

О.И. ПОДГАЙКО, И.В. САЛАЙ, В.А. ТОВСТЫЙ,
П.И. ЧЕРЕДНИКОВ, канд. техн. наук

НАГРУЗОЧНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ТРАНСФОРМАТОРА В КВАЗИЛИНЕЙНОМ РЕЖИМЕ

При проектировании, расчете и использовании параметрических трансформаторов [1] и параметронов [2] возникают сложности с определением параметров системы, поскольку на ее работу влияет множество факторов. Один из них — нагрузочная характеристика. Для параметрического трансформатора и параметрона нагрузка обуславливает его выходные параметры (силу тока и напряжение) и эффективность системы в целом. Рассмотрим характер влияния нагрузки на параметрическую систему и процессы, происходящие в ней.

Достоинство параметрического трансформатора состоит в том, что использование параметрического эффекта, основанного на изменении индуктивности при намагничивании сердечника, исключает из ряда паразитных нелинейные процессы в сердечнике, приводящие к потере энергии при трансформации.

Для параметрических трансформаторов и параметронов важное значение имеет сопротивление нагрузки, так как выходная цепь параметрического трансформатора представляет собой колебательный контур. Рассмотрим схему параметрона, представленную на рис. 1.

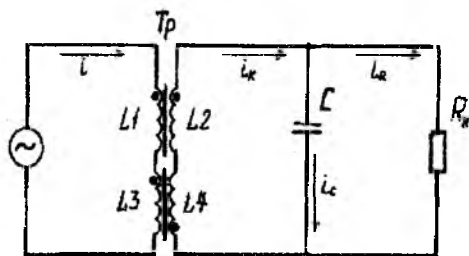


Рис. 1

Данная система носит резонансный характер, поскольку выходной контур состоит из катушек индуктивности $L2, L4$ и конденсатора C . При отсутствии возбуждения в первичном контуре $L1L3$ вторичный контур $L2L4C$ настроен на частоту f . Для эффективной трансформации электрической энергии нельзя варьировать сопротивление

нагрузки в широких пределах ввиду того, что ее значение определяет добротность всей системы. Добротность системы оказывает влияние на характер колебательного процесса в ней, а следовательно, на мощность, выделяемую на нагрузке, и амплитуду колебаний в выходной цепи.

Сила тока выходного контура i_k разделяется на силу тока через конденсатор C и силу тока нагрузки R_H :

$$i_k = i_c + i_R . \quad (1)$$

При условии возбуждения параметрона генератором синусоидального напряжения u имеет место зависимость

$$u = U_{01} \sin \omega t . \quad (2)$$

Здесь U_{01} — амплитудное напряжение; ω — круговая частота возбуждающих колебаний.

Модуляция параметра L (индуктивности), обусловленная силой тока первичной цепи

$$i = I_{01} \sin \omega t , \quad (3)$$

где I_{01} — амплитудная сила тока, приводит к возбуждению параметрических колебаний во вторичном резонансном контуре $L2L4C$. Во вторичном контуре циркулирует реактивная мощность P , активная составляющая которой определяется из соотношения

$$P = U_2 I_2 \cos \psi . \quad (4)$$

Здесь U_2 — действующее значение напряжения вторичного контура; I_2 — действующее значение силы тока во вторичном контуре; ψ — угол сдвига фаз между силой тока и напряжением.

Нагрузка R_H шунтирует конденсатор C . При малом значении сопротивления R_H ток контура i_k течет через нагрузку ($i_R \gg i_c$), при большом значении R_H (сопротивление нагрузки больше сопротивления конденсатора переменному току на данной частоте) i_k течет через конденсатор ($i_c \gg i_R$). При соотношении между сопротивлением нагрузки и критическим сопротивлением параметрической системы

$$R_H < R_{кр} \quad (5)$$

колебательные процессы в параметрическом контуре затухают. Данное условие определяет нижнюю границу сопротивления нагрузки.

