

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-

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

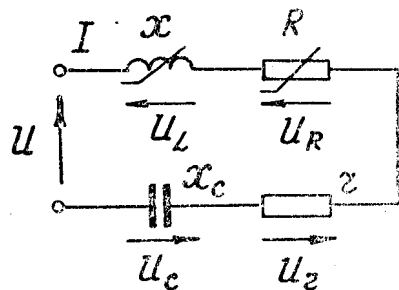


Рис. 1. Схема замещения феррорезонансной цепи

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.

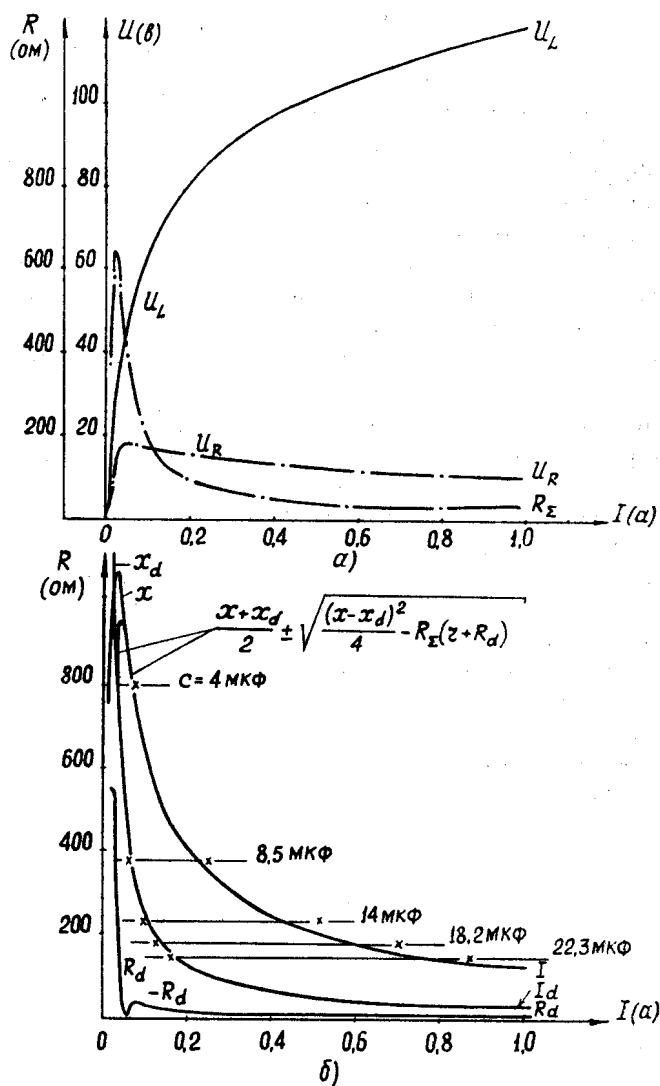


Рис. 2. Характеристики дросселя а) и феррорезонансного контура б)

Для рассматриваемой цепи справедливо выражение:

$$(U_L - U_c)_2 + (U_R + U_T)^2 = U^2. \quad (1)$$

Условием существования релейных эффектов в контуре является равенство

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

что вытекает из критерия Рауса-Гурвица [4]

Продифференцировав (1) по току, получим

$$(x - x_c)(x_d - x_c) + R_\Sigma(R_d + r) = 0, \quad (2)$$

где

x, x_d — статическое и дифференциальное реактивные сопротивления дросселя, соответственно;

R, R_d — статическое и дифференциальное активные сопротивления дросселя, соответственно;

x_c — статическое емкостное сопротивление.

Выражение (2) может быть разрешено относительно

$$x_c = \frac{x + x_d}{2} \pm \sqrt{\frac{(x - x_d)^2}{4} - R_\Sigma(R_d + r)}. \quad (3)$$

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 $x_c = \text{const}$, можно получить параметры контура, соответствующие скачкам тока (рис. 2, б). Здесь же представлено изменение активного дифференциального сопротивления дросселя от тока — R_d . В силу малости сопротивления нагрузки ($r = 13 \text{ ом}$) 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 $R_\Sigma = 0$, 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:

$$x_{\text{кр}} = \frac{x + x_d}{2}. \quad (4)$$

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

$$r_{\text{кр}} = -\frac{R + R_d}{2} + \sqrt{\frac{(R - R_d)^2}{4} + (x - x_{\text{кр}})^2}. \quad (5)$$

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

$$r_{\text{кр}} = x - x_{\text{кр}}.$$

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 Ш-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 тока отмечены на рисунке крестиками.

Таблица 1

№ пп.	С (мкф)	Данные при скачкообразном увеличении тока		Данные при скачкообразном уменьшении тока	
		I_3/I_p (а)	U_3/U_p (в)	I_3/I_p (а)	U_3/U_p (в)
1	4	0,04	20,5	0,075	18,4
		0,04	20,4	0,072	19,6
2	8,5	0,06	34,5	0,25	17,1
		0,065	33,6	0,23	18,4
3	14,00	1,102	47,7	0,52	19,7
		0,097	44,6	0,43	18,5
4	18,2	0,125	53,7	0,71	22,5
		0,132	50,6	0,63	20,5
5	22,3	0,16	58	0,87	25,8
		0,175	55,1	0,78	22,1

Таблица 2

№ пп.	С (мкф)	I_3 (а)	I_p (а)	U_3/U_p (в)	r_3/r_p (ом)
1	4	0,05	0,045	25,5	105
		0,068		22,2	61
2	8,5	0,1	0,12	44	150
		0,12		40,7	147
3	14	0,165	0,245	54,5	111
		0,22		54	108
4	18,2	0,22	0,347	60	91
		0,3		58,5	95
5	22,3	0,38	0,42	68	85
		0,43		60,5	83,5

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%.

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 радио», 1960.
3. Л. А. Бессонов. «Электрические цепи со сталью», ГЭИ, 1948.
4. Т. Хаяси. Нелинейные колебания в физических системах, «Мир», 1968.
5. Л. А. Бессонов. Нелинейные электрические цепи. «Высшая школа», 1964.