

Р. АЛЛИКАС

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В СТАТИЧЕСКОМ ФЕРРОМАГНИТНОМ УДВОИТЕЛЕ ЧАСТОТЫ

В настоящее время известен ряд статических силовых ферромагнитных умножителей частоты, среди которых умножители с самоподмагничиванием промежуточной гармоникой тока обладают хорошими энергетическими показателями [1-4]. В качестве составной части учетверителей и увосьмерителей частоты названного типа работает удвоитель частоты. Энергетические процессы в нем определяют процессы и в указанных умножителях. В отличие от предшествующих работ [5-7], энергетические процессы в данном удвоителе исследуются с помощью периодических циклов в координатах мгновенных значений напряженности магнитного поля h и магнитной индукции b . Площадь этих циклов пропорциональна активной энергии и поэтому они называются энергетическими [8, 9].

При анализе пренебрегаем падением напряжения на активных сопротивлениях обмоток, потоками рассеяния и потерями в сердечниках. Одновременно считаем, что в цепь обмотки подмагничивания включена индуктивность $L = \infty$, т. е. по цепи проходит только постоянный ток i_0 .

Заменяем два сердечника реального удвоителя частоты одним эквивалентным сердечником. Условиями эквивалентности являются сохранение объема магнитопровода V и величины первичного напряжения и тока. Постоянное подмагничивание учитывается формой кривой намагничивания эквивалентного сердечника. Использование понятия «эквивалентный сердечник» позволяет свести анализ процессов удвоителя частоты с двумя сердечниками к анализу фиктивного удвоителя, имеющего лишь один сердечник, одну первичную и одну вторичную обмотку. Такая замена значительно упростит анализ энергетических процессов в удвоителе.

Изменения магнитных состояний эквивалентного сердечника удвоителя частоты создают условия для передачи энергии из первичной цепи во вторичную. Работа A , затрачиваемая первичным источником э.д.с. в течение периода T на изменение магнитного состояния эквивалентного сердечника удвоителя в единице объема вещества, определяется следующим соотношением:

$$A = \int_0^T \frac{dA'}{IS} = \int_0^T \frac{i}{IS} d\psi = \int_0^T \frac{i\omega}{l} d\left(\frac{\varphi}{S}\right) = \int_0^T h db, \quad (1)$$

где A' — работа, затрачиваемая первичным источником э.д.с. на изменение магнитного состояния эквивалентного сердечника;

- S — поперечное сечение эквивалентного сердечника;
 l — длина средней линии магнитной индукции;
 ω, i, ψ — число витков, ток и потокосцепление исследуемой обмотки;
 h, φ, b — мгновенные значения напряженности магнитного поля, магнитного потока и магнитной индукции;
 T — период первичного напряжения.

Кривую намагничивания эквивалентного сердечника при заданном постоянном подмагничивании удвоителя частоты в режиме холостого хода удобно найти графически [10–12].

В общем случае напряженность магнитного поля h и магнитная индукция эквивалентного сердечника b определяются по следующим выражениям:

$$h = \frac{\sum_{k=1}^n V_k h_k}{\sum_{k=1}^n V_k}, \quad b = \frac{\sum_{k=1}^n V_k b_k}{\sum_{k=1}^n V_k}, \quad (2)$$

где V_k, b_k, h_k — объем, магнитная индукция и напряженность магнитного поля отдельного сердечника.

Для исключения из формул таких параметров, как число витков обмоток ω , активное поперечное сечение S и длина средней линии магнитной индукции сердечника l , частота f , величины, характеризующие кривую намагничивания, используем следующие выражения [13]:

$$\begin{aligned}
 t^0 &= \omega t, \\
 u^0 &= \frac{u}{\omega S B_{\text{баз}}}, \\
 z^0 &= \frac{u^0}{i^0} = \frac{l H_{\text{баз}}}{\omega \omega^2 B_{\text{баз}}} z, \\
 h^0 &= F^0 = i^0 = \frac{i \omega}{l H_{\text{баз}}} = \frac{h}{H_{\text{баз}}}, \\
 b_0 &= \varphi^0 = \psi^0 = \frac{b}{B_{\text{баз}}}, \\
 \omega^0 &= 1, \quad \omega^0 = 1 \text{ рад/сек},
 \end{aligned} \quad (3)$$

где $B_{\text{баз}}$ и $H_{\text{баз}}$ — выбранные базисные значения магнитной индукции и напряженности магнитного поля;

ω — круговая частота первичного тока;

t — время;

u — напряжение на обмотке;

i — ток в обмотке;

F — магнитодвижущая сила;

z — комплексное сопротивление.

