

Р. АЛЛИКАС

ОБ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ В ФЕРРОМАГНИТНОМ УЧЕТВЕРИТЕЛЕ ЧАСТОТЫ

Статические ферромагнитные учетверители частоты с самоподмагничиванием второй гармоникой тока [1-4] обладают хорошими технико-экономическими показателями, но в то же время энергетические процессы в них недостаточно изучены. Исследование условий передачи энергии в учетверителе может быть сведено к изучению энергетических процессов в одном сердечнике [5, 6]. Для изучения этих процессов применяем метод, основанный на введении в отдельные цепи источников (напряжений или токов) различных частот [6, 7]. Для исключения влияния токов (или э. д. с.), наводимых в обмотках источниками других частот, в цепи обмоток включаются идеальные фильтры, допускающие наличие в цепях соответствующих источников токов или напряжений лишь одной частоты (см. рисунок). Кроме того, предполагаем, что кривая намагничивания безгистерезисная и аппроксимируется выражением

$$b = Ah - Bh^3, \quad (1)$$

где b — магнитная индукция; h — напряженность магнитного поля; A и B — константы, определяемые экспериментально.

Уравнение (1) годится для описания кривых намагничивания до значения $h = \sqrt{A/(3B)}$ [5]. Приближение индукции b в виде степенного полинома (1) от напряженности магнитного поля дает возможность просто вычислять потоки активных мощностей (3).

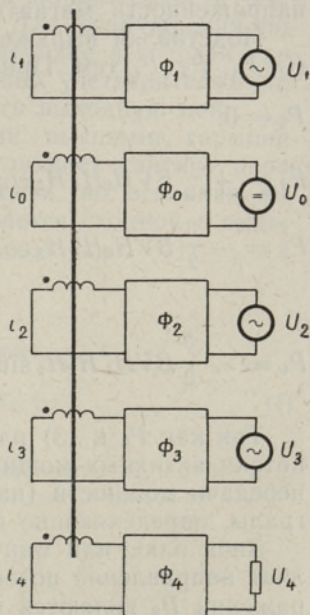


Схема для анализа энергетических процессов в одном сердечнике с дополнительным подмагничиванием второй и третьей гармониками тока.

Напряженность магнитного поля сердечника h является суммой напряженностей магнитного поля первичной цепи h_1 , цепи подмагничи-

вания h_0 , цепи дополнительного подмагничивания h_2 и выходной цепи h_4 , определяемых соответствующими токами i_1 , i_0 , i_2 и i_4 :

$$h = h_1 + h_0 + h_2 + h_4 = (i_1\omega_1 + i_0\omega_0 + i_2\omega_2 + i_4\omega_4)/l,$$

где ω_1 , ω_0 , ω_2 , ω_4 — число витков обмоток названных цепей; l — длина средней магнитной линии.

Потоки активных мощностей условно считаем принадлежащими тем цепям, токи которых i_1 , i_0 , i_2 , i_4 вызывают компоненты напряженности h_1 , h_0 , h_2 , h_4 магнитного поля сердечника. Эти потоки активных мощностей определены следующими интегралами:

$$P_n = \frac{V}{2\pi} \int_0^{2\pi} h_n \frac{db}{d\tau} d\tau, \quad (3)$$

где $n = 0, 1, 2, 4$ — индексы цепей; V — объем ферромагнитного материала; τ — время, измеряемое в радианах.

Считаем, что первичный ток i_1 содержит только первую гармонику, в цепи подмагничивания имеется только постоянный ток i_0 , в цепи подмагничивания с промежуточной гармоникой тока и в выходной цепи имеются только переменные токи i_2 и i_4 соответственно второй и четвертой гармоникам. В этом случае компоненты напряженности магнитного поля имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} h_1 &= H_1 \sin(\tau + \alpha), \\ h_0 &= H_0 = \text{const}, \\ h_2 &= H_2 \sin(2\tau + \beta), \\ h_4 &= H_4 \sin(4\tau + \gamma), \end{aligned} \quad (4)$$

где H_1 , H_2 , H_4 — амплитуды; α , β , γ — начальные фазы компонентов напряженности магнитного поля.

