

Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 5 — 1975

УДК 621.374.4

Е. Ю. СМЕРНОВА

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФЕРРОМАГНИТНОГО УМНОЖИТЕЛЯ ЧАСТОТЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

При прямоугольной аппроксимации петли гистерезиса проведен расчет предельной мощности и к. п. д. многофазного умножителя частоты на ферромагнетике.

В работе [1] оценены предельные характеристики коэффициента полезного действия и мощности k -той нечетной гармоники реактивного умножителя частоты технического переменного тока с сегнетоэлектриком в качестве нелинейного реактивного элемента. Показано, в частности, что предельная мощность гармоники и к. п. д. преобразования лимитируются площадью петли гистерезиса и допустимыми напряжениями на конденсаторе.

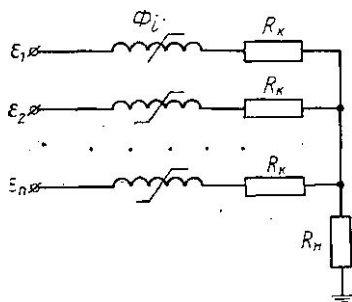


Рис. 1. Многофазная схема ферромагнитного умножителя частоты

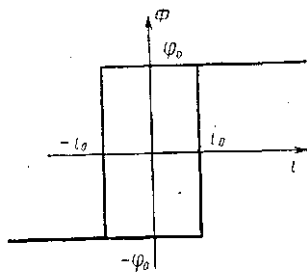


Рис. 2. Идеализированная петля гистерезиса ферромагнитного элемента

Если в аналогичной схеме многофазного реактивного умножителя вместо нелинейных конденсаторов использовать катушки индуктивности с ферромагнитным сердечником (рис. 1), то, несмотря на сходство магнитных характеристик ферромагнетика с электрическими характеристиками сегнетоэлектрика, характер работы умножителя будет иным. Во-первых, схема, изображенная на рис. 1, не является дуальной по отношению к аналогичной схеме на сегнетоэлектрике, поскольку первичный источник технического переменного тока в обоих случаях является ге-

ператором напряжения. Если сегнетоэлектрик в оптимальном режиме остается ненасыщенным при углах порядка $0 \div \pi/n$, то ферромагнетик при углах порядка $0 \div (\pi - \pi/n)$. Во-вторых, в ферромагнетике напряженность поля не лимитируется пробоем, как в сегнетоэлектрике, но выступают другие ограничения и среди них токовые потери в меди катушки.

В данной статье анализируются особенности многофазного ферромагнитного умножителя и дается оценка его предельных характеристик.

Существует много различных схем ферромагнитных умножителей [2]. Не касаясь возможностей улучшения параметров за счет таких решений, будем рассматривать простую и физически прозрачную схему [3, 4] многофазного умножителя (рис. 1), определим для него предельные характеристики при многократном умножении и сравним их с результатами расчетов аналогичной схемы на сегнетоэлектрике [1].

Расчет предельных параметров ферромагнитного умножителя переменного тока

Нелинейность характеристики катушки индуктивности с ферромагнитным сердечником обусловлена зависимостью магнитной проницаемости μ от напряженности магнитного поля, пропорциональной току. Зависимость эта, как известно, неоднозначна, и в общем случае ее аналитическое описание сложно.

Так же, как и в [1], будем аппроксимировать характеристику нелинейного элемента, имея в виду его работу в сильно нелинейном режиме при больших насыщениях, идеализированной петлей гистерезиса, прямоугольной и равновеликой реальной петле (рис. 2).

Рассмотрим работу умножителя. Напряжения в соседних линиях многофазной системы (см. рис. 1) сдвинуты относительно друг друга на угол ψ_k и равны

$$E_1 = E_m \sin \omega t,$$

$$E_2 = E_m \sin (\omega t + \psi_k),$$

$$E_k = E_m \sin [\omega t + (k-1) \psi_k].$$

Очевидно, если $k=2n+1$, то все гармоники, кратные $2n+1$, в нагрузке отсутствуют.

В каждом проводе нелинейный элемент, имеющий идеализированную характеристику (рис. 2), представляет собой импеданс, который в установившемся режиме низок в течение части полупериода и высок в течение остальной его части, а переход из одного состояния в другое происходит мгновенно. Величина Θ — часть полупериода, в течение которой проходит ток, определяется из очевидного соотношения:

$$\Phi_0 = \int_{\alpha}^{\alpha+\theta} E_m \sin \omega t dt \quad (1)$$

и зависит от амплитуды питания E_m , частоты ω и потока Φ_0 , соответствующего индукции насыщения.

