

плуатации, методика может включать в себя дополнительные этапы: уточнение оператора ИП, определение уровней отбраковки, разработка рекомендаций по изменению технологии контроля, уточнение методики, эвристическое прогнозирование.

Данная методика была апробирована в ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс» и показала высокую эффективность.

## **АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В МАГНИТОПРОВОДЕ С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНОСТИ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ**

В.В.Иванов

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Анализ процессов в магнитопроводе с учетом нелинейности очень сложен [1]. Некоторые задачи при синусоидальном возбуждающем электромагнитном поле можно решить предложенным в [2] методом, в котором зависимость индукции от напряженности магнитного поля заменяется зависимостью магнитной проницаемости от координаты. При расчете переходных процессов этот метод использовать нельзя, т.к. действующее значение магнитного поля зависит не только от координаты, но и от времени.

В [3] рассматривается расчет переходного процесса применительно к магнитопроводу, материал которого обладает эллиптической петлей гистерезиса. Эллипс является довольно грубой аппроксимацией петли гистерезиса особенно при постоянном подмагничивании.

Аппроксимация, более точно описывающая характер петли гистерезиса, приведена в [4]. Её применение позволяет рассчитывать динамические процессы перемагничивания магнитных сердечников при любой форме напряженности возбуждающего магнитного поля.

Используя эту аппроксимацию, рассчитаем производную от магнитного потока в тонкостенном цилиндре с малым воздушным зазором при возбуждении поля пилообразной магнитодвижущей силой.

Поле в тонкостенном цилиндре без учета краевых эффектов можно описать уравнением для магнитного поля в листе

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} = \sigma \mu \frac{\partial H_z}{\partial t}, \quad (1)$$

где  $x$  - координата, перпендикулярная плоскости листа, с началом в его середине,  $z$  - координата, расположенная вдоль плоскости, листа и перпендикулярная воздушному зазору.

Как отмечено в [3], это уравнение пригодно для линейной среды, параметры которой постоянны. Уравнение для нелинейной среды подлежит модификации. Выражение (1) примет вид

$$\frac{\partial^2 H_Z}{\partial x^2} = \sigma \left( \mu + H \frac{\partial \mu}{\partial H} \right) \frac{\partial H_Z}{\partial t}.$$

Величина  $\mu_D = \mu + H \frac{\partial \mu}{\partial H}$  носит название [5] нелинейной магнитной проницаемости. Определим её, используя аппроксимацию [4] кривых намагничивания  $B(H)$  из произвольного магнитного состояния.

$$B(H) = \frac{B_{\max}}{b} \operatorname{th} \left[ b \left( \frac{H^*}{H_{\max}} - 1 \right) \right] - B_0,$$

где  $b = \operatorname{arch} \sqrt{\mu_{\max} / \mu_\alpha}$ ,  $\mu_\alpha$  - начальная магнитная проницаемость,  $\mu_{\max}$  - максимальная магнитная проницаемость,  $H_{\max}$  - напряженность магнитного поля при  $\mu = \mu_{\max}$ ,  $B_{\max} = \mu_{\max} H_{\max}$ ,  $H^* = [H - H_H]$ ,  $H_H$  - напряженность магнитного поля при смене знака её производной по времени,

$$B_0 = \frac{B_{\max}}{2b} \left\langle \operatorname{th}[-b] - \operatorname{th} \left[ b \left( \frac{2|H_H|}{H_{\max}} - 1 \right) \right] \right\rangle.$$

Производная по времени от магнитной индукции при этом

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \frac{\mu_{\max}}{ch^2 \left[ b \left( \frac{2|H_H|}{H_{\max}} - 1 \right) \right]} \frac{\partial H}{\partial t},$$

то есть

$$\mu_D = \frac{\mu_{\max}}{ch^2 \left[ b \left( \frac{2|H_H|}{H_{\max}} - 1 \right) \right]}.$$

При постоянном магнитном поле магнитные индукции в узком воздушном зазоре и магнитопроводе равны /5/. Индукция переменного поля в листе не постоянна по толщине. Для упрощения расчетов с достаточной точностью при узком воздушном зазоре можно принять, что на одинаковом расстоянии от средней линии магнитные индукции в зазоре и материале равны.

