

Р и с. 5. Зависимость дискриминационной характеристики от порядка ЦФЧ при замене гармонического опорного колебания

#### Литература

1. Колчминский В.Е. Допплеровские устройства и системы навигации. - М.: Советское радио, 1975. - 430 с.
2. Оппенгейм А.В., Шафер Р.В. Цифровая обработка сигналов. - М.: Связь, 1979. - 416 с.
3. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. - М.: Советское радио, 1977. - 606 с.

УДК 681.325

В.С.Кочкарев, В.В.Семенов, В.С.Вопилин

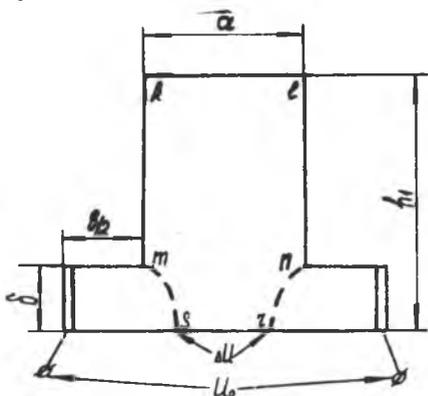
#### РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСЧЕТА МАГНИТНОЙ ПРОВОДИМОСТИ В ЗУБЦОВЫХ ЗАВОРАХ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ДАТЧИКОВ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

В трансформаторных датчиках перемещений размеры чувствительного элемента существенно больше размеров отдельных зубцов, поэтому целесообразно использовать предположение об однородности поля в воздушном зазоре.

На базе этого предположения разработан экспериментально-теоретический метод расчета проводимости в расщепленном зубцовом зазоре

и комбинационным сопряжением. Чтобы учесть влияние боковых потоков, вводятся экспериментальные коэффициенты  $\gamma$ , которые уравнивают интегральное значение потока в реальном пазу и потока для расчетного случая, когда поле такого же паза предполагается однородным.

С целью нахождения коэффициентов  $\gamma$  был поставлен эксперимент на обращенных моделях из электропроводной бумаги (т.е. модели имеют конфигурацию воздушного зазора между зубцовым пазом и плоскостью). Методика заключается в том, что на исходной модели из электропроводной бумаги (рис. 1) с наклеенными токопроводящими клееными электродами определяются силовые линии, исходящие из точек  $m$  и  $n$ . Внутренняя область  $klnrsm$  занята потоком, который проходит через дно паза  $kl$  и боковые стенки  $km$  и  $ln$ . При заданном  $U_0 = 100$  В фиксируется значение  $\Delta U = U_{sr}$ .

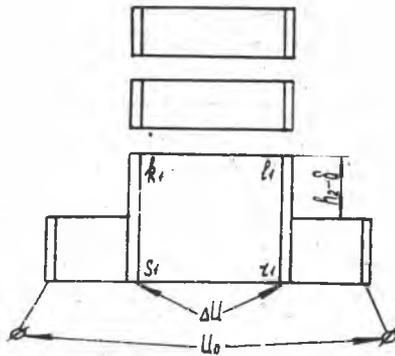


Р и с. 1. Модель магнитной цепи из электропроводной бумаги

На дублирующей модели (рис. 2) вдоль стенок паза до линии, моделирующей плоскость, наклеиваются токопроводящие линии - электроды  $K_1 S_1$  и  $l_1 r_1$ . Затем, частями урезая верхнюю часть модели, определяют величину  $h_2$ , при которой значение  $U_{S_1 r_1} = U_{sr}$  при  $U_0 = \text{const}$ .

Таким образом, формируется однородное поле во внутренней области  $K_1 l_1 r_1 S_1$ , интегральное значение которого соответствует полю в исходной модели.

При подготовке и проведении эксперимента был использован ортогональный план второго порядка для трех факторов  $I$ , который предусматривает 15 опытов. Результатом отдельного опыта является



Р и с. 2. Дублирующая модель из электропроводной бумаги

величина  $\bar{z} = \frac{h^2}{h^4}$ . При обработке экспериментальных данных вычислялись значения коэффициентов  $\beta_0$ ,  $\beta_i$ ,  $\beta_{ii}$ ,  $\beta_{ij}$  регрессии в уравнении

$$\bar{z} = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{33} X_3^2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{23} X_2 X_3. \quad (I)$$

Для определения коэффициентов регрессии используются выражения /I/

$$\beta_i = \sum_{u=1}^{10} X_{iu} \bar{z}_u / 10,94; \quad \beta_{ij} = \sum_{u=1}^8 X_{iu} X_{ju} \bar{z} / 8;$$

$$\beta_{ii} = \sum_{u=1}^{15} X_{iu}^2 \bar{z}_u / 4,34; \quad \beta'_0 = \sum_{u=1}^{15} \bar{z}_u / 15;$$

$$\beta_0 = \beta'_0 - 0,73 (\beta_{11} + \beta_{22} + \beta_{33}),$$

где  $X_{iu}$  - значение фактора  $X_i$  для  $u$ -й модели;

$\bar{z}_u$  - среднее значение результата эксперимента для той же модели

$$\bar{z}_u = \bar{z}_{u1} + \bar{z}_{u2} / 2.$$

Для упрощения искомого уравнения регрессии была проведена оценка значимости его коэффициентов, которая связана с построением доверительных интервалов (коэффициент уравнения регрессии значим, если его абсолютная величина больше доверительного интервала). Сравнение коэффициентов регрессии по абсолютной величине с учетом соответствующих доверительных интервалов показало, что в данном случае нельзя считать статистически значимыми коэффициенты  $\beta_2$ ,  $\beta_{11}$ ,  $\beta_{22}$ ,  $\beta_{12}$  и  $\beta_{13}$ , которые могут быть исключены из уравнения регрессии (1)

$$\xi = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_3 X_3 + \beta_{33} X_3^2 \quad (2)$$

Гипотеза об адекватности (пригодности) выражения (2) была проверена с помощью критерия Фишера

$$F = \frac{S_{ag}^2}{S^2\{\xi\}} \quad (3)$$

где  $S_{ag}^2$  - остаточная дисперсия, или дисперсия адекватности;  
 $S^2\{\xi\}$  - дисперсия воспроизводимости.

