

О НЕКОТОРЫХ РЕЖИМНЫХ СООТНОШЕНИЯХ ДЛЯ  
НИЗКОЧАСТОТНОГО ПАРАМЕТРОНА БЕЗ ПОДМАГНИЧИВАНИЯ  
ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ

А. И. КУТЯВИН

(Представлена научным семинаром кафедры автоматики и телемеханики)

В работах Т. Хаяси и Л. А. Бессонова [1, 2] показана возможность получения параметрических колебаний с частотой основного источника питания в схеме, приведенной на рис. 1.

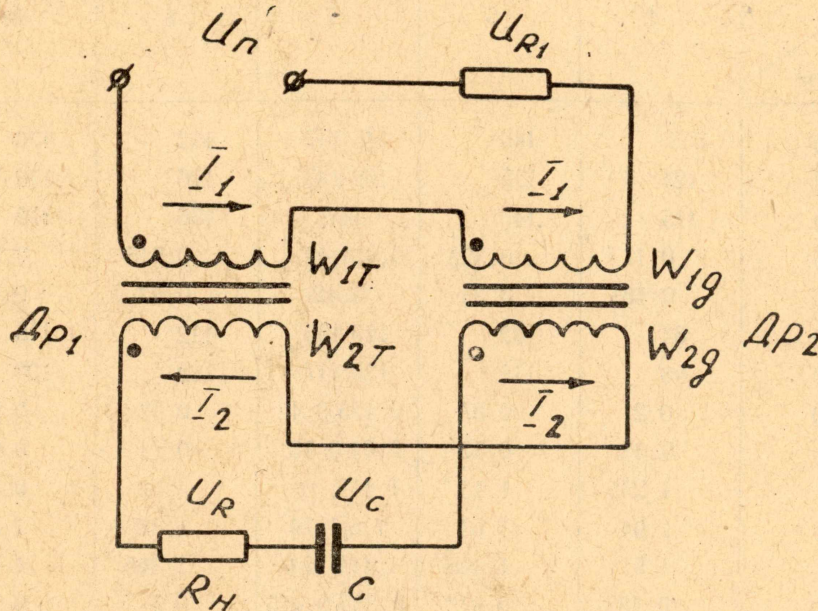


Рис. 1.

Как следует из схемы, первичные обмотки  $W_1$  включены последовательно и согласно, а контурные обмотки  $W_2$  — последовательно и встречно. Вторичные обмотки совместно с емкостью образуют резонансный контур, настроенный на входную частоту. В контур включено сопротивление  $R_n$ , играющее роль нагрузки.

Основное отличие данного параметрона от широко используемого в устройствах вычислительной техники и автоматики — отсутствие постоянной составляющей в намагничивающих токах, что приводит к возбуждению устройства на основной частоте.

Простота схемы низкочастотного индуктивного параметрона без подмагничивания, возможно, сделает перспективным его использование в автоматике и телемеханике.



В настоящей работе сделана попытка установить основные соотношения между действующими значениями электрических величин на основе экспериментального исследования параметрона, имеющего дроссели с коэффициентом трансформации, равным единице.

Чем ближе коэффициент трансформации к единице, тем заметнее разница в функции, выполняемой каждым дросселем в отдельности. Как правило, один из них может выполнять функцию трансформатора, другой — дросселя двойного питания. Такое распределение является случайным и зависит от фазы напряжения питания в момент возбуждения колебаний. Величина емкости также существенно влияет на распределение напряжений между дросселями.

Нами исследовался параметрон, работающий на частоте 50 гц. Основные данные сердечников — материал Э-42; штамп — Ш-32; набор — 5,3 см; площадь активной стали — 14,4 см<sup>2</sup>; длина средней силовой линии — 21,0 см; число витков  $W_1 = W_2 = 300$ ; суммарное активное сопротивление первичных обмоток 11 ом, вторичных — 14 ом.

Построим векторную диаграмму для случая возбуждения параметрона с емкостью 7 мкф по экспериментальным данным, приведенным в табл. 1,  $R_H = 0$  (рис. 2).