Обмотка возбуждения создает однородное внешнее поле напряженностью  $H_{\Pi}$ . для определения напряженности  $H$  на поверхности магнитопровода напишем закон полного тока, делая обход по поверхности цилиндра:

$$H_{\Pi} l = H_b l_b + H_{\Pi} (l - l_b),$$

$H_b$  – напряженность поля в зазоре,  $H$  – напряженность поля в материале,

$l$  – длина окружности цилиндра,  $l_b$  – величина зазора.

Учитывая, что  $H_b = B(H) / \mu_0$ , получим нелинейное уравнение

$$H = (H_{\Pi} l - B(H) l_b / \mu_0) / (l - l_b). \quad (2)$$

Из этого уравнения определяется напряженность  $H$  на поверхности магнитопровода при известном  $H_{\Pi}$ , созданном возбуждающей обмоткой.

В /5/ дано рекуррентное соотношение для расчёта на ЭВМ напряженности магнитного поля в листе.

$$H_{i+1,j} = \frac{k}{\delta^2 \sigma \mu_D} (H_{i,j+1} + H_{i,j-1}) + \left( 1 - \frac{2k}{\delta^2 \sigma \mu_D} \right) H_{i,j}, \quad (3)$$

где  $k$  и  $\delta$  – величина шагов соответственно по времени и глубине,  $i$  и  $j$  – номера шагов по времени и глубине.

Приведем все параметры к безразмерному виду.

$$\bar{B} = B / B_{\max}; \quad \bar{H} = H / H_{\max};$$

$$\bar{\mu} = \mu_D / \mu_a; \quad \bar{t} = t / A^2 \sigma \mu_a; \quad k / \delta^2 \sigma \mu_D = \bar{k} n^2 / \bar{\mu},$$

где  $n$  – число шагов по глубине.

Рекуррентная формула (3) примет вид

$$H_{i+1,j} = \left( H_{i,j+1} + H_{i,j-1} \right) \frac{\bar{k}n^2}{\mu_{i,j}} + \left( 1 - 2 \frac{\bar{k}n^2}{\mu_{i,j}} \right) H_{i,j}.$$

Для вычисления производной по времени от магнитного потока, пропорциональной ЭДС на выходной обмотке,

$$\frac{d\bar{\Phi}}{dt} = (\bar{\Phi}_i - \bar{\Phi}_{i-1})/k.$$

где  $\bar{\Phi}_i = \Phi / B_{\max} S$ ,  $S$  - площадь сечения магнитопровода.

На каждом шаге  $i$  необходимо вычислять

$$\begin{aligned} \bar{\mu}_{i,j} &= \frac{\mu_{\max}}{\mu_a ch^2 \left[ b \left( \bar{H}_{i,j} - \bar{H}_H - 1 \right) \right]}, \\ \bar{B}_0 &= 0.5b^{-1} \left[ th(-b) + th\left( b \frac{2}{|\bar{H}_H|} - 1 \right) \right], \\ \bar{B}_{i,j} &= b^{-1} th \left[ b \left( \bar{H}_{i,j} - \bar{H}_H - 1 \right) \right] - B_0, \\ \bar{\Phi}_{i,j} &= (\bar{B}_{i,0} + \sum_{j=1}^{n-1} 2\bar{B}_{i,j} + \bar{B}_{i,n}) / 2n. \end{aligned}$$

Поле на поверхности магнитопровода определяется из нелинейного уравнения

$$\bar{H}_0 = \bar{H}_{\Pi 0} (\bar{t} - 1) - \bar{B}(\bar{H}_0) \frac{l_b \mu_{\max}}{l \mu_a};$$

которое получено на основе (2) с учетом того, что  $1 \gg l_b$ .

Отношение максимальной магнитной проницаемости к начальной для пермаллоев 50Н, 79ЕМ, 80ЕМ соответственно равно 9, 5, 10. При расчетах примем  $\frac{\mu_{\max}}{\mu_a} = 10$ .

Воздушный зазор в датчиках выбирают таким образом, чтобы влияние ферромагнитного материала составляло менее 1 - 10%.

Рассмотрим худший случай, когда  $\frac{l_b \mu_{\max}}{l \mu_0} = 100$ . Т.е. влияние магнитопровода составляет 10% при магнитной проницаемости равной  $\mu_a$ .

Результаты расчета приведены на рис. 1.

На этом же рисунке даны результаты расчета производной по времени от потока при двух постоянных магнитных проницаемостях, равных  $\mu_a$  и  $\mu_{\max}$ . Программа расчета Производной для линейного плоского магнитопровода приведена в приложении.

