

М. А. РОЗЕНБЛАТ

**ВЫПРЯМЛЕНИЕ В НЕЛИНЕЙНЫХ СИММЕТРИЧНЫХ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ЦЕПЯХ**

(Представлено академиком В. С. Кулебакиным 15 VII 1949)

Все применяемые в настоящее время статические выпрямляющие устройства основаны на использовании нелинейных элементов с асимметричными вольт-амперными характеристиками. Если зависимость тока, протекающего через элемент, от приложенного к нему напряжения выражается в виде

$$I = f(U),$$

то под элементами с асимметричными характеристиками мы понимаем такие элементы, у которых

$$f(-U) \neq -f(U).$$

При подаче на зажимы нелинейного элемента с симметричной характеристикой (т. е. элемента, для которого  $f(-U) = -f(U)$ ) синусоидального напряжения выпрямление не имеет места. Происходит лишь искажение формы кривой протекающего через нелинейный элемент тока. Если же напряжение, подаваемое на зажимы нелинейного элемента, содержит две отличающиеся друг от друга по частоте составляющие, то, как будет показано, при определенных отношениях этих частот может иметь место выпрямление.

Характеристику симметричного нелинейного элемента можно аппроксимировать многочленом

$$I = \sum_{k=0}^n a_{2k+1} U^{2k+1}, \quad (1)$$

содержащим  $U$  в нечетных степенях. Высшую степень многочлена  $(2n+1)$  мы будем называть порядком нелинейности.

Рассмотрим сначала элементы с нелинейностью 3-го порядка, для которых

$$I = a_1 U + a_3 U^3.$$

Допустим, что  $U = A \cos pt + B \cos (qt + \alpha)$ ; тогда после соответствующих преобразований находим

$$\begin{aligned} I = & (a_1 A + \frac{3}{4} a_3 A^3 + \frac{3}{2} a_3 AB^2) \cos pt + \frac{1}{4} a_3 A^3 \cos 3pt + \\ & + (a_1 B + \frac{3}{4} a_3 B^3 + \frac{3}{2} a_3 A^2 B) \cos (qt + \alpha) + \frac{1}{4} a_3 B^3 \cos 3(qt + \alpha) + \\ & + \frac{3}{4} a_3 A^2 B \cos (2pt + qt + \alpha) + \frac{3}{4} a_3 AB^2 \cos (pt + 2qt + 2\alpha) + \\ & + \frac{3}{4} a_3 A^2 B \cos (qt - 2pt + \alpha) + \frac{3}{4} a_3 AB^2 \cos (2qt - pt + 2\alpha). \end{aligned}$$

Из этих формул видно, что выпрямление имеет место при  $p/q = 1/2$  и  $p/q = 2$ . В этих случаях получаем, соответственно, следующие значения постоянной составляющей тока:

$$I_0 = \sqrt[3]{4} a_3 A^2 B \cos \alpha, \quad I_0 = \sqrt[3]{4} a_3 A B^2 \cos 2\alpha.$$

Выпрямленный ток в обоих случаях достигает наибольшего значения при  $\alpha = 0$ .

Если проделать такие же вычисления для случая нелинейности 5-го порядка, то окажется, что выпрямление возможно при

$$\frac{p}{q} = \frac{1}{4}; \frac{2}{3}; \frac{3}{2}; \frac{4}{1}; \frac{1}{2} \text{ и } \frac{2}{1}.$$

Для нелинейности 7-го порядка выпрямление имеет место при отношениях частот, равных:

$$\frac{p}{q} = \frac{1}{6}; \frac{2}{5}; \frac{3}{4}; \frac{4}{3}; \frac{5}{2}; \frac{6}{1}; \frac{1}{4}; \frac{2}{3}; \frac{3}{2}; \frac{4}{1}; \frac{1}{2} \text{ и } \frac{2}{1}.$$

В общем случае нелинейности порядка  $2n + 1$  выпрямление происходит при следующих отношениях частот:

$$\begin{aligned} & \frac{p}{q} = \frac{1}{2n}; \frac{2}{2n-1}; \frac{3}{2n-2}; \dots; \frac{2n-2}{3}; \frac{2n-1}{2}; \frac{2n}{1}; \\ & \frac{1}{2n-2}; \frac{2}{2n-3}; \frac{3}{2n-4}; \dots; \frac{2n-4}{3}; \frac{2n-3}{2}; \frac{2n-2}{1}; \\ & \frac{1}{2n-4}; \frac{2}{2n-5}; \frac{3}{2n-6}; \dots; \frac{2n-6}{3}; \frac{2n-5}{2}; \frac{2n-4}{1}; \\ & \dots \\ & \dots \\ & \frac{1}{6}; \frac{2}{5}; \frac{3}{4}; \frac{4}{3}; \frac{5}{2}; \frac{6}{1}; \\ & \frac{1}{4}; \frac{2}{3}; \frac{3}{2}; \frac{4}{1}; \\ & \frac{1}{2}; \frac{2}{1}. \end{aligned}$$

При этом величина выпрямленного тока зависит от угла  $\alpha$  и всегда достигает максимального значения при  $\alpha = 0$ .

