

Р. АЛЛИКАС

О ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ РЕЖИМАХ ФЕРРОМАГНИТНОГО УЧЕТВЕРИТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

Ферромагнитные умножители частоты, в том числе учетверители, находят все большее применение для решения различных электротехнических задач. В связи с их усовершенствованием неперестают появляться новые схемы с лучшими технико-экономическими показателями [1-3]. Особенно плодотворно работают в этом направлении исследователи Горьковского политехнического института под руководством проф. А. Бамдаса. Возникает естественный вопрос: какие перспективы вообще существуют для улучшения электромагнитных режимов умножителей? Полный ответ на этот вопрос можно получить, решив три задачи: во-первых, найти подходящие методы для исследования теоретических и реальных режимов работы умножителей частоты; во-вторых, определить теоретически возможные электромагнитные режимы умножителей с предельными технико-экономическими показателями; в-третьих, определить целесообразные технические приемы для осуществления перспективных теоретических режимов.

В настоящей работе для определения предельных показателей некоторых теоретических режимов одноступенчатого учетверителя частоты, состоящего из двух удвоителей системы Жоли—Эпштейна, выходные обмотки которых соединены последовательно (рис. 1), предлагается метод энергетических циклов [4]. При этом вопросы, связанные с осуществлением найденных режимов, не рассматриваются.

Известно, что исследование процессов в учетверителях может быть сведено к исследованию процессов в одном сердечнике, так как все четыре сердечника учетверителя одинаковые и работают в одинаковых ферромагнитных режимах. Но так как принято считать, что напряжение питания удвоителя частоты не зависит от режима работы учетверителя [2], то проще будет изучить электромагнитные процессы в удвоителе, чем в одном сердечнике, поскольку в этом случае суммарный магнитный поток является синусоидальным. Для получения более общих результатов все величины удобно выразить в относительных единицах, введенных в [1]. В этой системе первичный ток $i_1 = h_1$ и первичная индукция удвоителя $b_1 = \psi_1$, где h_1 —

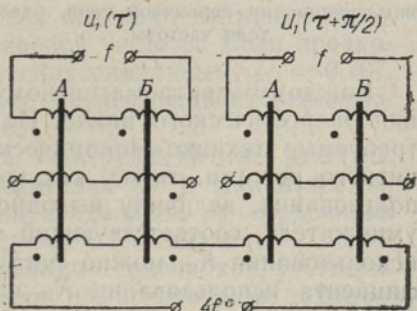


Рис. 1. Принципиальная схема учетверителя частоты:

А и Б — сердечники удвоителя.

компонент напряженности магнитного поля, соответствующий току i_1 , $\psi_1 = \int u_1 d\tau$ — потокосцепление первичной цепи удвоителя, соответствующее первичному напряжению u_1 .

Уравнение, описывающее энергетический цикл первичной цепи удвоителя, имеет в данном случае следующий вид [5]:

$$b_1(h_1, h_{\Sigma}) = \psi_1(i_1, i_{\Sigma}) = \\ = \psi_A(i_1 + i_{\Sigma}) + \psi_B(i_1 - i_{\Sigma}) = \frac{1}{2} [b_A(h_1 + h_{\Sigma}) + b_B(h_1 - h_{\Sigma})], \quad (1)$$

где $h_{\Sigma} = h_0 + h_2 + h_4$; $i_{\Sigma} = i_0 + i_2 + i_4$;

h_0, h_2, h_4 — компоненты напряженности магнитного поля удвоителя, соответствующие токам цепи подмагничивания i_0 , цепи дополнительного подмагничивания второй гармоникой тока i_2 и току выходной цепи i_4 ;

b_A и b_B — индукция в сердечниках A и B удвоителя.

Для анализа электромагнитных процессов удвоителя в различных режимах работы необходимо семейство кривых (рис. 2.) $\psi_1(i_1, i_{\Sigma})$, где i_1 является аргументом, а i_{Σ} — параметром. Это семейство эквивалентных кривых намагничивания можно вычислить по основной кривой намагничивания сердечников или определить экспериментально [5, 6].