Подставляя выражения (1), (2) и (4) в (3) и вычисляя интегралы P_0 , P_1 , P_2 , P_4 (см. Приложение), получаем:

$$\begin{aligned} P_0 &= 0, \\ P_1 &= +\frac{3}{2}BVH_0H_1^2H_2\cos(2\alpha - \beta) + \frac{3}{4}BVH_1^2H_2H_4\sin(2\alpha + \beta - \gamma), \\ P_2 &= -\frac{3}{2}BVH_0H_1^2H_2\cos(2\alpha - \beta) + \frac{3}{4}BVH_1^2H_2H_4\sin(2\alpha + \beta - \gamma) + \\ &\quad + 3BVH_0H_2^2H_4\cos(2\beta - \gamma), \\ P_4 &= -\frac{3}{2}BVH_1^2H_2H_4\sin(2\alpha + \beta - \gamma) - 3BVH_0H_2^2H_4\cos(2\beta - \gamma). \end{aligned} \quad (5)$$

Так как P_0 в (3) равен нулю, то цепь постоянного тока не передает потоки активных мощностей, а только создает физические условия для передачи мощности (напряженность магнитного поля h_0 входит в интегралы, определяющие потоки активных мощностей P_1 , P_2 и P_4).

Знак плюс или минус перед слагаемыми в выражениях (5) определяет направление потоков активной мощности. Часть слагаемых в выражении P_2 являются положительными, часть — отрицательными. Это значит, что в цепи дополнительного подмагничивания происходят изменения потоков активной мощности с определенными наборами гармоник напряженности магнитного поля, т. е. они входят в эту цепь при

одних комбинациях гармоник напряженностей магнитного поля, а входят при других. Если энергетическое равновесие в цепи подмагничивания второй гармоникой тока нарушено, в учетверителе появляются автоколебания. Устранить их можно введением в схему активных или реактивных элементов. Из выражений (5) видно, что часть активной мощности передается прямо во вторичную цепь, а часть — через цепь дополнительного подмагничивания, как было отмечено в [8].

Подмагничивание сердечника третьей гармоникой напряженности магнитного поля также влияет на преобразование потоков активной мощности. Заменяя h_2 в выражениях (4) на $h_3 = H_3 \sin(3\tau + \beta)$, получим:

$$P_1 = +\frac{3}{8}BVH_1^3 H_3 \sin(3\alpha - \beta) + \frac{3}{2}BVH_0 H_1 H_3 H_4 \cos(\alpha + \beta - \gamma),$$

$$P_3 = -\frac{3}{8}BVH_1^3 H_3 \sin(3\alpha - \beta) + \frac{9}{2}BVH_0 H_1 H_3 H_4 \cos(\alpha + \beta - \gamma), \quad (6)$$

$$P_4 = -6BVH_0 H_1 H_3 H_4 \cos(\alpha + \beta - \gamma).$$

где H_3 — амплитуда третьей гармоники напряженности магнитного поля.

Из выражений (6) видно, что и в этом случае происходит изменение потоков активной мощности с одним набором гармоник напряженности магнитного поля в другой. Из изложенного следует, что подмагничивание сердечника высшими гармониками напряженности магнитного поля оказывает существенное влияние на передачу потоков активной мощности. Например, при ограничениях (1) и (4) подмагничивание сердечника только постоянным током не создает условий для преобразования частоты активной мощности. Чтобы осуществить такое преобразование, необходимо присутствие высших гармоник напряженности магнитного поля. То же самое можно сказать и в отношении подмагничивания сердечника только второй гармоникой напряженности магнитного поля при $P_2 = 0$ (см. выражение (5)). Для возбуждения последнего режима необходимо присутствие в сердечнике четвертой гармоники напряженности магнитного поля. В реальных учетверителях для возбуждения такого режима достаточно укоротить выходную цепь.

Одновременное подмагничивание несколькими высшими гармониками напряженности магнитного поля сильно усложняет картину передачи и преобразования потоков активной мощности, но основная качественная картина энергетических процессов остается сходной с вышеизложенными.

Приложение

Интеграл мощности распадается на слагаемые двух типов:

$$I_1 = \int_0^T h_a db(h_c, h_d), \quad I_2 = \int_0^T h_a db(h_c, h_d, h_f), \quad (1)$$

где индексы a, c, d, f принимают значения 0, 1, 2, 4. Компоненты h_a, h_c, h_d и h_f напряженности магнитного поля h имеют следующий вид:

$$h_a = \sum_k H_{ak} \sin(kt + \alpha_k),$$

$$h_c = \sum_l H_{cl} \sin(lt + \beta_l),$$

$$h_d = \sum_m H_{dm} \sin(mt + \gamma_m), \quad (2)$$

$$h_f = \sum_n H_{fn} \sin(nt + \delta_n),$$

где k, l, m, n — порядковые номера и $\alpha_k, \beta_l, \gamma_m, \delta_n$ — начальные фазы гармоник напряженности магнитного поля. Для вычисления интегралов (1) используем следующие формулы:

$$I_1 = \frac{\pi}{9} \sum_{k,l,m} \sum_{p=1}^3 G_{plm} H_{ak} H_{cl} H_{dm} \cos \Delta p, \quad (3)$$

$$I_2 = \frac{\pi}{4} \sum_{k,l,m,n} \sum_{s=1}^7 G_{slmn} H_{ak} H_{cl} H_{dm} H_{fn} \sin \Delta s.$$