В дальнейшем все величины относительных единиц пишем без верхнего индекса.

Уравнения удвоителя частоты для первичной и вторичной цепи, учитывая (2) и (3), имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
 b_1 &= \frac{1}{2} [b_A(h_1 + h_0 + h_2) + b_B(h_1 - h_0 - h_2)], \\
 b_2 &= \frac{1}{2} [b_A(h_1 + h_0 + h_2) - b_B(h_1 - h_0 - h_2)],
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

где индексами 0; 1; 2 отмечены соответствующие величины цепи подмагничивания, первичной и вторичной цепи.

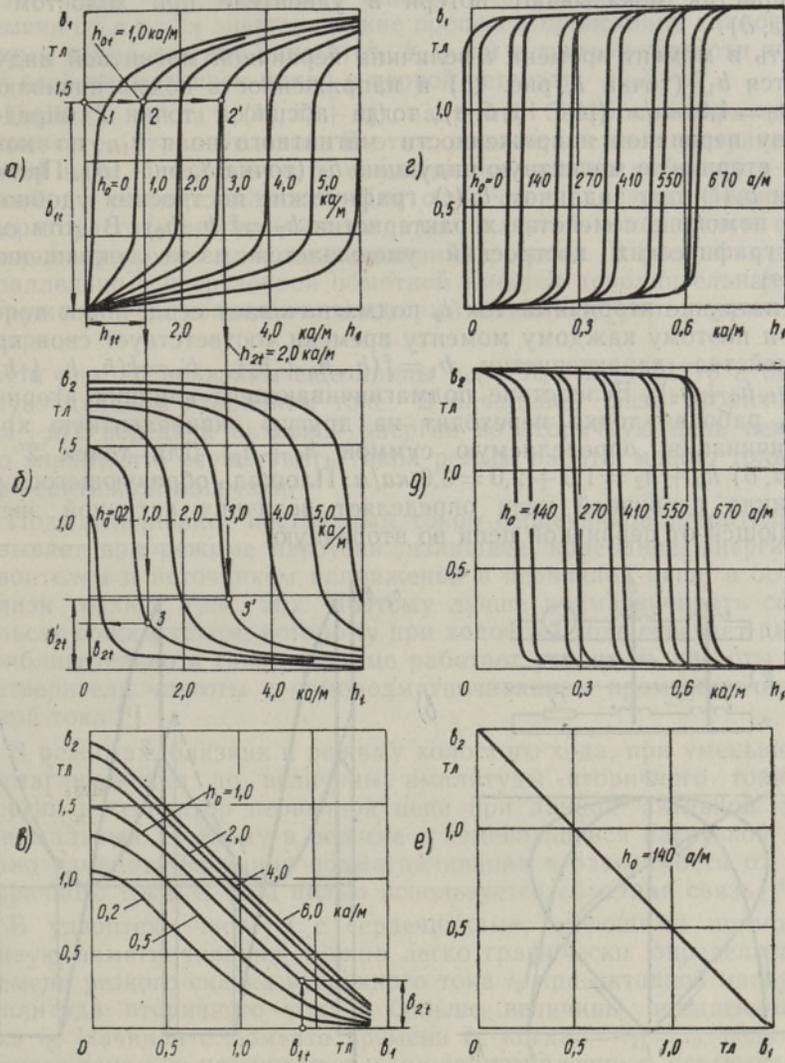


Рис. 1. Семейство кривых двойного намагничивания для мгновенных величин:

а — $b_1=f(h_1, h_0)$; б — $b_2=f(h_1, h_0)$; в — $b_2=f(b_1, h_0)$ для броневого магнитопровода из стали Э310-0,50, рассчитанные по средним кривым намагничивания конкретного сердечника; г — $b_1=f(h_1, h_0)$; д — $b_2=f(h_1, h_0)$; е — $b_2=f(b_1, h_0)$ для ленточного магнитопровода из пермаллоя 50 НП толщиной 0,05 мм сняты при частоте 50 гц.