Таблица 1

<i>C</i> , мкф	4	6	7	8	10
Параметры					
$U_{п.в}$ (в)	135	140	145/147	152	170
$U_{св}$ (в)	124	155	162/147	170	175
$U_{п.в.р}$ (в)	115	140	147	156	170
$I_2$ (а)	0,17	0,322	0,4/0,42	0,515	0,79
$I_{2р}$ (а)	0,165	0,34	0,42	0,53	0,73
$U_{2т}$ (в)	84	102	110/105	112	115
$U_{2д}$ (в)	98	112	120/117	122	130
$I_{от}$ (а)	0,21	0,37	0,455/0,42	0,52	0,55
$I_{од}$ (а)	0,33	0,52	0,64/0,73	0,71	0,95
$I_{от}/I_2$	1,235	1,15	1,11/1,0	1,01	0,697
$I_{од}/I_2$	1,94	1,62	1,6/1,74	1,38	1,2
$I_{од}/I_о$	1,57	1,405	1,41/1,74	1,365	1,718
$I_1$ (а)	0,185	0,313	0,385/0,425	0,5	0,775

Напряжение на емкости отстает на угол 90° от вторичного тока и образует с остальными векторами напряжений вторичной цепи треугольник, который может быть построен методом засечек

$$\dot{U}_c = \dot{U}_{2т} + \dot{U}_{2д}, \quad (1)$$

где  $U_{2т}$ ,  $U_{2д}$  — напряжения на трансформаторе и дросселе двойного питания соответственно.

Условно считаем первый дроссель — трансформатором, второй — дросселем двойного питания.

Учитывая, что активное сопротивление вторичных обмоток мало, имеем  $E_{2т} = U_{2т}$ .



Реактивная составляющая тока холостого хода  $I_{от} \simeq I_{хт}$ , опережает  $E_{2т}$  на угол  $90^\circ$  и совпадает по направлению с магнитным потоком  $\Phi_0$ . Определив активную составляющую тока  $I_{ат}$ , например, по И. И. Белополюскому [3], находим направление тока холостого хода трансформатора и первичный ток параметрона.

$$i_{хт} = i_{от} + i_{ат}, \quad (2)$$

$$i_1 = i_{хт} - i_{2т}. \quad (3)$$

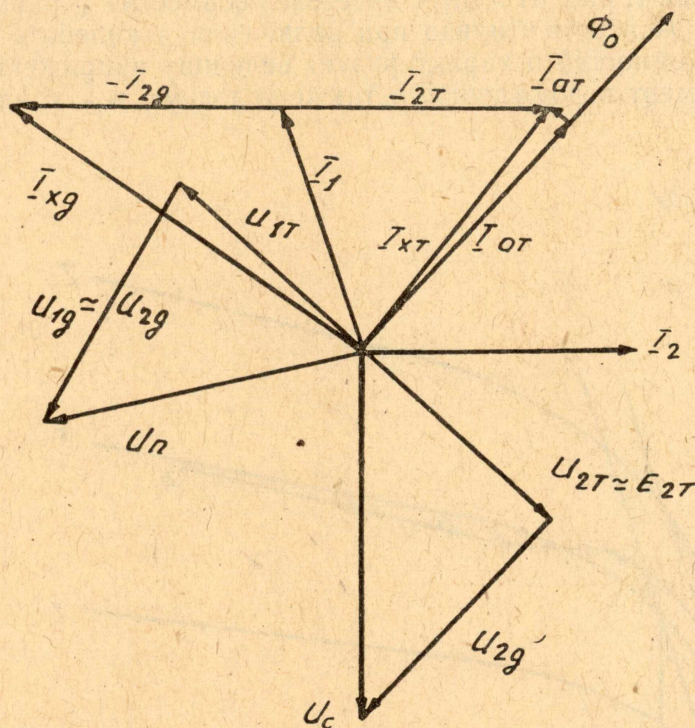


Рис. 2

Ток холостого хода дросселя  $I_{хд}$  равен разности первичного и вторичного токов (рис. 2):

$$i_{хд} = i_1 - i_{2д}. \quad (4)$$

Приложенное напряжение питания должно уравниваться геометрической суммой первичных напряжений на дросселе и трансформаторе:

$$\dot{U}_п = \dot{U}_{1т} + \dot{U}_{1д}. \quad (5)$$

Подобным образом можно построить векторные диаграммы для любого режима рассматриваемого параметрона.

Амплитуда колебаний при параметрическом резонансе ограничивается нелинейностью характеристик элементов цепи, поэтому можно выделить три крайних задачи:

1. Нахождение условной вольт-амперной характеристики (в. а. х) параметрона с выходом на основной частоте при возбуждении с определенными основными расчетными соотношениями.

2. Ограничение амплитуды параметрических колебаний по максимуму.

3. Ограничение амплитуды колебаний по минимуму.

Наибольшая амплитуда колебаний имеет место при минимальном напряжении накачки, минимальная — при «критической» нагрузке,



увеличение сопротивления которой приводит к срыву параметрических колебаний.

