

ПРИМЕНЕНИЕ АВТОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ТИРИСТОРНЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ

Аннотация: В данной статье рассматриваются вопросы возбуждения субгармонических колебаний второго порядка, в цепях представляющие собой двухсердечниковую электроферромагнитную цепь с ёмкостной нагрузкой, с целью применения её для управления состояниями тиристорных преобразовательных устройств частоты. Исследуются устойчивость решений уравнений двухсердечниковой цепи. Даются рекомендации по получению устойчивых субгармонических колебаний порядка $\frac{1}{2}f$ при использовании этих цепей в качестве управляющего элемента тиристорных делителей частоты на два.

Ключевые слова: тиристорные преобразователи, гармоника, ёмкость, колебания.

Развитие полупроводниковой техники привело к различным разработкам тиристорных устройств: стабилизаторов напряжения, тока, инверторов и преобразователей частоты. Интерес к автопараметрическим цепям, как к цепям управления состояниями тиристорных устройств, возрос в связи с тем, что последние в схемных сочетаниях с тиристорами дают широкие возможности для решения многих технических задач.

В электроферромагнитном колебательном контуре при определённых соотношениях параметров и напряжения источника питания могут возбуждаться периодические субгармонические колебания второго порядка.

Эта особенность двухсердечникового автопараметрического контура, можно использовать для решения вопроса создания надёжного тиристорного делителя частоты на два.



Рассматриваемая цепь состоит из двух идентичных ферромагнитных элементов, первичные обмотки которых соединены последовательно - согласно и подключены к источнику синусоидального напряжения, вторичные обмотки соединены последовательно - встречно и вместе с присоединённой к ним конденсатором C образуют замкнутый колебательный контур, а так же имеется третья обмотка включённая последовательно - согласно и подключённая к источнику постоянного тока, служащая для создания постоянного подмагничивающего потока (рис. 1). Изучим вопросы возбуждения субгармонических колебаний второго порядка в двухсердечниковой ферромагнитной цепи с целью применения её для управления состояниями тиристоров.

Для анализа процессов, протекающих в цепи, принимаем следующие допущения:

1. Активное сопротивление вторичных обмоток и потери в $\Phi Э$ учитываются постоянным сопротивлением R , включённым параллельно ёмкости C ,
2. Потери в ёмкости C не учитываются.
3. Индуктивностью рассеяния обмоток $\Phi Э$ пренебрегаем в виду их малости.
4. Кривая намагничивания ферромагнитных элементов аппроксимируется степенной функцией третьего порядка.

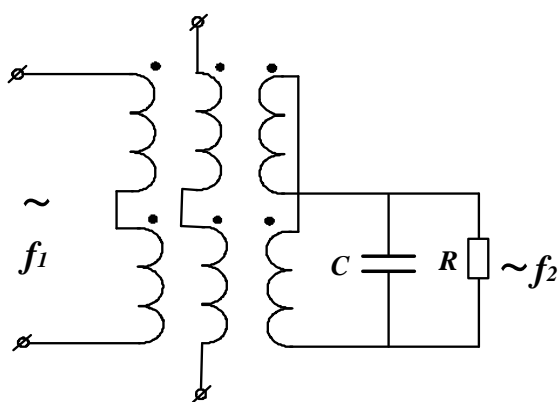


Рис. 1. Схема замещения двухсердечникового автопараметрического контура.

Примем:



ϕ_A и ϕ_B - мгновенные значения потоков в сердечниках первого и второго ФЭ;

i_1 - ток, в первичной цепи;

i_2 - ток, во вторичном контуре;

i_c - ток, протекающий по емкости С ;

i_R - ток, протекающий по сопротивлению R;

i_g - ток постоянного подмагничивания.

На основании закона полного тока для первого и второго ФЭ имеем систему уравнений:

$$\begin{aligned}i_1 w + i_0 w + i_2 w &= K \phi_A^3 \\i_1 w + i_0 w - i_2 w &= K \phi_B^3\end{aligned}\tag{1}$$

Решая совместно систему уравнений (1) получим:

$$i_2 = \frac{K}{2w} (\phi_A^3 - \phi_B^3)\tag{2}$$

составим уравнение для вторичной цепи:

$$w \frac{d\phi_A}{dt} - w \frac{d\phi_B}{dt} + \frac{1}{C} \int i_c dt = 0$$

продифференцируем данное уравнение

$$w \frac{d^2 \phi_A}{dt^2} - w \frac{d^2 \phi_B}{dt^2} + \frac{1}{C} = 0$$

Или

$$w \frac{d^2}{dt^2} (\phi_A - \phi_B) + \frac{1}{C} = 0\tag{3}$$

Ток во вторичной обмотке равен:

$$i_2 = i_c + i_R \text{ откуда } i_c = i_2 - i_R$$

где

$$i_R R + U_C = 0$$



$$i_R = \frac{U_C}{R} = -\frac{w}{RC} \frac{d}{dt} (\phi_A - \phi_B) \quad (4)$$

подставив (2) и (4) в (3) получим:

$$w \frac{d^2}{dt^2} (\phi_A - \phi_B) + \frac{w}{RC} \frac{d}{dt} (\phi_A - \phi_B) + \frac{K}{2wC} (\phi_A^3 - \phi_B^3) = 0 \quad (5)$$