Для анализа энергетических процессов удвоителя частоты в различных режимах работы необходимо знать семейство кривых $b_1=f(h_1, h_0)$ и $b_2=f(h_1, h_0)$ мгновенных величин напряженности магнитного поля и магнитной индукции при различных величинах подмагничивания. Эти

характеристики можно вычислить по основной кривой намагничивания сердечников или определить экспериментально.

На рис. 1 приведены семейства кривых $b_1 = f(h_1, h_0)$, $b_2 = f(h_1, h_0)$ и $b_2 = f(b_1, h_0)$ удвоителя частоты, сердечники которого изготовлены из стали Э310-0,50 (рассчитаны по средним кривым намагничивания) и из пермаллоя 50 НП (получены экспериментально). Петли «гистерезиса» характеристик показывают потери в удвоителе при холостом ходе (рис. 1а, д).

Пусть в момент времени t величина первичной магнитной индукции равняется b_{1t} (точка 1, рис. 1а) и напряженность подмагничивающего поля $h_0 = 1,0$ ка/м (рис. 1а, б, в), тогда абсцисса точки 2 определяет величину первичной напряженности магнитного поля h_{1t} , по которой найдем вторичную магнитную индукцию b_2 (точка 3, рис. 1б). При определении $b_2(t)$ при заданном $b_1(t)$ графические построения удобно провести с помощью семейства характеристик $b_2 = f(b_1, h_0)$. В этом случае число графических построений уменьшается из-за сокращения h_1 (рис. 1в).

При нагрузке вторичный ток i_2 подмагничивает сердечники дополнительно и поэтому каждому моменту времени соответствует своя кривая из семейства характеристик $b_1 = f(h_1, h_0 + h_2)$, $b_2 = f(h_1, h_0 + h_2)$ и $b_2 = f(b_1, h_0 + h_2)$. Вследствие подмагничивающего влияния вторичного тока i_2 рабочая точка переходит на другую эквивалентную кривую намагничивания, определяемую суммой $h_0 + h_2$. Для точек 2' и 3' (рис. 1а, б) $h_0 + h_2 = 1,0 + 2,0 = 3,0$ ка/м. Площадь образующегося рабочего цикла первичной цепи определяет величину активной энергии, поступающей от первичной цепи во вторичную.

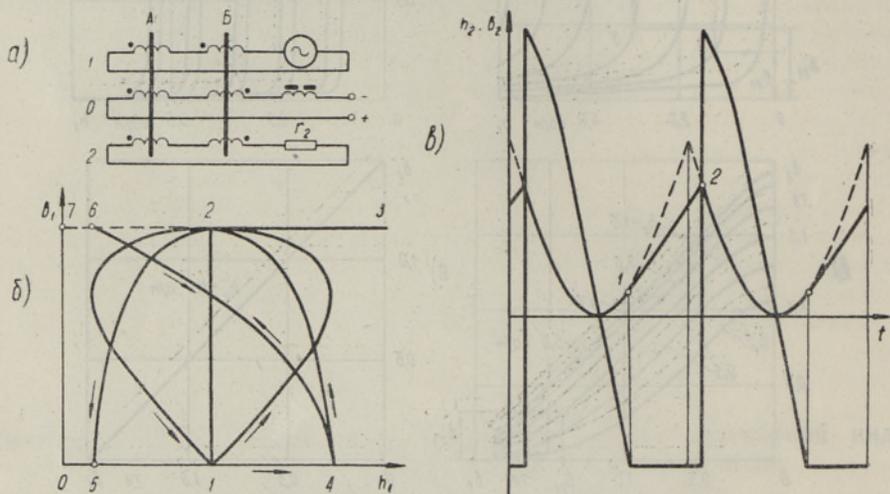


Рис. 2. Графики процессов и схема удвоителя частоты с сердечниками с прямоугольной кривой намагничивания:

а — принципиальная схема удвоителя частоты; б — энергетические циклы удвоителя частоты при различных режимах работы; в — определение резкого скачка вторичного тока.

