И З В Е С Т И Я томского ордена октябрьской революции и ордена трудового красного знамени политехнического института имени С. М. Кирова

Том 244

N-11

РАСЧЕТ РЕЛЕЙНЫХ ЭФФЕКТОВ В ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ФЕРРОРЕЗОНАНСНОЙ ЦЕПИ

А. И. КУТЯВИН

(Представлена научным семинаром каф. ТОЭ)

В настоящее время возрос интерес к феррорезонансным цепям, которые нашли широкое применение при построении стабилизаторов напряжения, делителей и умножителей частоты, бесконтактных реле и некоторых других элементов автоматики.

Несмотря на то, что первые работы по теории и применению последовательного феррорезонансного контура при изменении питающего напряжения появились около пятидесяти лет тому назад, до сих пор нет простого инженерного метода расчета релейных эффектов и критического активного сопротивления контура, при превышении которого релейные эффекты отсутствуют. Если при определении тока в точках триггерных эффектов без учета потерь на гистерезис получается допустимая ошибка [1], то этого нельзя сказать о напряжении питания при обратном скачке тока и тем более о критическом сопротивлении. Учет потерь в стали несколько усложняет задачу, но позволяет найти все параметры, подлежащие определению [2]. В связи с тем, что в колебательном контуре в общем случае кривая индукции близка к синусоиде, а кривая тока — нет, необходимо задание параметров дросселя в зависимости от индукции. Именно так делалось в большинстве работ по теории феррорезонансных устройств [3, 4]. Условия существования релейных эффектов при учете потерь в стали выражаются тогда через довольно громоздкие выражения. В этом случае физическая картина условий оказывается менее удобной для понимания, чем тогда, когда вводятся зависимости от тока, позволяющие оперировать понятиями статического и дифференциального сопротивления дросселя [1]. В отличие от [1], излагаемый ниже графоаналитический метод расчета релейных эффектов учитывает активную составляющую напряжения на дросселе, обусловленную потерями в стали и, очевидно, позволяет найти все параметры, подлежащие определению, а также критическое активное сопротивление цепи.

Введем следующие упрощающие расчет предположения:

1) при определении параметров нелинейной индуктивности измеряются действующие значения электрических величин;

2) активная и реактивная составляющие напряжения на ней находятся из фазовых соотношений, найденных для основной гармоники;

3) активное сопротивление обмотки дросселя учитывается в сопротивлении нагрузки — r.

Так как при резонансе доля высших гармоник по сравнению с основной невелика, при исследовании простейших явлений в феррорезо-

1972

39

нансных цепях широко используются вольт-амперные характеристики для действующих значений [5], поэтому первые два допущения не должны существенно влиять на точность расчета.





На рис. 1 показана схема замещения последовательного феррорезонансного контура. Зависимости активной и реактивной составляющих напряжения на дросселе от тока, а также суммарное активное сопротивление цепи — $R_{\Sigma} = R + r$ представлены на рис. 2, а.





40

Для рассматриваемой цепи справедливо выражение:

$$(U_L - U_c)_2 + (U_R + U_f)^2 = U^2.$$
(1)

Условием существования релейных эффектов в контуре является равенство

$$\frac{dU}{dI}=0,$$

что вытекает из критерия Рауса-Гурвица [4]

Продифференцировав (1) по току, получим

$$(x - x_{\rm c})(x_{\rm d} - x_{\rm c}) + R_{\Sigma}(R_{\rm d} + r) = 0, \qquad (2)$$

где

- *x*, *x*_d статическое и дифференциальное реактивные сопротивления дросселя, соответственно;
- *R*, *R*_d статическое и дифференциальное активные сопротивления дросселя, соответственно;

x_с — статическое емкостное сопротивление.

Выражение (2) может быть разрешено относительно

$$x_{\rm c} = \frac{x + x_{\rm d}}{2} \pm \sqrt{\frac{(x - x_{\rm d})^2}{4} - R_{\rm s}(R_{\rm d} + r)}.$$
 (3)

Правая часть (3) зависит от характеристик дросселя и величины нагрузочного сопротивления, левая от них не зависит. Строя левую и правую часть в отдельности и находя точки их пересечения при x_c = const, можно получить параметры контура, соответствующие скачкам тока (рис. 2, 6). Здесь же представлено изменение активного дифференциального сопротивления дросселя от тока — R_d . В силу малости сопротивления нагрузки (r=13 ом) и R по сравнению с реактивными составляющими, система, как и в [1], мало отличается от консервативной, так как верхняя и нижняя ветви, выражающие правую часть равенства (3), почти везде совпадают со значениями статического или дифференциального индуктивного сопротивления. Действительно, если $R_{\rm s}$ =0, кривая $x_c = x_d$ является геометрическим местом точек, где начинается скачкообразное увеличение тока, а кривая $x_c = x$ — геометрическим местом точек, где начинается скачкообразное уменьшение тока.