Для определения  $S_{ag}^2$  используется выражение

$$S_{ag}^2 = \frac{\sum_{u=1}^N n(\bar{\xi}_u - \bar{\xi})^2}{N - \frac{(k+1)(k+2)}{2}} \quad (4)$$

где  $k=2$  - число факторов;  
 $\bar{\xi}$  - расчетное значение коэффициента по уравнению (2);  
 $N=15$  - число отдельных опытов;  
 $n=2$  - число наблюдений в отдельном опыте.

Для определения  $S^2\{\xi\}$  используем

$$S^2\{\xi\} = \frac{\sum_{u=1}^N \sum_{j=1}^n (\xi_{uj} - \bar{\xi}_u)^2}{N(n-1)} \quad (5)$$

где  $\xi_{uj}$  - результат отдельного наблюдения.

Подставляя (4) и (5) в (3), получаем расчетное значение критерия Фишера. В данном случае  $F_{расчетное} < F_{табличное}$ , следовательно, уравнение регрессии можно считать адекватным с 95% доверительной вероятностью.

После подстановки численных значений коэффициентов регрессии и обозначений факторов (в соответствии с рис. 1, 2) выражение (2) примет окончательный вид

$$\xi = 0,64 + 0,016 \cdot a_0 - 0,068 \cdot h_0 + 0,0018 \cdot h_0^2, \quad (6)$$

где  $a_0 = a/\delta$  - относительная ширина паза;

$h_0 = h_1/\delta$  - относительная глубина паза.

Для проверки изложенного метода расчета в качестве эталона предложена проводимость, рассчитанная с помощью метода конформных преобразований [2], который при сделанных допущениях дает адекватную картину распределения поля в сопряжении "паз-плоскость".

Уравнение конформного преобразования, связывающее вещественную ось одной плоскости с границей многоугольника в другой плоскости, описывается уравнением Кристоффеля-Шварца и для данного случая представляет собой уравнение вида

$$\frac{dz}{dt} = B \frac{\sqrt{t^2 - \rho^2}}{\sqrt{(t^2 - 1)(t^2 - d^2)(t^2 - c^2)}}, \quad (7)$$

где  $\pm 1, \pm \rho, \pm d, \pm c$  - точки на вещественной оси плоскости  $t$  соответствующие углам многоугольника.

При таком преобразовании электрическое поле внутри многоугольника преобразуется в электрическое поле заряженных проводящих пластин, которые, в свою очередь, преобразуется в однородное поле уравнением

$$\frac{d\omega}{dt} = B_1 \sqrt{(t^2 - 1)(t^2 - d^2)}. \quad (8)$$

Таким образом, при помощи двойного конформного преобразования сопряжение "паз-плоскость" преобразуется в однородное поле. При этом напряженность поля внутри многоугольника в любой точке определяется выражением [2/

$$|H| = \left| \frac{d\omega}{dz} \right| = \left| \frac{d\omega}{dt} \frac{dt}{dz} \right|. \quad (9)$$

Подставляя (7) и (8) в (9), получим

$$H = B_1 \sqrt{\frac{c^2 - t^2}{\rho^2 - t^2}} / B$$

Из условия нормировки  $H(1) = 1$  находим  $B_1/B$  и окончательное выражение для нормированной напряженности

$$H_n = \sqrt{\frac{(\ell^2 - 1)(c^2 - t^2)}{(c^2 - 1)(\ell^2 - t^2)}} \quad (10)$$

Как показано в [2], нормированная магнитная проводимость определяется напряженностью поля. Следовательно, зависимость  $\lambda$  от координаты  $X$  выражается в параметрическом виде и имеет вид

$$\begin{cases} \lambda = \sqrt{\frac{(\ell^2 - 1)(c^2 - t_0^2)}{(c^2 - 1)(\ell^2 - t_0^2)}} \\ X = \int_0^{t_0} \frac{B \sqrt{(\ell^2 - t^2)} dt}{\sqrt{(1 - t^2)(d^2 - t^2)(c^2 - t^2)}} \end{cases} \quad (11)$$

В выражении (11) неизвестными являются значения  $B, \ell, d, c$ . Они определяются размерами многоугольника  $(a_0, b_0, h_0)$  из условия соответствия вершин многоугольника и точек  $d, \ell, c$  на вещественной оси преобразованной плоскости путем решения системы интегральных уравнений. Расчеты проводились на микро-ЭВМ "Электроника-60". Среднее значение погрешности не превышает 13,8%.

Таким образом, при инженерных расчетах трансформаторных датчиков перемещений с чувствительными элементами, размеры которых превышают отдельное зубцовое деление, целесообразно использовать выражение (6), позволяющее определить величину эквивалентной магнитной проводимости сопряжения "плаз-плоскость".

#### Литература

1. Тихомиров В.Б. Планирование и анализ эксперимента. - М.: Легкая индустрия, 1974. - 264 с.
2. Бинс К., Лауренсон П. Анализ и расчет электрических и магнитных полей. - М.: Энергия, 1970. - 376 с.