

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ИНДУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОНОВ В РЕЖИМЕ ПОВТОРЕНИЯ ЧАСТОТЫ

Е. И. ГОЛЬДШТЕЙН, В. Н. СТАНЕВКО

(Представлена семинаром кафедры приборов и устройств систем автоматики)

Несмотря на большой интерес инженеров и физиков к вопросам исследования индуктивных параметрических систем [1, 2], низкочастотные индуктивные параметроны (И.П.) в режиме повторения частоты исследованы еще недостаточно. Так, в [3], а также в [4, 5] проведен анализ ИП без учета высших гармоник. В [6] указывается на наличие сдвига фаз между первыми гармониками магнитных индукций магнитопроводов (рис. 1), в [7] утверждается, что величина этого угла сдвига фаз в точке возбуждения равна 90° . Однако и в [6], и в [7] не выявлены вариации величины угла при изменении входного напряжения и не указаны возможности использования этого интересного свойства.

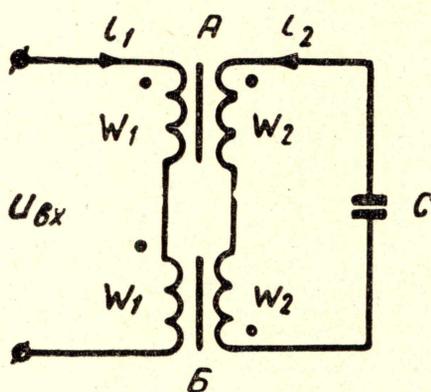


Рис. 1.

Нельзя считать отработанной и методику инженерного расчета ИП в точке возбуждения.

В свете вышесказанного в работе приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований ИП, в известной мере восполняющие указанные недостатки.

1. Исследование фазовых соотношений

Рассматриваемая схема индуктивного параметрона приведена на рис. 1. Как следует из схемы, при анализе не учитывались активные потери и поток рассеивания.

На ряде макетов были проведены экспериментальные исследования фазовых соотношений между первыми гармониками напряжений на обмотках W_1 , при этом использовались специально разработанные амплитудно-фазовые анализаторы гармоник. В результате установлена зависимость фазы между первыми гармониками напряжений для обмоток W_1 дросселей А и Б, представленная кривой 1 (рис. 2), и та же зависимость для напряжений на обмотках W_2 (кривая 2, рис. 2) от величины входного напряжения.

Результаты исследования фазовых соотношений были использованы для разработки ряда устройств. Так, например, получены фазовращатель непрерывного действия, фазовращатель дискретного действия для амплитудно-фазовых анализаторов гармоник, преобразователь однофазной системы в двухфазную, однофазно-двухфазный выпрямитель и т. д.

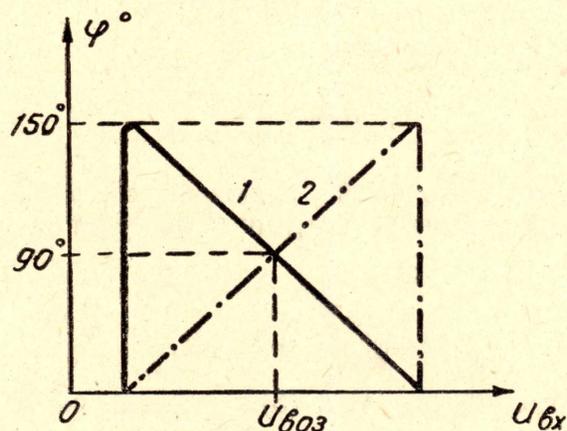


Рис. 2

Анализ известных свойств И. П., как, например, свойства генерировать колебания при условии, что энергия потерь в параметрическом контуре меньше энергии, вносимой в контур, позволил разработать такие устройства, как фотоэлектрические и теплоэлектрические реле прямого и обратного действия.

Необходимость разработки инженерной методики расчета для проектирования вышеназванных устройств потребовала некоторых теоретических поисков.