### 1. Некоторые соотношения при возбуждении

Рассмотрим работу параметрона при возбуждении, отсутствии нагрузки и весьма малом активном сопротивлении обмоток колебательно-го контура.

Для выяснения краевых условий были построены в. а. х. для одного дросселя (кривая 1, рис. 3) и двух дросселей совместно (кривая 2). Кривая 4 найдена экспериментально при включении в колебательный контур различных емкостей и характеризует величину напряжения на конденсаторе в момент возбуждения, а также условную в. а. х. индуктивной

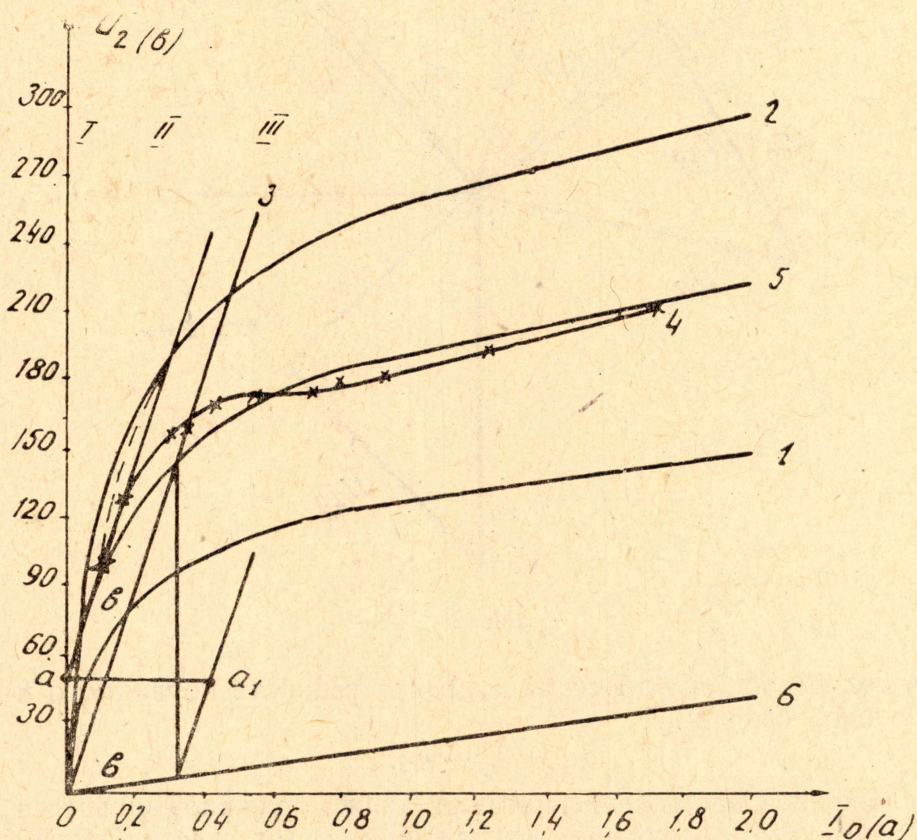


Рис. 3

части параметрона с выходом на основной частоте. Она начинается не из начала координат, так как при малых емкостях в схеме имеет место резонанс с удвоенной частотой источника питания (зона I). В. а. х. минимальной емкости, при которой уже возможен параметрический резонанс на основной частоте, является касательной к в. а. х. одного дросселя. Включение больших емкостей приводит к насыщению трансформатора ( $B_T > 1$  тесла), в схеме имеет место медленный рост напряжения на емкости, колебания неустойчивы (зона III).

В зонах II и III условная в. а. х. индуктивности параметрона с выходом на основной частоте с достаточной точностью представляется полукривой в. а. х. одного дросселя (кривая 5).

$$\dot{U}_{Ly} = 1,5U_L = f(I_0). \quad (6)$$



Как следует из табл. 1, напряжение питания в момент возбуждения равно в первом приближении напряжению на емкости

$$U_{п.в} = U_{св}. \quad (7)$$

В табл. 1 приведены экспериментальные и некоторые расчетные данные для параметрона в момент возбуждения. Основные расчетные соотношения могут быть найдены достаточно просто при известной условной в. а. х. индуктивности параметрона. Будем считать заданными в. а. х. одного дросселя параметрона и основные параметры сердечников, включая обмоточные данные. При коэффициенте трансформации, равном единице, в. а. х. условной индуктивности параметрона определяется из выражения (6). Точка пересечения в. а. х. емкости (прямая 3) и в. а. х. условной индуктивности (кривая 5) дает нам значение напряжения на емкости и напряжения питания в момент возбуждения. Расчетные значения напряжений питания приведены в третьей строке таблицы.

