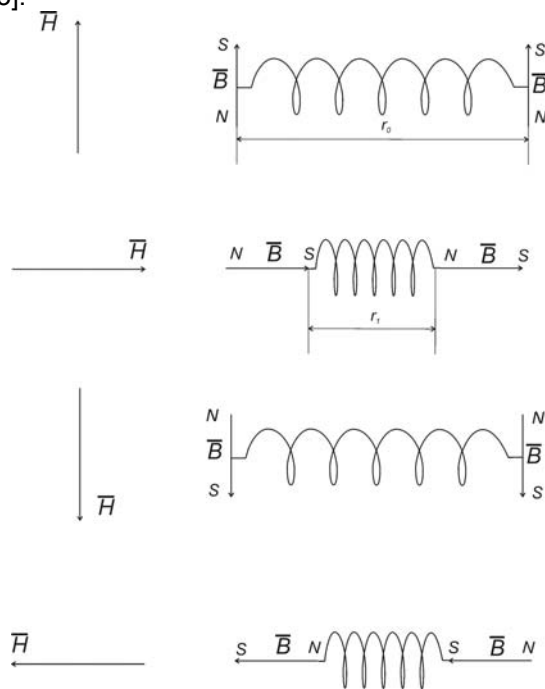


Рис. 1. Влияние вектора напряжённости вращающегося магнитного поля на ферромагнитный материал сердечника статора электрической машины при совпадении векторов B и H

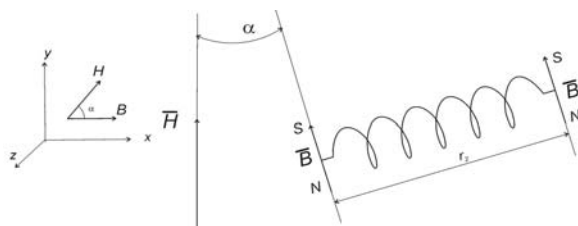


Рис. 2. Влияние вектора напряжённости вращающегося магнитного поля на ферромагнитный материал сердечника статора электрической машины при несовпадении векторов B и H

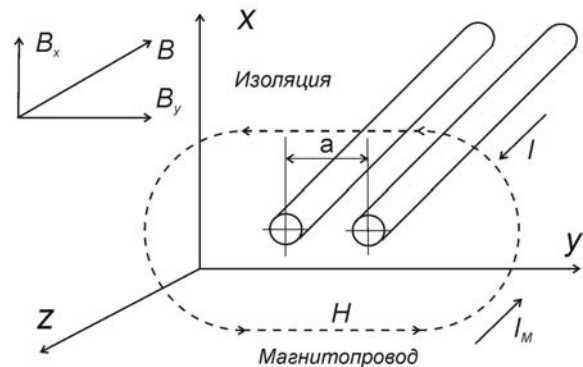


Рис. 3. Модель изоляции обмотки электрической машины для расчёта электромагнитных эффектов

При высокой электрической проводимости и диапазоне частот 1-10 МГц, что не соответствует параметрам рассматриваемой модели $\beta^2 \ll 1$, поэтому формула (2) переходит в (1). При низкой электропроводности, что имеет место в рассматриваемой модели, $\beta^2 \gg 1$, а упругие напряжения стремятся к нулю. Для продольных волн ситуация выглядит аналогичной.

Магнитное взаимодействие определяется соотношением:

$$T_{xx}^M = -\frac{\mu - 1}{\mu} HB_y e^{-jkx}. \quad (3)$$

Если вектор поля H совпадает с направлением B_y , тогда плотность силовых линий усиливается и действуют силы отталкивания проводников и твёрдого тела. В случае несовпадения H и B_y плотность силовых линий магнитного поля уменьшается, проводники и твёрдое тело притягиваются. Следовательно, направление напряжения T_{xx}^M оказывается противоположенным T_{yx}^{∂} , поэтому в сердечнике поперечные волны легче возбуждаются, чем продольные [3].

Эффект магнитострикции определяется формулой

$$T_{xx}^c = -\alpha HB_y \frac{j\beta_l^2}{1 - j\beta_l^2},$$

где $\beta_l^2 = \frac{\omega}{c_l^2 \mu_0 \mu \sigma}$, для парамагнетиков $\alpha = \mu - 1$,

для ферромагнетиков $\alpha = a/H_0$, a – магнитострикционная постоянная, имеющая величину порядка $(0,2 \dots 0,3) \cdot 10^{-7}$ А/м для магнитострикционных материалов, а H_0 – постоянное поле подмагничивания, равное $B_y / \mu_0 \mu$. Для электротехнической стали при $B_y = 1000$ Тл, $\mu = 10^6$, $\alpha \approx 10^4$.