Величины $G_{plm}, G_{slmn}, \Delta p$ и Δs находим из табл. 1 и 2 при условии, что $\lambda_p = 0$ или $\lambda_s = 0$.

Таблица 1

p	λ_p	G_{plm}	Δp
1	$k+l-m$	$l-m$	$\alpha_k + \beta_l - \gamma_m$
2	$k-l+m$	$-l+m$	$\alpha_k - \beta_l + \gamma_m$
3	$-k+l+m$	$l+m$	$-\alpha_k + \beta_l + \gamma_m$

Таблица 2

s	λ_s	G_{slmn}	Δs
1	$k+l+m-n$	$l+m-n$	$\alpha_k + \beta_l + \gamma_m - \delta_n$
2	$k+l-m-n$	$-l+m+n$	$\alpha_k + \beta_l - \gamma_m - \delta_n$
3	$k-l+m-n$	$l-m+n$	$\alpha_k + \beta_l - \gamma_m + \delta_n$
4	$-k+l+m-n$	$-l-m+n$	$-\alpha_k + \beta_l + \gamma_m - \delta_n$
5	$k+l-m+n$	$l-m+n$	$\alpha_k + \beta_l - \gamma_m + \delta_n$
6	$k-l+m+n$	$-l+m+n$	$\alpha_k - \beta_l + \gamma_m + \delta_n$
7	$-k+l+m+n$	$l+m+n$	$-\alpha_k + \beta_l + \gamma_m + \delta_n$

ЛИТЕРАТУРА

- Захаров Н. В., Бамдас А. М., Шапиро С. В., Авт. свид. № 161400, 1962; Бюлл. изобр., № 7, 1964.
- Захаров Н. В., Тр. Горьковск. политехн. ин-та, 20, вып. 6, 12 (1965).
- Захаров Н. В., Статические ферромагнитные учетверители частоты, Автореферат диссертации, Горький, 1965.
- Естигнеева Т. А., Тр. Горьковск. политехн. ин-та, 23, вып. 2, 44 (1967).
- Бессонов Л. А., Нелинейные электрические цепи, М., 1958.
- Мелодиев Л. С., Энергетические соотношения в электрических цепях с ферромагнитной связью, Тр. Международ. симпозиума по нелинейным колебаниям, 1961, 3, Киев, АН УССР, 1963, с. 230.
- Розенблат М. А., Магнитные усилители, М., 1960.
- Бамдас А. М., Шапиро С. В., Захаров Н. В., Махин Ю. И., Тр. Горьковск. политехн. ин-та, 19, вып. 3, 33 (1963).

R. ALLIKAS

**ENERGEETILISTEST PROTSESSIDEST FERROMAGNETILISTES
SAGEDUSE NELJAKORDISTITES**

Kirjeldatakse võimsuse ülekande protsessi aktiivvõimsuse voogude abil, mille määravad magnetvälja tugevuse kindlad harmooniliste kombinatsioonid. Sageduse neljakordistis kantakse osa aktiivvõimsusest üle väljundahelasse otse, osa — teise harmoonilise vooluga lisamagneetimisahela kaudu. Viimases toimub aktiivvõimsuse vooge määravate magnetvälja tugevuse harmooniliste kombinatsiooni muutmine. Energeetiliste protsesside analüüsist järeldub, et nagu teise, nii suurendab ka kolmas harmooniline vool lisamagneetimise aktiivvõimsuse voogu väljundahelasse.

R. ALLIKAS

**ENERGETIC PROCESSES IN FERROMAGNETIC FREQUENCY
QUADRUPLERS**

The author describes the process of energy exchange by means of active power fluxes being determined by certain harmonic combinations of magnetic field strength. In a frequency quadrupler, a part of active power is transmitted into the output circuit directly and the rest — through the additional second-harmonic current control circuit. In that circuit the change of harmonic combinations of magnetic field strength determining the active power fluxes takes place. An analysis of the energetic processes reveals that additional second and third harmonic current magnetization increases the active power flux into the output circuit.

