

## МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМОЙ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ АППАРАТОВ ЗАЩИТЫ ОТ УТЕЧЕК

Чорноус Е.В.

Донецкий национальный технический университет  
[pm@cld.dgtu.donetsk.ua](mailto:pm@cld.dgtu.donetsk.ua)

*Отримано математичну модель керованого нелінійного дроселя для компенсації ємнісних струмів витоку. Встановлено, що струм дроселя практично синусоїдний і вищі гармоніки не впливають на його компенсуючі та регулювальні властивості.*

При эксплуатации шахтных участковых сетей с изолированной нейтралью широко используются устройства контроля изоляции и защитного отключения (УАКИ, АЗАК, и др.), содержащие дроссель для компенсации емкостной составляющей тока утечки на землю. В ряде устройств индуктивность дросселя регулируется в зависимости от длины кабельной сети (и, следовательно, от ее емкости по отношению к земле) путем подмагничивания постоянным током [1]. Известны мнения специалистов о том, что наличие индуктивности в одной цепи с емкостями кабелей представляет потенциальную опасность аварийных ситуаций вследствие резонансных перенапряжений [2].

В данной работе ставится задача получения математической модели управляемого дросселя, определение диапазона изменения его индуктивности, гармонический анализ его тока.

На рис.1 приведена схема управляемого компенсирующего дросселя [1]. Она содержит Ш-образный ферромагнитный сердечник, на крайних стержнях которого расположены рабочие обмотки  $w$  и замыкаются основные магнитные потоки  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ . На среднем стержне расположена обмотка управления  $w_y$ , и замыкается поток подмагничивания  $\Phi_0$ . Рабочие обмотки  $w$  крайних стержней питаются от источника синусоидального напряжения, а обмотка управления  $w_y$  имеет независимый источник питания.

Магнитная цепь рис. 1 описывается следующей системой нелинейных уравнений:

$$\begin{aligned}
 \Phi_0 + \Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_S &= 0 ; \\
 H(B_1) \cdot \ell_1 + B_1 \cdot \delta_1 / \mu_0 + U_m g &= i \cdot w ; \\
 H(B_0) \cdot \ell_0 + B_0 \cdot \delta_0 / \mu_0 + U_m g &= F_0 ; \\
 H(B_2) \cdot \ell_2 + B_2 \cdot \delta_2 / \mu_0 + U_m g &= - i \cdot w ; \\
 \Phi_S &= U_m g \cdot G_S ,
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где  $H$  – напряженность магнитного поля;

$U_{mg}$  – узловое магнитное напряжение;  
 $l_K, S_K$  – длина средней линии и сечение стержней магнитопровода ( $k = 0, 1, 2$ );  
 $\delta_K$  – эквивалентная длина воздушных зазоров стержней;  
 $B_K, \Phi_K$  – индукция и магнитный поток в стержнях;  
 $i$  – мгновенное значение тока рабочих обмоток;  
 $F_0 = i_y \cdot w_y$  – намагничивающая сила обмотки управления;  
 $\Phi_S$  – суммарный поток рассеяния стержней;  
 $H(B)$  – аппроксимированная кривая намагничивания.  
 $G_S$  – эквивалентная магнитная проводимость среды замыкания потока рассеяния.

В свою очередь напряжения рабочих обмоток дросселя связаны с источником питания уравнением:

$$w \cdot \partial(\Phi_1 - \Phi_2) / \partial t - i \cdot 2 \cdot r = U_m \cdot \sin(\omega t + \psi), \quad (*)$$

где  $r$ , – активное сопротивление рабочих обмоток;  
 $U_m, \psi$  – амплитуда и начальная фаза питающего напряжения.