В установившемся процессе для И. П. справедливы следующие соотношения:

$$\begin{cases} U_{вх}(t) = U_A(t) + U_B(t), \\ U_c(t) = U'_A(t) + U'_B(t), \end{cases} \quad (1)$$

$U_{вх}(t)$, $U_A(t)$, $U_B(t)$ — мгновенные значения входного напряжения и напряжений на обмотках W_1 дросселей А и Б.

$U'_A(t)$, $U'_B(t)$ — соответствующие напряжения на обмотках W_2 ,

$U_c(t)$ — мгновенное значение напряжения на конденсаторе.

Используя метод гармонического баланса, первое уравнение системы (1) для третьих гармоник примет вид:

$$0 = U_{A3m} \sin(3\omega t + \varphi_{A3}) + U_{B3m} \sin(3\omega t + \varphi_{B3}),$$

откуда следует:

$$\begin{cases} U_{A3m} = U_{B3m} \\ \varphi_{A3} = \varphi_{B3} + 180^\circ. \end{cases} \quad (2)$$

Аналогично из второго уравнения системы (1) получим:

$$U_{c3m} \sin(3\omega t + \varphi_{c3}) = U'_{A3m} \sin(3\omega t + \varphi'_{A3}) + U'_{B3m} \sin(3\omega t + \varphi'_{B3}), \quad (3)$$

где

U_{c3m} , U'_{A3m} , U'_{B3m} — значения амплитуд третьих гармоник напряжений на конденсаторе и обмотках W_2 ,

$\varphi_{сз}, \varphi'_{Аз}, \varphi'_{Бз}$ — фазы третьих гармоник напряжений соответственно.

Для ИП в режиме повторения частоты очевидны следующие соотношения:

$$\begin{cases} U'_{Аз} = K_{ТР} U_{Аз}, \\ U'_{Бз} = K_{ТР} U_{Бз}, \end{cases} \quad (4)$$

где коэффициент трансформации

$$K_{ТР} = \frac{W_2}{W_1}.$$

Если учесть, что обмотки W_1 включены последовательно и соглас-но, а W_2 — последовательно и встречно, то будут очевидными следующие соотношения:

$$\begin{cases} \varphi'_{Аз} = \varphi_{Аз} \\ \varphi'_{Бз} = \varphi_{Бз} + 180^\circ. \end{cases} \quad (5)$$

Исходя из (3), с учетом (4) и (5) можно записать:

$$\begin{aligned} U_{сзm} &= 2K_{ТР} U_{Азm} = 2K_{ТР} U_{Бзm} \\ \varphi_{сз} &= 2\varphi_{Аз} \end{aligned} \quad (6)$$

Полученные соотношения (2) и (6) оказываются полезными при расчете ИП с учетом высших (третьих) гармоник.

Анализ энергетических соотношений

В соответствии с положениями, выдвинутыми в [8], были исследованы соотношения между мгновенными мощностями в ИП. Результаты исследования позволили получить ряд соотношений, в частности:

$$\begin{aligned} I_{11m} &= K_{ТР} I_{21m}, \\ B_{А1m} &= B_{Б1m}, \\ \varphi_{с1} &= 90^\circ, \\ \varphi_{А1} &= \varphi_{Б1} = 45^\circ, \end{aligned} \quad (7)$$

где

I_{11m} и I_{21m} — амплитуды первичных гармоник токов соответственно $i_1(t)$ и $i_2(t)$,

$B_{А1m}$ и $B_{Б1m}$ — амплитуды первичных гармоник индукций, соответственно в дросселях А и Б.

$\varphi_{с1}$ — фаза первой гармоники напряжения на конденсаторе относительно входного напряжения.

$\varphi_{А1}, \varphi_{Б1}$ — фазы первых гармоник напряжений соответственно $U_A(t)$ и $U_B(t)$.

Рассмотрим получение некоторых соотношений для предлагаемой методики расчета.

Из анализа векторной диаграммы [7] можно получить следующие выражения:

$$U_{вх m} = S_{ст} \cdot W_1 \cdot \omega B_{1m} \cdot \sqrt{2}, \quad (8)$$

$$U_{с1 m} = K_{ТР} U_{вх m}, \quad (9)$$

где

$S_{ст}$ — активное сечение стали,
 ω — круговая частота.