Периодический ток в цепи определяется выражениями следующего вида:

$$i_1(\Theta) = i_0, \quad \varphi < \omega t < \varphi + \pi - \Theta,$$

$$\begin{aligned}
 i_-(\Theta) &= \frac{E_m}{R + R_H} \sin \omega t, \quad \pi + \varphi - \Theta < \omega t < \pi + \varphi, \\
 i_1(\Theta) &= i_0, \quad \pi + \varphi < \omega t < 2\pi + \varphi - \Theta, \\
 i_1(\Theta) &= \frac{E_m}{R + R_H} \sin \omega t, \quad 2\pi + \varphi \Theta < \omega t < 2\pi + \varphi,
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

где R — сопротивление обмотки нелинейной катушки, R_H — сопротивление нагрузки, $2i_0$ — ширина петли гистерезиса, $\sin \varphi = \frac{i_0(R + R_H)}{E_m}$.

Форма тока в цепи, питаемой синусоидальным напряжением, имеет вид, как показано на рис. 3, б. На рис. 4 для сравнения показаны реальные осциллограммы напряжения питания и тока в цепи. Сходство кривых позволяет сделать вывод о правомерности аппроксимации характеристики ферромагнитной катушки прямоугольной петлей гистерезиса.

Для эффективной работы многофазного умножителя необходимо, чтобы выполнялось следующее неравенство $\Theta < \frac{\pi}{k}$, в противном случае нелинейные элементы в цепях будут замыкаться накоротку одновременно. Если $\Theta \ll \frac{\pi}{k}$, то можно рассматривать процессы только в одном проводе. Разлагая (2) в ряд Фурье, находим амплитуды гармоник.

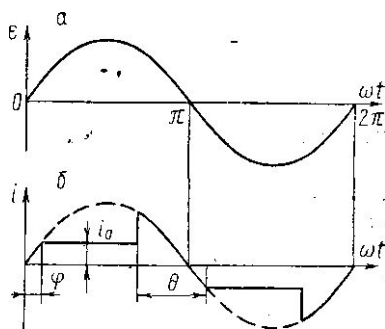


Рис. 3. Форма напряжения питания (а) и тока (б) в одной фазе многофазного умножителя.

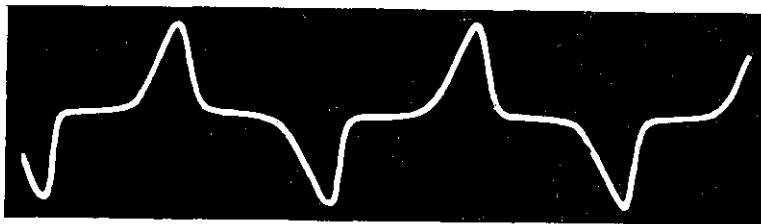


Рис. 4. Осциллограммы тока в одной фазе многофазного умножителя.

Проводя все вычисления (аналогично работе [1]), запишем выражение для мощности в нагрузке:

$$P_H = \frac{E_m^2}{2R_H \left(1 + \frac{R}{R_H}\right)} \left[\frac{\sin^2 n \theta}{(n \theta)^2} + \frac{\sin^2 (n+1) \theta}{[(n+1) \theta]^2} - 2 \frac{\sin \theta}{n \theta} \frac{\sin \theta (n+1) \theta}{(n+1) \theta} \cos \theta \right].
 \tag{3}$$

Аналитическое выражение для к. п. д. множителя имеет вид

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{R}{R_H}} \cdot \frac{\frac{\sin^2 n \theta}{(n \theta)^2} + \frac{\sin^2 (n+1) \theta}{[(n+1) \theta]^2}}{1 - \frac{\sin 2\theta}{2\theta} \cos 2\theta - \sin 2\varphi \frac{1 - \cos 2\theta}{2\theta}} - \frac{2 \frac{\sin n \theta}{n \theta} \frac{\sin (n+1) \theta}{(n+1) \theta} \cos \theta}{2 \sin \varphi \frac{\cos (\varphi - \theta) + \cos \varphi}{\theta}}, \quad (4)$$

где $k=2n+1$ — номер гармоники, равный числу фаз.

Анализ результатов

Сравнивая выражение (3) с соответствующим выражением для мощности гармоники в сегнетоэлектрическом множителе [1], видим, что выражения эти одинаковы. Хотя сегнетоэлектрический конденсатор пропускает ток в нагрузку в течение первой части полупериода входного напряжения, а ферромагнитный элемент — в течение последней части полупериода, амплитуда импульсов тока примерно одинакова и пропорциональна $\sin \pi/k$, а мощность гармоники $\sin^2 \pi/k$ в обоих случаях сильно падает с увеличением кратности умножения.