На начальном участке, как видно из рис.1, нелинейный магнитопровод по характеру переходного процесса наиболее близок к магнитопроводу с постоянной магнитной проницаемостью, равной  $\mu_a$ , однако амплитуды выходного сигнала при этом отличаются на 30%.

В области больших времен при  $t > 0,3A^2\sigma\mu_{\max}$  переходные процессы в магнитной цепи с нелинейным магнитопроводом и с магнитопроводом, у которого магнитная проницаемость постоянна и равна  $\mu_{\max}$ , отличаются не более чем на 10%.

Выбор  $\mu$  при расчетах зависит от того, какой участок переходного процесса нас больше всего интересует.

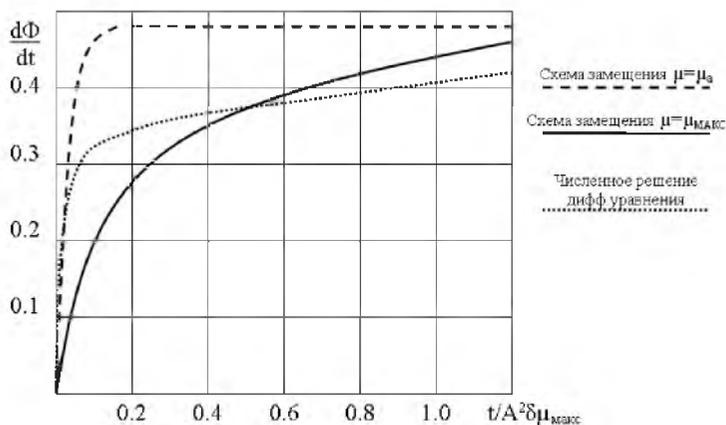


Рис. 1. ЭДС на выходной обмотке при разных методах расчёта

### Список использованных источников

1. Поливанов К.М. Теория электромагнитного поля. – М.: Энергия, 1975.
2. Нейман Л.Р. Поверхностный эффект в ферромагнитных телах. - : Госэнергоиздат, 1949.
3. Герасимович А.Н. Расчёт электромагнитных процессов в магнитопроводе при его намагничивании напряжением любой формы. Изв. Вузов. Энергетика, 1983, №3.

4. Крохин В.В., Маслов Ю.Н., Пирогов А.И., Хитрук О.И. Методика расчёта процессов перемагничивания магнитных сердечников в динамическом режиме. - Изв. Вузов СССР, Приборостроение, 1984, т.27, №4.
5. Говорков В.А. Электрические и магнитные поля. – М.: Энергия, 1968.

## **ЭЛЕМЕНТЫ ОПТИМИЗАЦИИ НА БАЗЕ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ**

А. Д. Краснощеков, П. А. Кулагин

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Эффективность деятельности предприятий и регионов зависит от качества управленческих решений. Проблема принятия решений носит фундаментальный характер, что определяется ролью, которую играют решения в любой сфере человеческой деятельности.

В условиях конкуренции для усиления позиций предприятия актуальность приобретают вопросы повышения научной обоснованности, качества и оперативности принимаемых управленческих решений.

Для достижения значительных успехов в разработке теории и практики организации управления и принятия решений на транспорте могут быть использованы имитационные модели (ИМ).

На некотором уровне управления функционирование ИМ с позиций оптимизаций может быть описано следующим образом. В качестве объекта управления рассматриваются представленные в компьютере ИМ. Имеется некоторое число решателей  $R_k$  ( $k=1, k$ ) того или иного типа, от действий которых при заданных начальных условиях зависит все развитие процесса. Состояние ИМ в любой момент времени может быть описано достаточно большим набором переменных, из которых контролируется только некоторая часть называемая *фазовыми переменными*  $x_i$ . Значения фазовых переменных имеются в конкретных точках сети. В случайные моменты времени  $t_i$  в том или ином решателе возникают конфликтная ситуация, разрешаемая путем принятия решения этим решателем.

Заранее известен набор решений  $(r)_k$  для каждого решателя  $R_k$ , которыми он может пользоваться при разрешении возникающих в сфере его действия конфликтных ситуаций. Конкретный набор решений  $(r)_k$  определяется типом решателя.

Различают 3 последовательности событий в процессе функционирования ИМ.

1. Последовательность моментов имитации (ось времени моделирования)  $t=1, 2, \dots, T$ .