Учитывая, что

$$\begin{cases} H_A(t) \cdot l_c = W_1 \cdot i_1 + W_2 \cdot i_2 \\ H_B(t) \cdot l_c = W_1 \cdot i_1 - W_2 \cdot i_2, \end{cases} \quad (10)$$

и применяя метод гармонического баланса к (10), можно записать следующее выражение для первых гармоник:

$$\begin{cases} H_{11A}(t) l_c = i_{11} W_1 + i_{21} W_2, \\ H_{11B}(t) l_c = i_{11} W_1 - i_{21} W_2, \end{cases} \quad (11)$$

где

l_c — величина средней магнитной силовой линии.

Векторная диаграмма, соответствующая (11), представлена на рис. 3.

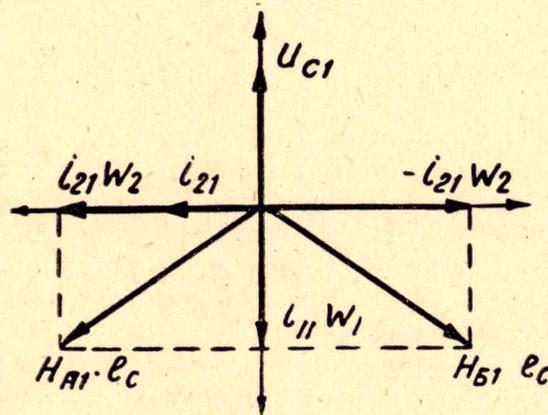


Рис. 3

Так как

$$H_{1Am} \cdot l_c = H_{1Bm} \cdot l_c,$$

то справедливо следующее соотношение:

$$H_{1Am} = H_{1Bm} = \frac{1}{l_c} \sqrt{(I_{11m} \cdot W_1)^2 + (I_{21} \cdot W_2)^2}. \quad (12)$$

Из (8) и (12) с учетом аппроксимации Робинсона

$$B = \frac{H}{\alpha + \beta H}, \quad (13)$$

где

α и β — коэффициенты аппроксимации, будем иметь:

$$U_{вх m} = \frac{2S_{ст}(W_1 \cdot \omega \cdot K_{ТР})^2 \cdot C - \alpha l_c}{\sqrt{2} \beta W_1 \omega K_{ТР} \cdot C}. \quad (14)$$

Исследование резонансных свойств параметрического контура

Как известно, нелинейная индуктивность изменяется по закону:

$$L(t) = L_0 + \sum_{k=1}^{\infty} L_{km} \sin(K\omega t + \gamma_k). \quad (15)$$

Из (15) следует равенство:

$$\mu_d(t) = \mu_{d0} + \sum_{k=1}^{\infty} \mu_{dk} \sin(K\omega t + \gamma_k), \quad (16)$$

где

$\mu_d(t)$ — мгновенное значение магнитной динамической проницаемости,

μ_{d0} — постоянная составляющая магнитной динамической проницаемости.

Для последовательного резонансного контура резонансная частота связана с параметрами контура следующим образом:

$$\omega_{\text{рез}}^2 = \frac{1}{L_k C}, \quad (17)$$

где

$$L_k = \frac{S_{\text{ст}} \cdot W^2}{l_c} \mu. \quad (18)$$

Известно, что одним из условий возникновения параметрических колебаний является близость резонансной частоты контура к частоте колебаний. Также известно, что при неизменных параметрах контура ИП в последнем могут возникнуть колебания с частотами, кратными частоте напряжения возбуждения.

Сделано предположение, что величина μ в (18), не являясь постоянной, в первом приближении определяется величиной μ_{d0} , которая в свою очередь, при отсутствии колебаний в параметрическом контуре, определяется величиной тока возбуждения.