Первичная цепь параметрического трансформатора и параметрона чувствительна к изменению сопротивления нагрузки R_H . В случае

возбуждения системы синусоидальным напряжением при условии, что энергия колебательной системы равна нулю ($R_H = 0$), в согласии с законом сохранения энергии и при малых потерях в трансформаторе (квазилинейный режим) первичная цепь носит реактивный характер (рис. 2, а). Угол сдвига фаз между напряжением и током примерно равен $\pi/2$. При бесконечно большом сопротивлении нагрузки ($R_H \rightarrow \infty$) амплитуда параметрических колебаний во вторичном контуре экспоненциально возрастает и ее значение ограничивается нелинейностью сердечника. Вследствие нелинейности в сердечнике и неидентичности обмоток катушек индуктивности возрастают потери. Таким образом, увеличивается вещественная часть входного сопротивления параметрического трансформатора, что приводит к уменьшению угла сдвига фаз между потребляемым током и напряжением. В результате потребляемая мощность возрастает (рис. 2, б).

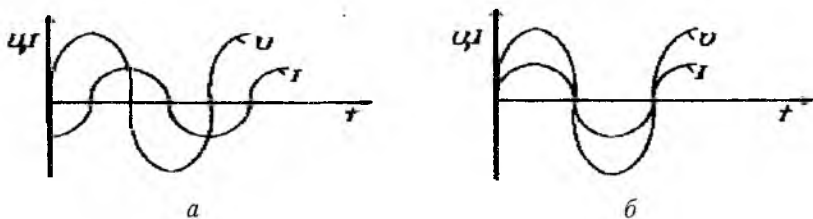


Рис. 2

Во вторичном контуре при уменьшении сопротивления нагрузки ($R_H \rightarrow 0$) угол сдвига фаз $\psi \rightarrow 0$ (рис. 3, а). При бесконечно большом сопротивлении нагрузки ($R_H \rightarrow \infty$) угол сдвига фаз между током во вторичном контуре и напряжением равен $\pi/2$ (рис. 3, б).

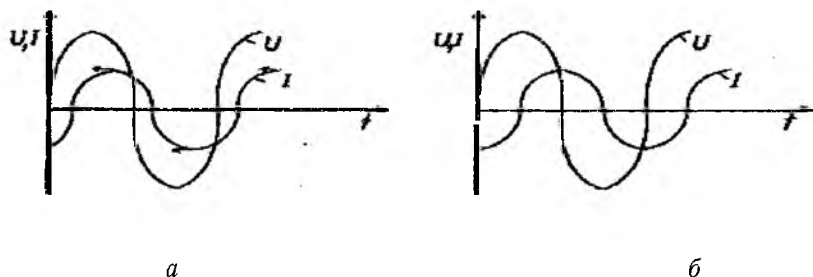


Рис. 3

В связи с изложенным необходимо заметить, что параметры первичной цепи (напряжение и сила тока) по амплитуде практически не изменяются с изменением R_H , так как $U = \text{const}$. Незначительное увеличение силы тока первичной цепи с ростом R_H обусловлено уменьшением индуктивности за счет обратного параметрического эффекта. Значение сопротивления нагрузки существенно влияет на выходные силу тока (рис. 4, а) и напряжение (рис. 4, б) системы. Амплитудные силы токов и напряжения (I_{max} и U_{max}) определяются

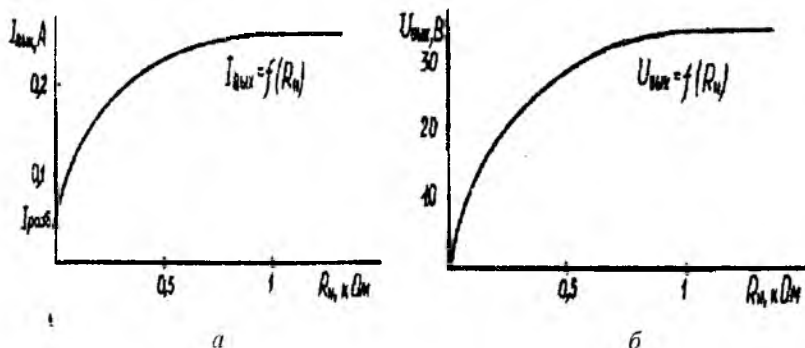


Рис. 4

нелинейностью системы. Следует учитывать также $I_{\text{разб}}$ — силу тока разбаланса, имеющего место из-за неидентичности катушек индуктивности параметрического трансформатора.