Предполагая, что

$$\phi_A = \Phi_0 + \phi_1 + \phi_2 \quad \text{и} \quad \phi_B = \Phi_0 + \phi_1 - \phi_2, \quad (6)$$

где

Φ_0 - поток постоянного подмагничивания;

ϕ_1 - мгновенное значение потока, обусловленное напряжением первичной цепи;

ϕ_2 - мгновенное значение потока, обусловленное возбуждением автопараметрических колебаний.

Подставим (6) в (5)

$$w \frac{d^2}{dt^2} (\Phi_0 + \phi_1 + \phi_2) - w \frac{d^2}{dt^2} (\Phi_0 + \phi_1 - \phi_2) + \frac{w}{RC} \frac{d}{dt} (\Phi_0 + \phi_1 + \phi_2) - \\ - \frac{w}{RC} \frac{d}{dt} (\Phi_0 + \phi_1 - \phi_2) + \frac{K}{2wC} (\Phi_0 + \phi_1 + \phi_2)^3 - \frac{w}{RC} \frac{d}{dt} (\Phi_0 + \phi_1 - \phi_2)^3 = 0$$

После ряда преобразований это уравнение примет вид:

$$w \frac{d^2 \phi_2}{dt^2} + \frac{w}{RC} \frac{d\phi_2}{dt} + \frac{K}{2wC} [3(\Phi_0 - \phi_1)^2 \phi_2 + \phi_2^3] = 0 \quad (7)$$

Введем безразмерные величины:

$$x = \frac{\phi_2}{\Phi_0}; \quad y = \frac{\phi_1}{\Phi_0}; \quad \Phi_0 = \sqrt{\frac{2\omega^2 w^2 C}{K}}; \quad \delta = \frac{1}{\omega CR}; \quad \tau = \omega t; \quad Z = \frac{\Phi_0}{\Phi_0}.$$

получим

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \delta \frac{dx}{dt} + 3(Z + y)^2 x + x^3 = 0 \quad (8)$$

Предположим, что



$$x = X_m \sin(\tau + \varphi), \quad (9)$$

$$y = Y_m \sin 2\tau \quad (10)$$

В дальнейшем задача решается методом медленно меняющихся амплитуд. Согласно методике, решение ищем в виде:

$$\frac{dx}{dt} = X_m \cos(\tau + \varphi) \quad (11)$$

Вторая производная искомой величины определяется, как

$$\begin{aligned} \frac{d^2 x}{dt^2} = & -X_m \sin(\tau + \varphi) + 2 \frac{dx}{dt} \cos(\tau + \varphi) - 2 X_m \frac{d\varphi}{d\tau} \sin(\tau + \varphi) + \\ & + \delta X_m \cos(\tau + \varphi) + \left[3(Z + Y_m \sin 2\tau)^2 X_m \sin(\tau + \varphi) + X_m^3 \sin(\tau + \varphi) \right] = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

после ряда преобразований имеем:

$$\begin{aligned} -X_m \sin(\tau + \varphi) + 2 \frac{dx}{dt} \cos(\tau + \varphi) - 2 X_m \frac{d\varphi}{d\tau} \sin(\tau + \varphi) + \delta X_m \cos(\tau + \varphi) + \\ + 3Z^3 X_m \sin(\tau + \varphi) + \frac{3}{2} Y_m^2 \sin(\tau + \varphi) + \frac{3}{4} X_m^3 \sin(\tau + \varphi) = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

Группируя синусные и косинусные составляющие, получим для стационарного режима следующую систему алгебраических уравнений:

$$-1 + 3Z^2 + 3ZY_m \sin 2\varphi + \frac{3}{2} Y_m^2 + \frac{3}{4} X_m^2 = 0, \quad (14)$$

$$\delta + 3ZY_m \cos 2\varphi = 0 \quad (15)$$

Из (15) имеем

$$\cos 2\varphi = -\frac{\delta}{3ZY_m} \quad (16)$$

Так как

$$\sin 2\varphi = \sqrt{1 - \cos^2 2\varphi}$$

учитывая (16) данное равенство примет вид:



$$\sin 2\varphi = \sqrt{1 - \frac{\delta^2}{9Z^2 Y_m^2}} = \pm 3ZY_m \sqrt{9Z^2 Y_m^2 - \delta^2} \quad (17)$$