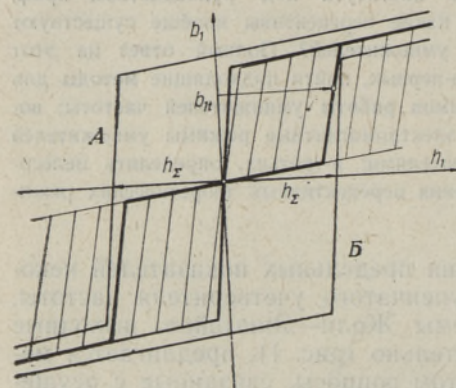


Рис. 2. Семейство эквивалентных кривых намагничивания первичной цепи удвоителя частоты.

По известным первичной индукции и токам подмагничивания и выходной цепи легко найти энергетический цикл первичной цепи удвоителя. Этот цикл может находиться только в первом и третьем квадрантах координат, точнее в области, охватываемой семейством эквивалентных кривых намагничивания первичной цепи удвоителя. При отсутствии потерь активные мощности первичной и выходной цепей равны: $P_1 = P_4$. В этом случае энергетические циклы первичной цепи удвоителя частоты полностью характеризуют электромагнитный режим учетверителя. Теоретический учет потерь в учетверителях представляет собой довольно трудную задачу.

Каждому электромагнитному режиму соответствует своя конфигурация энергетического цикла. По этой конфигурации можно определить требуемые технико-экономические коэффициенты данного электромагнитного режима, такие, как коэффициент мощности, коэффициент использования, величину выходной мощности. Электромагнитный режим умножителя, соответствующий максимальному значению коэффициента использования $K_{И}$, можно считать оптимальным [1]. Для расчета коэффициента использования $K_{И}$ применяем следующую преобразованную формулу:

$$K_{И} = \frac{\frac{\pi}{2} \int i_1 d\psi_1}{\pi U_1 \sum_h I_h} \cdot \frac{B_{1m}}{B_{mT}}, \quad (2)$$

где U_1 — эффективное значение первичного напряжения удвоителя;

I_k — эффективные значения тока K -цепи удвоителя;

B_{1m} — амплитуда первой гармоники потока в удвоителе;

B_{mT} — амплитуда магнитной индукции в обычном трансформаторе.

Оба удвоителя в составе учетверителя равны и поэтому коэффициент использования $K_{и}$ одного удвоителя равняется коэффициенту использования всего учетверителя.

Анализ одноступенчатого учетверителя частоты с подмагничиванием только постоянным током показывает, что площадь энергетического цикла удвоителя является в некоторых областях отрицательной. Это обстоятельство резко снижает передаваемую активную мощность. При прямоугольном напряжении питания в этом случае передача активной мощности вообще прекращается. Для преобразования отрицательных областей цикла в положительные сердечники надо перемагничивать, например переключением направления постоянного тока в соответствующий момент времени. Полученный таким образом переменный ток имеет частоту, вдвое большую, чем основная. Как известно [1-3], при подмагничивании второй гармоникой тока сердечников удвоителей энергетические показатели учетверителя существенно улучшаются.

Предположим, что сердечники удвоителя имеют прямоугольную форму кривой намагничивания и магнитную индукцию насыщения $B_H = B_{mT} = 1,0$. Пусть первичная индукция удвоителя пилообразная с амплитудой $\psi_{1m} = 1,0$; первичное напряжение в этом случае прямоугольное с амплитудой $U_1 = U_{1m} = 0,636$. Можно доказать, что прямоугольная форма энергетического цикла оптимальная, т. е. при данной величине активной мощности эффективное значение первичного тока является минимальным. Предполагаем, что удвоитель подмагничивается только током прямоугольной формы с амплитудой $I_{2m} = 1,0$, с частотой, в два раза большей, чем питающая. Форма кривой подмагничивания приведена на рис. 3, а. При номинальной нагрузке учетверителя первичный ток $I_1 = 1,41$, ток $I_2 = 1,0$, выходной ток $I_4 = 1,0$, активная мощность

$$P_{1a} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} i_1 d\psi_1 = 0,636 \quad \text{и амплитуда первой гармоники магнитного}$$

потока $B_{1m} = 1,27$. Коэффициент использования приведенного выше режима $K_{и}$ равняется 0,74 и коэффициент мощности $\alpha \approx 0,71$.