На рис. 2б приведены некоторые теоретические циклы $b_1(h_1, h_0 + h_2)$ удвоителя частоты с прямоугольной кривой намагничивания сердечников. Циклы 0123 и 51425 определяют энергетические процессы в режиме холостого хода и активной нагрузки в случае, когда амплитуда вторичного тока i_2 меньше тока подмагничивания.

В интервале времени от нуля до $\pi/2$ первичной магнитной индукции b_1 энергия, пропорциональная площади 04270, поступает от источника первичной цепи в удвоитель частоты, частично превращаясь в тепло во вторичном сопротивлении r_2 (площадь 1421) и частично оставаясь в запасе в удвоителе частоты (площадь 01270). В течение периода от $\pi/2$ до π часть энергии возвращается в первичную цепь (05270), а другая часть (5125) превращается в тепло на сопротивлении r_2 . В интервале времени от π до 2π энергетические процессы происходят аналогично описанным выше, так как цикл $b_1(h_1, h_0 + h_2)$ в третьей четверти координатных осей симметричен циклу в первой четверти.

Площадь цикла $b_1(h_1, h_0 + h_2)$, например 52415, при обратном обходе оказывается отрицательной. В этом режиме энергия поступает из вторичной цепи в первичную, т. е. удвоитель частоты работает в обратном режиме, в режиме делителя. Для осуществления этого режима, кроме генератора тока вторичной цепи, надо включить в первичную цепь генератор напряжения для поддержания режима. В реальных делителях параллельно с нагрузочной обмоткой имеется дополнительная обмотка, нагруженная на конденсатор, который выполняет роль первичного генератора.

На рис. 2б показаны еще циклы $b_1(h_1, h_0 + h_2)$ (01210 и 04640) при синусоидальном вторичном токе. В начальной фазе вторичного тока $\varphi = \pm\pi/2$ передача активной энергии во вторичную цепь невозможна. Это значит, что осуществить такой режим работы можно только в случае реактивной нагрузки.

Подмагничивание постоянным током сердечников удвоителя частоты вызывает при режиме нагрузки излишнее колебание энергии между удвоителем и источником напряжения в первичной цепи, в особенности вблизи точки 2 (рис. 2б). Поэтому лучше подмагничивать сердечники пульсирующим током, которому при холостом ходе отвечает цикл 04640. Приблизительно в таком режиме работает удвоитель частоты в составе учетверителя частоты с самоподмагничиванием промежуточной гармоникой тока [1].

В режимах, близких к режиму холостого хода, при уменьшении тока подмагничивания до величины амплитуды вторичного тока возврат энергии в генератор первичной цепи при данной активной мощности минимальный. Поэтому в режиме с изменяющейся нагрузкой целесообразно изменять величину подмагничивания в зависимости от величины вторичного тока. С этой целью используется обратная связь [14-17].

В удвоителе частоты с сердечниками, имеющими прямоугольную кривую намагничивания, можно легко графически определить момент времени резкого скачка вторичного тока i_2 при активной нагрузке, если амплитуда вторичного тока i_2 больше величины подмагничивающего тока i_0 . Начиная с момента времени t_1 , когда $|-i_2| = i_0$, величины вторичного тока i_2 и напряжения u_2 на сопротивлении r_2 остаются неизменными. Вторичная магнитная индукция b_2 удвоителя частоты должна в то же время изменяться линейно $b_2 = \int u_2 dt = u_2 t + C$. Начиная с точки 1 изменение вторичной магнитной индукции b_2 продолжается по касательной синусоиды до точки 2 (рис. 2в). В этот момент и происходит резкий скачок вторичного тока. Процессы в удвоителе частоты при комплексной нагрузке в промежутке времени, когда суммарная напряженность магнитного поля эквивалентного сердечника равняется нулю, определяются аналогично приведенным выше.