Подставив значение $\sin 2\varphi$ в уравнение (14) имеем

$$X_m^2 = \frac{4}{3} \left(1 - 3Z^2 - \frac{3}{2} Y_m^2 \pm \sqrt{9Z^2 Y_m^2 - \delta^2} \right) \quad (18)$$

На основе полученного выражения построены амплитудные характеристики рис. 2 и рис. 3. Ширину зоны возбуждения субгармонических колебаний можно регулировать, изменяя величину тока подмагничивания, емкости и потерь в контуре. На рис. 2 показаны амплитудные характеристики при различных значениях Z , кривая 1 при $Z = 0,4$; кривая 2 при $Z = 0,5$; кривая 3 при $Z = 0,6$. На рис. 3 представлены, серия амплитудных характеристик при изменении безразмерного коэффициента δ , кривая 1 при $\delta = 0,4$; 2 при $\delta = 0,5$; 3 при $\delta = 0,6$.

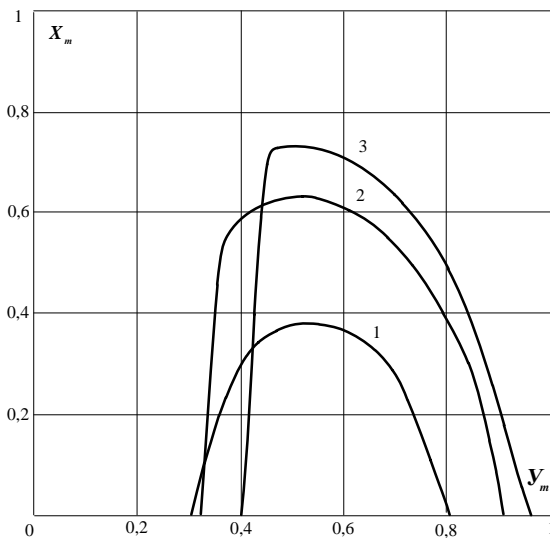


Рис. 2 Амплитудные характеристики двухсердечниковой цепи при изменении Z , кривая 1 при $Z = 0,4$; 2 - 0,5; 3 - 0,6

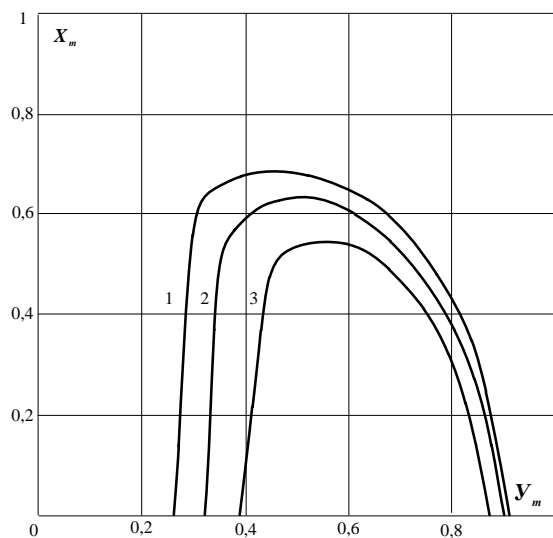


Рис. 3 Амплитудные характеристики двухсердечниковой цепи при изменении β , кривая 1 при $\beta = 0,4$; 2 - 0,5; 3 - 0,6

Рассмотрим вопрос об устойчивости решения (18) на основе теории Ляпунова. Характеристическое уравнение системы имеет следующий вид: $a^2 + pa + q = 0..$

Принимаем обозначения



$$\frac{dx}{d\tau} = A(X_m; \varphi); \quad \frac{d\varphi}{d\tau} = B(X_m; \varphi),$$

здесь

$$A(X_m; \varphi) = -\frac{3}{2}ZY_m X_m \cos 2\varphi - \frac{\delta}{2} X_m;$$

$$B(X_m; \varphi) = -\frac{1}{2} + \frac{3}{2}Z^2 + \frac{3}{2}ZY_m \sin 2\varphi + \frac{3}{4}Y_m^2 + \frac{3}{4}X_m^2$$

Далее получим систему уравнений

$$\begin{aligned} \frac{dA}{dx} &= \frac{3}{2}ZY_m \cos 2\varphi \frac{\delta}{2} & \frac{dA}{d\varphi} &= 3ZY_m X_m \sin 2\varphi \\ \frac{dB}{dx} &= \frac{3}{2}X_m & \frac{dB}{d\varphi} &= 3ZY_m \cos 2\varphi \end{aligned} \quad (19)$$