Выпрямление имеет место не только в электрических цепях, но и в нелинейных симметричных магнитных цепях. Если ферромагнитный материал подвергается намагничиванию полями двух различных частот, то при отношениях этих частот, равных приведенным выше значениям, в магнитном материале появляется постоянная составляющая магнитной индукции, несмотря на отсутствие постоянной составляющей м. д. с.

Величина постоянной составляющей магнитной индукции, появляющейся в результате магнитного выпрямления, может быть найдена, если в формулу, аппроксимирующую кривую намагничивания, подставить напряженность переменных магнитных полей, или же путем соответствующего графического построения.

Явление магнитного выпрямления наблюдалось нами в следующем опыте. На крайних стержнях трехстержневого сердечника (рис. 1), изготовленного из пермаллоя, помещены обмотки  $W_1$ , соединяемые таким образом, чтобы при пропускании через них тока создавался магнитный поток  $\Phi_1$ , проходящий лишь по крайним стержням. Эти

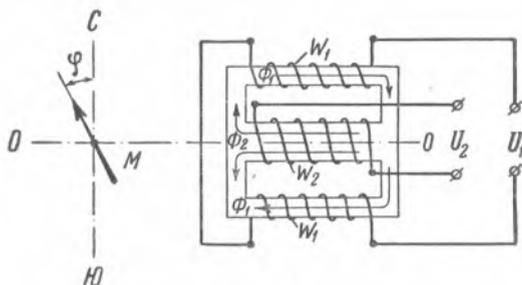


Рис. 1

обмотки подключались к сети переменного тока с частотой 50 гц. Обмотка  $W_2$ , расположенная на среднем стержне, подключалась к ламповому генератору, позволяющему изменять в широких пределах частоту напряжения  $U_2$ , подаваемого на зажимы этой обмотки. В этой схеме удается практически избежать влияния одной цепи на другую. На расстоянии около 80 мм от сердечника располагалась магнитная стрелка  $M$ . Ось симметрии  $O-O$  сердечника устанавливалась пер-

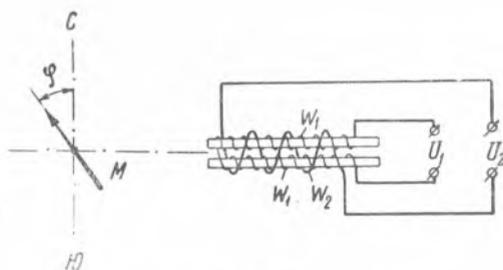


Рис. 2

пендикулярно магнитному меридиану. Отношение частот напряжений  $U_1$  и  $U_2$  и, следовательно, потоков  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  контролировалось по флагам Лиссажу, наблюдаемым на осциллопске.

Приведем значение угла отклонения  $\varphi$  магнитной стрелки  $M$  от направления магнитного меридиана в зависимости от частоты  $f_2$  напряжения  $U_2$ :

$f_2$ , гц	50*	100	150	200	300	400	500	600	700
$\varphi^\circ$	0	90	0	90	79	16	4	1	0

Очевидно, что отклонение магнитной стрелки обусловлено рассеянием постоянной составляющей магнитного потока, возникающей при частотах  $f_2$ , кратных  $f_1$  в четное число раз. Отметим, что явление выпрямления магнитного потока обнаруживалось и для дробных отношений  $f_2/f_1 = p/q$ , указанных выше. Так например, обнаруживались отклонения  $\varphi$  магнитной стрелки при частотах  $f_2$ , равных 20, 25, 40, 62,5, 66,6 75 гц и др.

\* При частоте  $f_2$ , близкой  $f_1$ , но не равной  $f_1$ , магнитная стрелка совершает колебания, обусловленные явлением биения. Однако при  $f_1 = f_2$  такие колебания прекращаются и  $\varphi = 0$ .

Явление магнитного выпрямления наблюдалось при тех же частотах и после замены трехстержневого сердечника двумя пермаллоевыми стержнями с обмотками, соединенными по схеме рис. 2

В заключение отметим, что рассмотренное явление магнитного выпрямления по существу лежит в основе действия магнесинов<sup>(1)</sup>. Правильное использование явления магнитного выпрямления позволяет значительно улучшить характеристики магнитных усилителей<sup>(2)</sup>.

Институт автоматики и телемеханики  
Академии наук СССР

Поступило  
6 VII 1949

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

<sup>1</sup> В. Н. Мильштейн, ЖТФ, 15, № 5—6, 248 (1945). <sup>2</sup> М. А. Розенблат, ЖТФ, 18, № 6, 765 (1948).