Сущность ограниченности мгновенных величин вторичного тока

состоит в том, что, независимо от величины и направления суммарной намагничивающей силы сердечников, характеристики $b_1 = f(h_1, h_0)$ удвоителя частоты остаются в первой и третьей четверти координат. Точнее, рабочая точка не выходит за пределы области, определенной семейством кривых намагничивания эквивалентного сердечника (рис. 1).

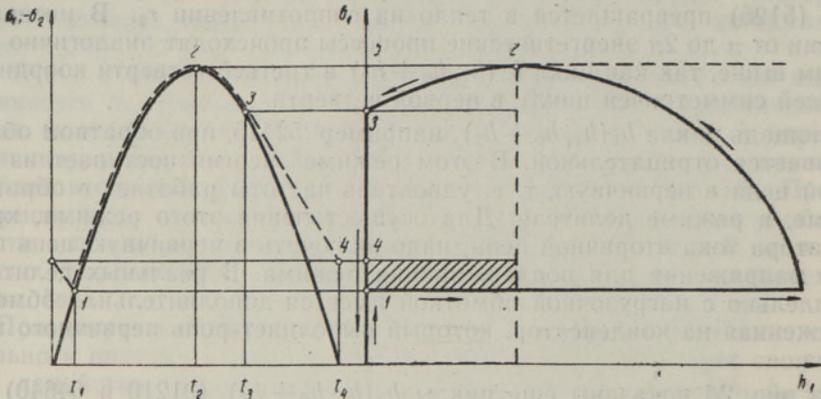


Рис. 3. Энергетический цикл удвоителя в режиме, близком к режиму короткого замыкания.

Из-за влияния размагничивающей силы скачкообразного вторичного тока i_2 нижняя часть энергетического цикла первичной цепи поднимается вверх (рис. 3), уменьшая его площадь, чем и объясняется ограниченность вторичной мощности. При установленном режиме в интервале времени от нуля до t_1 поглощение энергии на активной нагрузке покрывается за счет запасенной энергии в удвоителе частоты (на рис. 3 соответствующая площадь заштрихована). При определении начальной точки энергетического цикла учитываем измененный ход вторичной магнитной индукции $b_2(t)$, который на рисунке показан пунктиром. С момента времени t_1 до t_2 генератор напряжения первичной цепи дает энергию, частично поглощаемую во вторичной нагрузке. Начиная с момента времени t_2 , потери во вторичном сопротивлении опять покрываются за счет энергии, запасенной в удвоителе. Часть этой энергии, пропорциональная площади 253, возвращается в первичную цепь.

Выводы

1. При анализе энергетических процессов удвоителя частоты по характеристикам $b_1 = f(h_1, h_0)$ и $b_2 = f(h_1, h_0)$ графическим методом неидентичность кривых намагничивания сердечников удвоителя частоты и несинусоидальность первичного напряжения не имеют принципиального значения.

2. Циклы $b_1(h_1, h_0 + h_2)$ характеризуют энергетический режим удвоителя частоты, работающего самостоятельно или в составе различных устройств. По этим циклам легко оценить оптимальность энергетических режимов устройства и возможные пути улучшения этих режимов.

3. Семейство кривых намагничивания эквивалентного сердечника удвоителя частоты определяет область существования кривой энергетического цикла и позволяет объяснить особенности передачи энергии и физических процессов в удвоителе.

4. Обратный энергетический процесс удвоителя частоты соответ-

вует энергетическому процессу делителя частоты. Деление частоты происходит только при наличии в схеме генератора, работающего на деленной частоте.