Рассмотрим, как связана мощность с параметрами ферромагнетика. Подставим в формулу (1), связывающую длительность протекания тока с параметрами схемы, $\Phi_0 = B_s Q W$, где B_s — индукция насыщения сердечника, Q — сечение сердечника, W — число витков катушки, получаем связь между амплитудой питания E_m и индукцией насыщения B_s , необходимую для нормальной работы устройства:

$$E_m = \frac{QW B_s \omega}{1 + \cos \theta}. \quad (5)$$

Подставляя (5) в выражение (3) для мощности в нагрузке, получаем

$$P_H = \frac{B_s^2 (QW)^2 \omega^2}{2R_H \left(1 + \frac{R}{R_H}\right)^2} f(n, \theta). \quad (6)$$

Мощность сегнетоэлектрического множителя [1] $P_H = E_m \omega q_0 f(n, \theta)$ пропорциональна величине рабочего поля E_m и величине q_0 , пропорциональной объему нелинейного материала. Увеличение мощности ограничивается лишь электрической прочностью сегнетоэлектрического конденсатора. (Неограниченного увеличения мощности за счет увеличения объема нелинейного материала получить нельзя, поскольку увеличение q_0 требует изменения режимов работы и увеличения E_m).

Как следует из (6), мощность в нагрузке ферромагнитного множителя увеличивается лишь за счет увеличения объема QW .

Увеличение кратности умножения согласно (5) приводит к уменьшению амплитуды питания, т. е. в конечном счете к уменьшению рабочего поля. Прямоугольная аппроксимация петли гистерезиса, положенная в основу расчета, в этом случае неправомерна. Тем не менее можно сказать, что эффективность будет падать, поскольку будет падать нелинейность характеристики.

Таким образом, использование сегнетоэлектрика в подобной схеме предполагает увеличение электрического поля в тем большей степени, чем больше кратность умножения k и чем больше величина выходной мощности. Предел увеличения электрического поля определяется лишь пробивной прочностью сегнетоэлектрического конденсатора. Ферромагнитный умножитель при увеличении кратности умножения должен работать при малых полях, т. е. эффективность использования ферромагнетика как нелинейного элемента падает.

Обратимся к выражению (4) для к. п. д. Степень падения к. п. д. от кратности умножения в сегнетоэлектрическом умножителе [1] увеличивалась с увеличением отношения U_0/E_m (ширины петли гистерезиса "амплитуде рабочего поля E_m). Проблема повышения к. п. д. сводится к уменьшению отношения U_0/E_m , т. е. опять-таки к повышению электрической прочности сегнетоэлектрического конденсатора.

К. п. д. ферромагнитного умножителя определяется параметром $\sin \varphi = \frac{i_0(R + R_H)}{E_m}$ и падает с увеличением кратности умножения

тем больше, чем больше $\sin \varphi$. Поскольку увеличение кратности умножения приводит к снижению амплитуды питания, величина $\sin \varphi$ возрастает и к. п. д. ферромагнитного умножителя падает более круто, чем в схеме на сегнетоэлектрике. На рис. 5 показаны зависимости к. п. д. от кратности умножения для сегнетоэлектрического (кривая 1) и ферромагнитного (кривая 2) умножителей.

Таким образом, ферромагнитный умножитель эффективен при малых кратностях умножения. Это согласуется с выводами из экспериментальных работ других авторов.

Следует заметить, что схема (рис. 1) ферромагнитного умножителя не является полным аналогом подобной схемы на сегнетоэлектрике. Полная аналогия получится при питании параллельной схемы от источника тока, получение которого связано с дополнительными потерями. Схема рис. 1 предполагает питание от сети переменного тока.

Авторы выражают признательность своему научному руководителю проф. М. Д. Карасеву за предложение темы и постоянное внимание к работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Смирнова Е. Ю. «Вестн. Моск. ун-та», физ., астрон., 15, 316, 1974.
2. Режанский Л. Л. Статические ферромагнитные умножители частоты. М.—Л., 1959.
3. Johnson L. J., Rauch S. E. «Trans. AIEE», 73, 1, 1954.
4. Johnson L. J., Rauch S. E. «Proc. IRE», 43, 168, 1955.

Поступила в редакцию
24.I 1973 г.

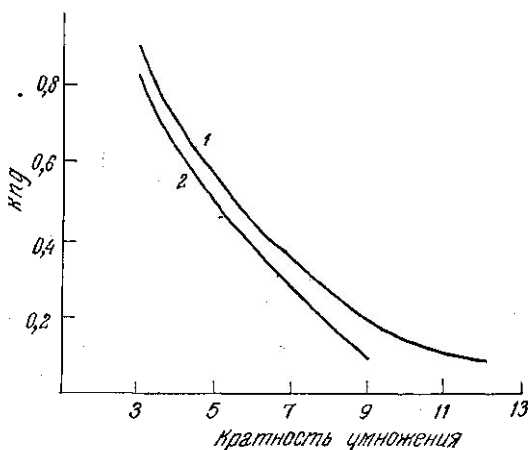


Рис. 5. К. п. д. многофазного умножителя

Кафедра
физики колебаний