При этом

$$\omega_{\text{рез}}^2 = \frac{l_c}{\mu_{d0} S_{\text{ст}} W^2 C} \quad (19)$$

Для определения μ_{d0} удобно использовать степенную аппроксимацию

$$b = \alpha_1 h^{\beta_1},$$

где

b и h — мгновенные значения магнитной индукции и напряженности,

α_1, β_1 — коэффициенты аппроксимации.

При этом получим:

$$\mu_{d0} = \frac{\omega}{\pi} \int_0^{\pi/\omega} \frac{\alpha_1}{2} h^{-\frac{1}{2}} dt = \frac{\alpha}{2} \sqrt{\frac{l_c}{I_{1m} \cdot W_1}}, \quad (20)$$

где

I_{1m} — величина первой гармоники тока возбуждения при отсутствии колебаний в параметрическом контуре.

Многokратные экспериментальные исследования показали, что μ из (18) и μ_{d0} из (16) достаточно близки друг к другу. Из (19) и (20) получено выражение:

$$\omega_{\text{рез}}^2 = \frac{4}{\alpha} \frac{\sqrt{l_c I_{1m} W_1}}{S_{\text{ст}} W_2^2 \cdot C}. \quad (21)$$

По полученным соотношениям (9), (14) и (21) оказывается возможным вести как анализ, так и синтез ИП.

Решение задачи анализа для ИП можно осуществить либо с помощью выражений (9) и (14), либо с помощью выражений (9) и (21). Решение задачи синтеза для ИП можно осуществить с помощью выражений (9), (14) и (21). Для получения однозначного решения в задаче синтеза можно использовать связь между l_c и размерами сердечника

$$l_c = K_l \sqrt{S_{\text{ок}}}$$

где

K_l — вполне определенная величина для нормализованного сердечника.

Как показали проведенные эксперименты, возбуждение параметрических колебаний наблюдается при индукции

$$B = (0,8 \div 1) \text{ тл},$$

что позволяет использовать в качестве дополнительного уравнения в задачах синтеза ИП выражение (8).

Выводы

1. Изучение свойств низкочастотного ИП, работающего в режиме повторения частоты, позволило разработать ряд элементов и устройств автоматики.

2. Исследование энергетических соотношений и резонансных свойств ИП позволило получить сравнительно простые и обзримые соотношения для его порога возбуждения.

3. Разработана инженерная методика анализа и синтеза ИП, работающего в режиме, близком к холостому ходу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Р. М. Кантор. Теория колебаний в параметрических резонаторах (параметронах) с ферритовыми сердечниками. Изв. вузов, «Радиотехника», т. IV, № 3, 1961.

2. К. М. Поливанов, Ф. П. Жарков, В. А. Соколов. Параметроны с ферромагнитными сердечниками. Изв. вузов, «Радиотехника», т. V, № 4, 1962.

3. Г. Р. Рахимов, Т. М. Кадыров, П. Ф. Хасанов. Установившиеся режимы двухсердечниковых электроферромагнитных колебательных контуров. Вопросы кибернетики и вычислительной техники. Вып. 3, Ташкент, ФАН, 1966.

4. Р. А. Вайнштейн. Применение низкочастотных параметрических систем для защиты от замыкания на землю компенсированных сетей. Диссертация, Томск, 1965.

5. А. В. Шмойлов. Исследование низкочастотных параметрических генераторов и некоторое их применение в релейной защите. Диссертация, Томск, 1967.

6. Л. А. Бессонов. Нелинейные электрические цепи. «Высшая школа», 1964.
7. Р. А. Вайнштейн и др. Теоретическое и экспериментальное исследование низкочастотного индуктивного параметрона без подмагничивания постоянным током. Магнитные цифровые элементы, «Наука», 1968.
8. Е. И. Гольдштейн, Н. И. Кузубных, В. Н. Станевко. Исследование энергетических соотношений для мгновенной мощности в нелинейных электрических цепях. Доклады на VI научно-технической конференции по вопросам автоматизации производства. Изд. Томского университета, 1969.
9. Л. А. Бессонов. Электрические цепи со сталью. Госэнергоиздат, 1948.