ЛИТЕРАТУРА

1. Захаров Н. В., Бамдас А. М., Шапиро С. В., Авт. свид. № 161400, 1962; Бюлл. изобр., № 7, 1964.
2. Бамдас А. М., Шапиро С. В., Захаров Н. В., Махин Ю. И., Тр. Горьк. политехн. ин-та им. А. А. Жданова, **19**, вып. 3 (1963).
3. Бамдас А. М., Шапиро С. В., Блинов И. В., Захаров Н. В., Махин Ю. И., Тр. Горьк. политехн. ин-та им. А. А. Жданова, **20**, вып. 6, 5 (1965).
4. Бамдас А. М., Шапиро С. В., Изв. вузов, Электромеханика, **10**, № 11, 1237 (1967).
5. Васка М. Р., Тр. Ин-та термофиз. и электрофиз. АН ЭССР, Вопросы преобразования электроэнергии, Таллин, 1965, с. 17.
6. Оявээр М. Р., Об энергетике преобразовательного процесса в статическом ферромагнитном удвоителе частоты. В кн.: Магнитные аналоговые элементы, М., 1965, с. 127.
7. Покровский С. В., Изв. вузов, Электромеханика, **5**, № 2, 224 (1962).
8. Рахимов Г. Р., Феррорезонанс, Ташкент, Изд-во АН УзССР, 1967.
9. Рахимов Г. Р., Тр. Ташк. политехн. ин-та, вып. 18, новая серия (1961).
10. Лехтман И. Я., Автоматика и телемеханика, **16**, № 5, 467 (1955).
11. Лехтман И. Я., Автоматика и телемеханика, **27**, № 3, 130 (1956).
12. Каляев А. В., Тр. Таганр. радиотехн. ин-та, **2**, 125 (1958).
13. Бамдас А. М., Савиновский Ю. А., Управляемые дроссели радиоэлектронной аппаратуры, М., «Советское радио», 1966.
14. Haggioi L. C., Magnetic Frequency conversion. Proc. National Electronics Conference, Chicago, III, **9**, 78 (1953).
15. Dick G. M., Trans. Am. Inst. Electr. Engrs., part. I, **79**, 125 (1960).
16. Сарв В. В., Сювари Т. Ю., Устранение спада характеристики магнитного удвоителя частоты путем использования внутренней обратной связи. В кн.: Вопросы теории и расчета преобразовательных устройств, Киев, «Наукова думка», 1968 (в печати).
17. Сювари Т. Ю., Магнитный удвоитель частоты с внутренней обратной связью. Сб. Третьей Всесоюзной межвузовской конференции по теории и методам расчета нелинейных электрических цепей и систем, 3—7 окт. 1967, Ташкент (в печати).

Институт термофизики и электрофизики
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию
30/IV 1968

R. ALLIKAS

ENERGEETILISED PROTSESSID STAATILISTES FERROMAGNETILISTES
SAGEDUSE KORDISTITES

Artiklis analüüsitakse sageduse kahekordisti energeetilisi tsükleid magnetvälja tugevuse ja magnetilise induktsiooni hetkväärtuste koordinaatsüsteemis. Reaalse kahekordisti magnetilised südamikud asendatakse ühe ekvivalentse südamikuga, mille magneetimis-kõverate parv määrab energeetilise tsükli esinemise piirkonna ja võimaldab selgitada energia ülekande ning füüsikaliste protsesside iseärasusi kahekordistis. Teoreetiliste tsüklike järgi määratakse energia ülekande tingimused ja antakse selgitus mõningatele kahekordisti töö režiimidele.

R. ALLIKAS

ENERGETIC PROCESSES IN A STATIC FERROMAGNETIC FREQUENCY DOUBLER

This paper deals with the graphic design of energetic cycles of a frequency doubler. The graphic design is carried out in the coordinates of the instantaneous values of magnetic field strength and magnetic flux density.

A set of magnetization curves of the equivalent core of a frequency doubler determines the region of occurrence of the energetic cycle curve and allows to explain the character of the physical processes and of the energy exchange in the doubler.

The direction of the energetic cycle determines the direction of the energy exchange in the device, i. e. it indicates the device operating either as a frequency doubler or as a frequency divider.

By theoretical cycles, the energy exchange conditions and some optimum operating conditions of the frequency doubler will be defined.