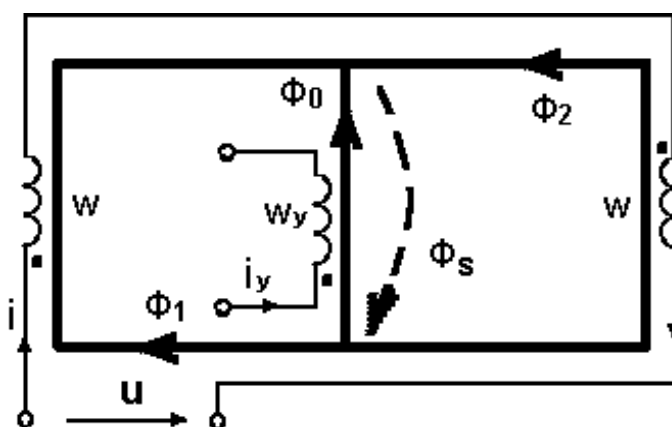


Рисунок 1 – Схема замещения компенсирующего дросселя

Обратим внимание на то, что дифференциальное уравнение (\*) не разделяет суммарное приращение магнитных потоков и, следовательно, не может быть представлено в форме Коши. Это значит, что к решению нашей задачи нельзя применить хорошо отработанные методы интегрирования типа, например, Рунге-Кутты. Исходя из этого, уравнение (\*) перепишем

непосредственно в приращениях для  $k$ -того шага.

$$\Delta(\Phi_1 - \Phi_2)_k = [U_m \cdot \sin(\omega t_k + \psi) - i_k \cdot 2 \cdot r] \cdot \Delta t / w. \quad (2)$$

Выражение (2) позволяет на  $k$ -том шаге определить суммарное приращение двух магнитных потоков. Далее возможно определение суммы рабочих потоков, являющихся исходной информацией для  $k+1$ -го шага:

$$(\Phi_1 - \Phi_2)_{k+1} = (\Phi_1 - \Phi_2)_k + \Delta(\Phi_1 - \Phi_2)_k. \quad (3)$$

Таким образом, полученные соотношения (1, 2, 3) являются математической моделью рассматриваемой цепи. Они связывают в одну систему ее четыре магнитных потока (включая поток рассеяния), ток рабочих обмоток, узловое магнитное напряжение, а также напряжение источника питания и мдс управляющего подмагничивания. Алгоритм решения задачи состоит в том, что на заключительной стадии  $k$ -того шага интегрирования при помощи зависимости (2) определяется суммарное приращение рабочих потоков  $\Delta(\Phi_1 - \Phi_2)_k$ . Затем при помощи зависимости (3) определяется алгебраическая сумма потоков  $(\Phi_1 - \Phi_2)_{k+1}$ , но уже для  $k+1$ -го шага. Эти данные становятся исходными для последующего определения всех переменных состояния системы для  $k+1$ -го шага путем решения системы (1).

Особенности методики исследования:

1. Не учитывается «обратное» влияние рабочих обмоток на ток обмотки управления (иначе – обмотка управления питается от источника тока).
2. Суммарный (эквивалентный) поток рассеяния определяется как линейная функция узлового магнитного напряжения.
3. Ввиду большого объема вычислительных действий, связанных с решением нелинейной системы (1), и быстрым накоплением ошибок интегрирования, один цикл исследования ограничивается периодом установившегося режима.
4. Для обеспечения режима, близкого к установившемуся, выбор условий для начального (нулевого) шага осуществляется таким образом, чтобы обеспечивалась периодическая повторяемость значений для всех переменных. Наиболее рационально решить эту часть задачи, приняв за начало интегрирования момент перехода тока через нуль. Тогда основной варьируемой величиной становится начальная фаза питающего напряжения, близкая к  $\pm 90^\circ$ .
5. Для оценки достоверности результатов через половину периода сопоставляются экстремумы тока и контролируется повторяемость рабочих потоков дросселя через период.

Первый этап исследований выполнялся для следующих исходных данных:

- Сечение магнитопровода –  $20 \text{ см}^2$ .
- Длина участков магнитопровода – 15 см, 5 см, 15 см.
- Расчетные воздушные зазоры стержней – 0.05 мм.
- Число витков рабочих обмоток – 250.
- Амплитуда питающего напряжения – 220 В.
- Мдс постоянного подмагничивания менялась в пределах 0...35 А с шагом 5 А.