При отрицательном дифференциальном активном сопротивлении, когда $[R_d | > | r|$, правая часть равенства (3) становится больше статического индуктивного сопротивления дросселя и меньше дифференциального. По мере увеличения диссипативности системы (r) область пространства, ограниченного правой частью равенства (3), уменьшается и вырождается в кривую, которая характеризует критическое значение емкостного сопротивления. В контуре уже не могут существовать релейные эффекты:

$$\kappa_{\rm ckp} = \frac{x + x_{\rm d}}{2} \,. \tag{4}$$

Подставляя (4) в подкоренное выражение тождества (3), получим критическое активное сопротивление. При учете того, что оно может быть только положительным, имеем

$$r_{\rm kp} = -\frac{R+R_{\rm d}}{2} + \sqrt{\frac{(R-R_{\rm d})^2}{4} + (x-x_{\rm ckp})^2}.$$
 (5)

В области насыщения активное сопротивление дросселя, обусловленное потерями в стали, мало, и им, очевидно, можно пренебречь. Тогда выражение (5) упростится

$$r_{\rm kp} = x - x_{\rm ckp}.$$

41

Это значит, что в контуре с линейным активным сопротивлением релейные эффекты не могут существовать, если угол между током и питающим напряжением равен $\frac{\pi}{4}$. В общем случае, когда присутствуют как линейное, так и нелинейное активные сопротивления, критическое фазовое соотношение не является постоянным.

Рассмотрим результаты расчета и экспериментальной проверки для последовательной феррорезонансной цепи. Опытный образец имел ІШ-образный сердечник из трансформаторной стали и работал на частоте f = 50 гц при синусоидальном напряжении питания. Пересечения кривой, соответствующей зависимости правой части равенства (3) при r = 13 ом от тока, с прямой $x_c = \text{const}$ определяет расчетные значения тока при прямом и обратном скачках (рис. 2, б). Экспериментальные значения то-

T	a	б	Л	И	Ц	a	1
					-		

№ пп.	С (мкф)	Данные при ном увели	скачкообраз- чении тока	Данные при скачкообраз- ном уменьшении тока		
		I_{9}/I_{p} (a)	<i>U</i> э/ <i>U</i> р (в)	$I_{\mathfrak{I}}/I_{p}$ (a)	$U_{ m 9}/U_{ m p}$ (в)	
1	4	0,04	20,5	0,075	18,4	
2	8,5	0,06	34,5	0,25	<u> </u>	
3	14,00	$\frac{1,102}{0.097}$	47,7 44.6	$\frac{0,52}{0.43}$	19,7	
4	18,2	0,125	53,7	0,71	22,5	
5	22,3	0,16 0,175	58,1	0,87	25,8	
					Таблица 2	
№ пп.	С (мкф)	<i>I</i> _э (a)	<i>I</i> _p (a)	$U_{\mathfrak{z}}/U_{\mathfrak{p}}$ (b)	r _э /r _р (ом)	
1	4	0,05	0,045	25,5	<u>105</u> 61	
2	8,5	0,1	0,12	44 40.7	150	
3	14	0,165	0,245	<u>54,5</u> 54	111 108	
4	18,2	0,22	0,347	60 58,5	91 95	
1		0.38		68	85	

В табл. 1 приведены данные сравнения расчета и эксперимента в точках триггерных эффектов. При критическом режиме работы, в связи с трудностью эксперимента, нами было принято, что он имеет место при кратности скачка тока в контуре, не превышающей 1,4. Поэтому в табл. 2 приведены два значения экспериментально определенного тока соответственно току до и после скачка. Как показывает сравнение экспериментальных и расчетных данных, ошибка при определении параметров не превышает 10÷20%.

0,42

60.5

83,5

5

22,3

0.43

Выводы

1. При малых нагрузочных сопротивлениях в последовательном колебательном контуре токи в точках релейных эффектов могут быть определены как для консервативной системы. Для нахождения других параметров необходимо учитывать активную составляющую напряжения на дросселе, обусловленную потерями в стали, что позволяет с достаточной точностью произвести расчет.

2. При отсутствии нелинейного активного сопротивления в цепи критическое фазовое соотношение между током и питающим напряжением

является постоянным и равным $\frac{\pi}{4}$, чего нельзя сказать при его наличии.

3. Рассмотренный графоаналитический метод позволяет получить условия релейных эффектов в зависимости от статических и дифференциальных сопротивлений, что способствует большему пониманию физической картины процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. А. Гинзбург. Нелинейные цепи и их функциональные характеристики, ГЭИ, 1958.

2. М. А. Розенблат. Магнитные усилители. Том. 1, «Советское радно», 1960.

Л. А. Бессонов. «Электрические цепи со сталью», ГЭИ, 1948.
 Т. Хаяси. Нелинейные колебания в физических системах, «Мир», 1968.
 Л. А. Бессонов. Нелинейные электрические цепи. «Высшая школа», 1964.