Величины этих коэффициентов можно считать предельными для одноступенчатого ферромагнитного учетверителя частоты. Характерным для этого режима является то, что оба удвоителя передают активную мощность нагрузке в течение всего периода основной частоты. Если предполагать, что напряжение питания является синусоидальным, $U_1 = 0,707$, и коэффициент полезного действия $\eta = 0,75$, то коэффициент использования $K_{и}$ будет приблизительно равен 0,44.

На рисунке 3, б показаны упрощенные электромагнитные режимы, осуществленные в одноступенчатых учетверителях [1-3]. Как известно, напряжение питания удвоителя в них синусоидальное и сердечники должны иметь непрямоугольную форму кривой намагничивания. Необходимый ток дополнительного подмагничивания сердечников учетверителя в случае непрямоугольной формы кривой намагничивания технически легко получить, нагружая цепь дополнительного подмагничивания на конденсатор [7]. Несмотря на то, что удвоители передают активную мощность нагрузке не в течение всего периода напряжения питания, этот электромагнитный режим все же имеет большое техническое значение. Коэффициент использования теоретического режима (рис. 3, б) $K_{и} \approx 0,63$ и коэффициент мощности $\alpha \approx 0,39$. Большое значение коэффициента $K_{и}$ в данном случае получается за счет отношения $B_{1m}/B_{mT} = 1,41$. При

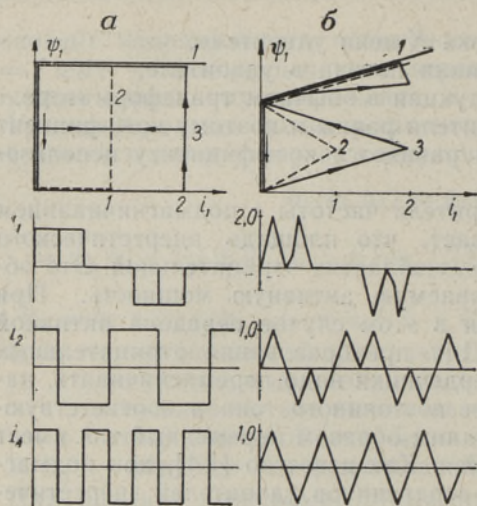


Рис. 3. Теоретические электромагнитные режимы удвоителя частоты:

a — при прямоугольном напряжении питания; *б* — при синусоидальном напряжении питания. 1 — основная кривая намагничивания сердечников; 2 — электромагнитный режим удвоителя частоты при холостом ходе; 3 — то же при номинальной нагрузке.

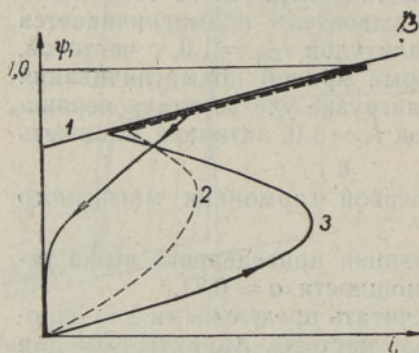


Рис. 4. Энергетический цикл при подмагничивании сердечников удвоителя третьей гармоникой тока $i_3 = -\sin 3t$: Напряжение питания синусоидальное и выходной ток учетверителя $i_4 = \sin 4t$. Условные обозначения см. на рис. 3.

можно считать перспективным питание удвоителей, работающих в составе учетверителя, несинусоидальным напряжением и увеличение третьей гармоникой первичного тока с учетом его начальной фазы. В заключение можно сказать, что изучение электромагнитных процессов учетверителя по энергетическим циклам удвоителя удобно и наглядно как теоретически, так и экспериментально. Этот метод анализа дает возможность исследовать теоретические электромагнитные режимы и на основе этого определить предельные характеристики учетверителя данного типа, а также легко оценить реальные энергетические циклы, полученные на экране осциллографа.

этом подмагничивания постоянным током принципиально не требуется, но оно создает более благоприятные технические условия для получения тока с промежуточной частотой необходимой формы.