Оптимальное сопротивление нагрузки $R_{H,\text{опт}}$ должно выбирать-

ся с учетом режима работы, частоты, амплитуды возбуждающих колебаний, типа сердечника и конструкции нелинейно-параметрического трансформатора. Общий вид зависимости активной мощности P , выделяемой на нагрузке при параллельном включении, от сопротивления R_H представлен на рис. 5.

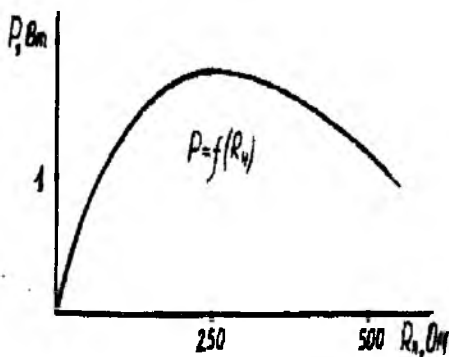


Рис. 5

Эффективность таких систем тесно связана с оптимальным сопротивлением нагрузки $R_{н.опт}$. Под оптимальным подразумевается такое сопротивление, при котором электрическая энергия из первичной цепи трансформируется во вторичную с максимальной эффективностью (высоким КПД). Причем, ввиду резонансного характера системы, значение $R_{н.опт}$ не совпадает со значением сопротивления, при

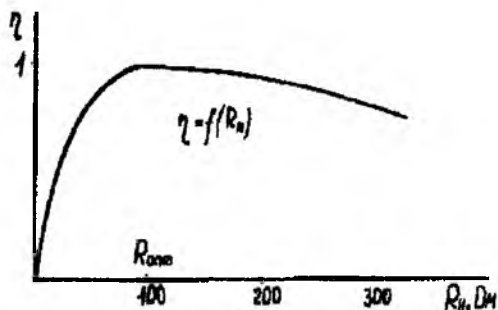


Рис. 6

котором мощность на нагрузке максимальна. Показательной является нагрузочная характеристика по КПД η (рис. 6).

Так, для конструкции параметрона, представленного на рис. 1, на частоте $f = 2,175$ кГц с трансформатором на сердечнике Б48 2000 НМ1 получено значение КПД преобразования энергии

$\eta = 0,98$ при параллельном включении нагрузки 150 Ом. Некоторые численные значения параметров системы отмечены на рис. 4 — 6.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы при выборе, расчете и проектировании параметрических систем [3]. Как вытекает из изложенного, для параметрических систем значение нагрузки определяет их выходные параметры, процессы в системе, обусловленные степенью насыщенности сердечника, и эффективность трансформации электрической энергии.

Сопротивление нагрузки влияет на реактивный характер системы. С ростом сопротивления нагрузки увеличивается вещественная часть входного сопротивления параметрического трансформатора, но вторичная цепь приобретает реактивный характер и угол сдвига фаз между током и напряжением достигает $\pi/2$.

Оптимальное значение сопротивления нагрузки, с одной стороны, ограничивается добротностью системы, а с другой — максимумом активной мощности. Экспериментально установлено, что для параметронов оптимальное значение сопротивления параллельно включенной нагрузки лежит в пределах 20...2000 Ом, причем на это значение существенно влияют конструкция параметрического трансформатора и рабочая частота. Конструкция параметрического трансформатора, режим работы, тип сердечника, намоточные данные катушек,

амплитуда возбуждающих колебаний и уровень емкости во вторичной цепи определяют нагрузочную характеристику параметрона.

Целесообразно использовать параметрический трансформатор в качестве питающего элемента, сопротивление нагрузки которого практически не изменяется. На основе параметрического трансформатора, работающего в квазилинейном режиме, возможно получение высокоэффективных преобразователей электрической энергии с КПД $\eta \approx 98\%$.

Список литературы: 1. *Задерей Г.П.* Многофункциональные магнитные радиокомпоненты: Многофункциональные электронно-магнитные трансформаторы. М.: Сов. радио, 1980. 137 с. 2. *Параметроны*: Сб. ст.: Пер. с яп. и англ. / Под ред. Т. Такэси. М.: Изд-во иностр. лит., 1962. 332 с. 3. *Чередников П.И.* Расчет и проектирование параметрических систем на высших гармониках: Учеб. пособие. Х.: Харьк. политехн. ин-т, 1980. 98 с.

Харьковский государственный технический университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 22.04.97