Коэффициенты характеристического уравнения системы первого порядка приближения получаются в виде:

$$p = -\left[\frac{dA}{dx} + \frac{dB}{d\varphi} \right] \quad (20)$$

$$q = \left[\frac{dA}{dx} \cdot \frac{dB}{d\varphi} - \frac{dB}{dx} \cdot \frac{dA}{d\varphi} \right] \quad (21)$$

Подставив из (16) и (17) значения $\cos \varphi$ и $\sin \varphi$ в (19), решая уравнения (20) и (21) получим:

$$p = \delta \quad q = \frac{3}{4}X_m^2 \sqrt{9Y_m^2 Z^2 - \delta^2} \quad (22)$$

По критерию Гурвица система устойчива, когда $p > 0$ и $q > 0$. Первое условие $p > 0$ не ограничивает устойчивости решения, поскольку δ всегда больше нуля. Учитывая второе условие, определяем решение, отвечающее устойчивому режиму:

$$X_m^2 = \frac{3}{4} \left(1 - 3Z - \frac{3}{2}Y_m^2 + \sqrt{9Y_m^2 Z^2 - \delta^2} \right)$$

Таким образом, субгармонические колебания второго порядка возбуждаются, когда



$$y_m^2 > \frac{\delta^2}{9Z^2} \quad (23)$$

На рис. 4 показана зона (участок АВ) устойчивых колебаний в двухсердечниковой цепи.

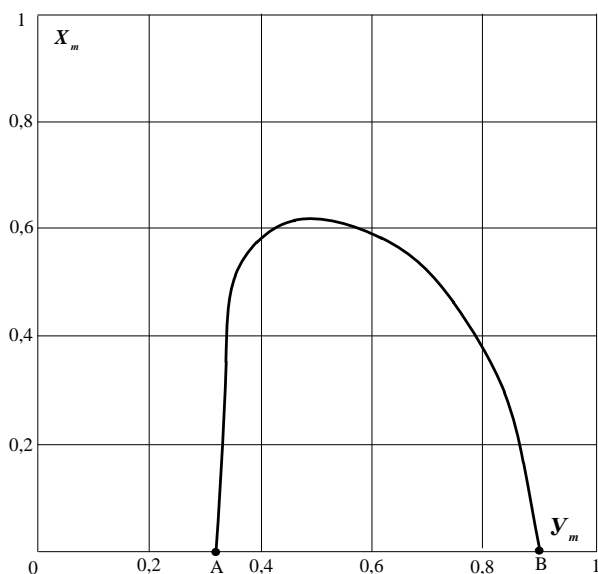


Рис. 4. Устойчивая часть амплитудной характеристики двухсердечниковой цепи.

Отсюда можно заключить, что решения, отвечающее устойчивому состоянию, существенно зависит от

величины параметров C и R .

В исследуемой симметричной двухсердечниковой схеме, в момент подачи толчком питающего напряжения с равной силой возникают колебания двух видов сдвинутых относительно друг друга на 180° .

В литературе подробно рассматриваются вопросы получения фиксированных колебаний одного или другого вида в двухсердечниковых автопараметрических контурах, вводом не симметричности в обмотки $\Phi Э$,

Эксперименты показали, что увеличение количества витков в первичной обмотке одного из трансформаторов в 1,6 раз по сравнению с количеством витков второго трансформатора приводит к возбуждению в автопараметрическом колебательном контуре, субгармонических колебаний

порядка $\frac{1}{2}f$, начальная фаза которого совпадает с начальной фазой питающей сети

Проведённый анализ показал, что при создании тиристорного делителя частоты в два раза эффективно использовать в качестве системы управления состояниями тиристоров схему двухсердечникового колебательного контура с



не симметрией в первичных обмотках, при чем мощность рассмотренной цепи не превышает 10 Ватт, в независимости от мощности силовых тиристоров.

Литература:

1. Бессонов Л.А Теоретические основы электротехники, М.: Гардарики, 2002. – 638 с.
2. Попов В.С. Теоретическая электротехника, М., Энергоатомиздат, 2011.- 544 с
3. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей, М.: Энергоатомиздат, 1989. — 530 с.
4. Usmanov, E.G. E3S Web of Conferences, 384, 01034, (2023), <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338401034>
5. Usmanov, E. AIP Conference Proceedings, 2552, 050020, (2022), <https://doi.org/10.1063/5.0111537>
6. Usmanov, E.G., Khusanov, B.M. E3S Web of Conferences, 216, 01161, (2020), <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601161>