При условии $\beta_l^2 \ll 1$, обычно выполняемом в металлах,

$$T_{xx}^C = -j\alpha\beta_l^2 HB_y e^{-jkx}.$$

Суммируя действия всех рассмотренных эффектов для ферромагнитного материала, определим

$$|T_{xx}| = |T_{xx}^D| + |T_{xx}^M| + |T_{xx}^C| = HB_y \left| 1 - \frac{\mu-1}{\mu} - j\alpha\beta_l^2 \right|.$$

Практический расчет для рассматриваемой модели выглядит следующим образом. Для этого введём три дополнительных параметра (рис. 4): h - расстояние от обмотки до сердечника статора, R_2 - наружный усреднённый радиус обмотки, R_1 - внутренний усреднённый радиус обмотки. Экспериментальные данные показывают, что вместо показателя e^{-jkx} следует ввести $e^{2,4h/D_{cp}}$, учитывающий расстояние h и габариты обмотки, причём

$$D_{cp} = \frac{2R_2 + 2R_1}{2}.$$

Таким образом, $|T_{xy}| = HBe^{\frac{2,4h}{R_1+R_2}}$. Напряжённость магнитного поля вблизи обмотки с w витками и током I определяется $H = \frac{Iw}{2(R_2 - R_1)}$.

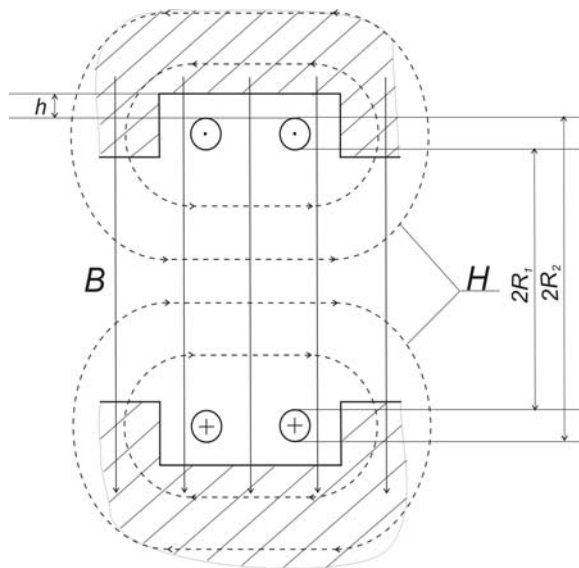


Рис. 4. Дополнительные параметры модели для расчёта электромагнитных эффектов

Подтверждением вышеизложенных расчётов могут стать данные из [4].

При протекании токов в проводниках обмотки возникает магнитное поле. Напряжённость магнитного поля прямого длинного провода с током

$$H = \frac{i}{2\pi a},$$

где a - расстояние от проводника до точки поля, в которой определяется напряжённость.

На рис. 5 показано, что изменение размеров железа статора электрической машины при напряжённости магнитного поля порядка 100-150 А/м в амплитуде, обусловленного диагностическим током порядка 10 А близка к нулю. Таким образом, магнитострикцией в разработанной модели можно пренебречь, как и эффектами электродинамического и магнитного взаимодействий.

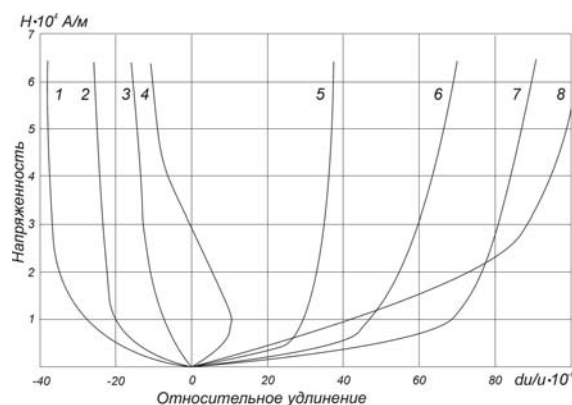


Рис. 5. Магнитострикция ферромагнетиков: 1 - никель; 2 - феррит 20% Ni, 80% Zn; 3 - кобальт (отожженный); 4 - железо; 5 - 50% Ni, 50% Fe; 6 - 50% Co, 50% Fe; 7 - 70% Co, 30% Fe; 8 - 54% Pt, 46% Fe [4]

ЛИТЕРАТУРА

1. Белов К.П. Магнитострикционные явления и их технические приложения. — М.: Наука, 1984. — 160 с.
2. Пястолов А.А., Ерошенко Т.П. Эксплуатация электрооборудования. — М.: Агропромиздат, 1990. — 287 с., ил.
3. Ермолов И.Н. Теория и практика ультразвукового контроля. — М.: Машиностроение, 1981. — 240 с., ил.
4. Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г. Справочник по элементарной физике. — М.: Наука, 1975. — 256 с., ил.