При исследовании фиксировались мгновенные значения потоков стержней и тока рабочих обмоток дросселя в пределах одного периода установившегося режима. Кроме того, на основании массива данных для одного периода определялись действующее значение тока, его гар-

монический состав и эквивалентная индуктивность дросселя.

На рис. 2 показан вывод мгновенных значений исследуемых величин в пределах одного периода для условия  $F_0 = 30$  А. За счет постоянного подмагничивания рабочие потоки первого и второго стержней несинусоидальны, однако сохраняют симметрию друг относительно друга таким образом, что ток рабочих обмоток весьма близок к синусоидальному даже при значительной величине постоянного подмагничивания.

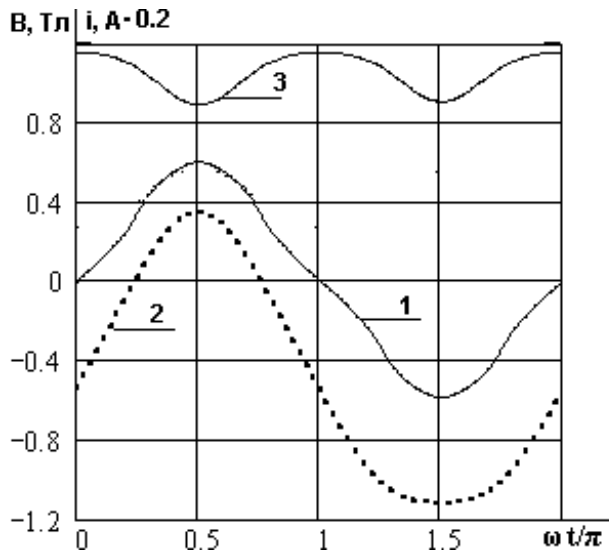


Рисунок 2 – Графики мгновенных значений тока (1), индукции первого стержня (2), индукции среднего стержня (3).

подмагничивания.

При моделировании достигнута повторяемость значений всех исследуемых величин (токов, магнитных потоков) через период, что вне сомнений повышает достоверность результатов и дает возможность выполнить гармонический анализ тока.

Количественной характеристикой степени несинусоидальности тока на практике считают коэффициент искажения, являющийся отношением действующего значения первой гармонической составляющей к действующему значению тока.

Анализ показал, что при изменении намагничивающей силы среднего стержня в пределах  $F_0 = 0 \dots 35$  А:

- относительное значение первой гармоники тока (а следовательно и коэффициента искажения) меняется в пределах  $1 \dots 0.99$ ;
- относительное значение третьей гармоники тока меняется в пределах  $0.03 \dots 0.13$  ;
- более высокие гармонические составляющие практически не проявляются;
- достигнутый диапазон изменения эквивалентной индуктивности дросселя в процессе регулирования составил  $2 : 1$  .

В качестве критерия достоверности результатов сопоставлялись модули экстремальных значений тока через половину периода. Теоретически расхождение между ними в установившемся режиме равно нулю, а в данном исследовании обусловлено накапливающейся ошибкой интегрирования и некорректностью принятых на первом шаге начальных условий. Максимальное расхождение экстремумов тока не превысило 2.9 %, что можно считать приемлемым.

## **Заключение**

1. Вне зависимости от степени насыщения рабочих стержней ток управляемой индуктивности является практически синусоидальным. Расчетное значение действующего значения первой гармоники по отношению к действующему значению тока (коэффициент искажения) составляет 99 %.
2. Диапазон изменения индуктивности управляемого дросселя определяется отношением 2:1, что позволяет компенсировать емкостную составляющую токов утечки при двукратном изменении длины кабельной сети.

## **Литература**

1. Справочник энергетика угольной шахты: В 2т. / В.С. Дзюбан и др. – Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд» 2001. Т 1.: – 447 с.
2. Цапенко Е. Ф. Резонансные перенапряжения в шахтных сетях при компенсации токов утечки на землю. Промышленная энергетика. 1998, № 10.

Поступила в редакцию 11 января 2004 года