В приведенных примерах мы не ограничивали форму выходного тока i_4 . Его ограничение синусоидальной формой поведет за собой уменьшение коэффициента использования.

Интересно, что подмагничивание третьей гармоникой тока тоже влияет положительно [8], но обмотки подмагничивания в этом случае надо включить так же, как и первичные обмотки удвоителя. При этом токи третьей гармоники должны совпадать по фазе с первичными напряжениями. Графически легко найти энергетический цикл электромагнитного режима удвоителя, при котором токи дополнительного подмагничивания и выходной цепи являются синусоидальными. Такой энергетический цикл приведен на рис. 4. Коэффициент использования указанного электромагнитного режима $K_{\Pi} \approx 0,51$ и коэффициент мощности $\alpha = 0,25$.

Из анализа энергетических циклов следует, что для данной конфигурации схемы учетверителя частоты не существует электромагнитного режима, коэффициент использования которого существенно отличался бы от уже известных схем ($K_{\Pi} \approx 0,4$), учитывая потери в учетверителе [1]. Для дальнейшего исследования

ЛИТЕРАТУРА

1. Бамдас А. М., Блинов И. В., Захаров Н. В., Шапиро С. В., Ферромагнитные умножители частоты, Трансформаторы, вып. 18, М., 1968.
2. Захаров Н. В., Тр. Горьк. политехн. ин-та им. А. А. Жданова, 20, вып. 6, 12 (1965).
3. Евстигнеева Т. А., Тр. Горьк. политехн. ин-та им. А. А. Жданова, 23, вып. 2, 44 (1967).
4. Рахимов Г. Р., Энергетические циклы автопараметрических колебаний нелинейных электрических цепей. Тр. Ташк. политехн. ин-та, Новая серия, вып. 18 (1961).
5. Алликас Р., Изв. АН ЭССР, Физ. Матем., 17, 419 (1968).
6. Лехтман И. Я., Автоматика и телемеханика, 16, 130 (1955).
7. Захаров Н. В., Бамдас А. М., Шапиро С. В., Авт. свид. СССР № 161400, 1962; Бюлл. изобр., № 7 (1964).
8. Алликас Р., Изв. АН ЭССР, Физ. Матем., 18, 321 (1969).

*Институт термofизики и электрофизики
Академии наук Эстонской ССР*

Поступила в редакцию
3/XII 1968

R. ALLIKAS

**FERROMAGNETILISE SAGEDUSE NELJAKORDISTI TEOREETILISTEST
REŽIIMIDEST**

Üheastmeline ferromagnetiline sageduse neljakordisti koosneb kahest ühesugusest Joly-Epsteini süsteemi kahekordistist. Neljakordisti töörežiimide uurimiseks kasutatakse kahekordisti sisendahela voolu ja aheldusvoo koordinaatasapinnal asuvaid energieetilisi tsükleid. Nende tsüklite põhjal määrati neljakordisti parim energieetiline töörežiim juhul, kui südamikke magneeditakse vooluga, mille sagedus on kaks korda suurem toitepinge sagedusest. Südamike magneetimine kolmanda harmoonilise vooluga suurendab samuti neljakordisti väljundahela aktiivvõimsust, võrreldes neljakordistiga, mille südamikke magneeditakse ainult alalisvooluga.

R. ALLIKAS

**THEORETICAL ELECTROMAGNETIC MODES OF OPERATION OF FERRO-
MAGNETIC FREQUENCY QUADRUPLER**

A single-stage ferromagnetic frequency quadrupler consists of two similar Joly-Epstein type frequency doublers. The study of modes of operation of the quadrupler is carried out by means of energetic cycles in the coordinates of primary current and magnetic flux linkage. On the basis of these cycles, the most suitable mode of operation of the quadrupler in the case of double frequency current magnetization has been determined. In the case of missing losses in the quadrupler, the rating factor of this mode of operation is equal to 0.74 and the power factor — to 0.71.

The third harmonic current magnetization of the core in the input circuit increases the active power of the quadrupler and the rating factor of the device, in comparison with a d—c controlled quadrupler.