В индуктивном параметроне, как и при феррорезонансе напряжений, действительное значение тока колебательного контура при возбуждении больше тока, определенного по формуле

$$I_2 = \frac{U_{св}}{X_c}. \quad (8)$$

Для нахождения действительного значения вторичного тока проводим построения, как при феррорезонансе напряжений [4].

Отрезок  $oa$  на оси ординат, заключенный между началом координат и касательной к в. а. х. условной индуктивности параметрона, является необходимым напряжением для феррорезонанса при данной емкости.

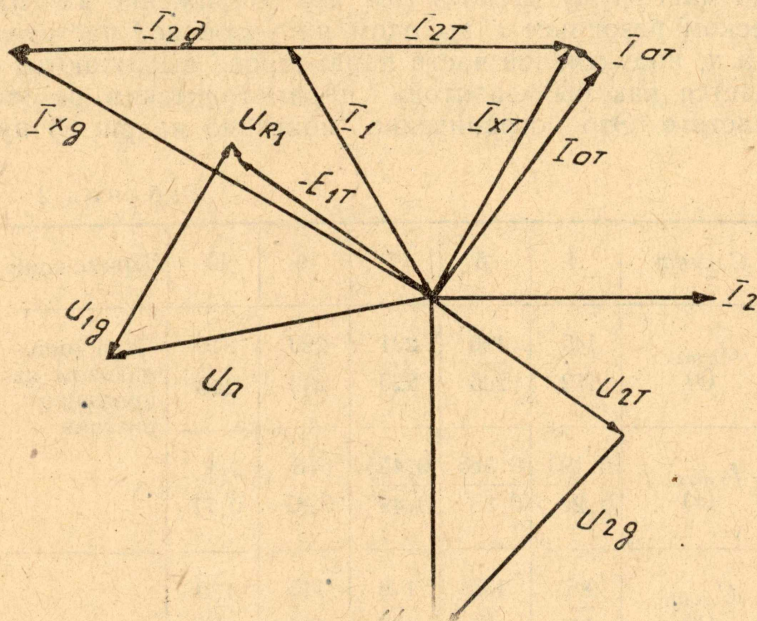


Рис. 4.

Касательная проводится параллельно в. а. х. емкости, тангенс угла наклона которой к оси ординат численно равен  $\frac{1}{\omega C}$ . Учитывая падение напряжения на активных сопротивлениях обмоток колебательного контура (прямая 6, рис. 3), находим расчетное значение вторичного тока



параметрона (отрезок  $aa_1$ ). Расчетные и экспериментальные вторичные токи —  $I_{2r}$ ,  $I_2$  — приведены в табл. 1.

Распределение вторичных напряжений по обмоткам  $U_{2r}$  и  $U_{2л}$  позволяет определить намагничивающие токи  $I_{от}$  и  $I_{од}$  по в. а. х. одного дросселя или, наоборот, можно найти напряжение по намагничивающим токам.

Векторную диаграмму в момент возбуждения параметрона можно построить по известным уже данным и с учетом отношений  $I_{от}/I_2$  и  $I_{од}/I_2$ .

Как показали расчеты, отношение  $I_{од}/I_{от}$  при изменении емкости от 3 до 24 мкф колеблется между 1,2 и 1,8.

Векторная диаграмма (рис. 4) построена без учета магнитного рассеяния для параметрона с емкостью 7 мкф и с допущением, что  $I_{от} = I_2$ ;  $I_{од} = 1,5I_2$ . При построении были учтены падения напряжений на активных сопротивлениях обмоток.

Построение треугольника первичных напряжений производилось способом засечек. В табл. 1 для емкости 7 мкф приведены полностью экспериментальные и расчетные данные, полученные из векторной диаграммы. Последние записаны в знаменатели дроби. В 8 и 9 строках табл. для 7 мкф вписаны не намагничивающие токи, а токи холостого хода.

## 2. Некоторые соотношения при минимальном напряжении накачки

При уменьшении напряжения питания происходит увеличение напряжения на емкости, но оно ограничено по оси ординат кривой 2 (рис. 3) При емкости, в. а. х. которых являются почти касательными к в. а. х. одного дросселя (кривая 1), имеет место еще одно ограничение колебаний по максимуму. Дело в том, что напряжение на емкости при параметрическом резонансе с выходом на удвоенной частоте, а следовательно, в. а. х. индуктивной части параметрона выражаются кривой 2. Она оказывается как бы «занятой» параметрическим резонансом на удвоенной частоте. Это ограничение показано на рис. 3 пунктирной линией.

Таблица 2

$C$ , мкф	4	6	7	8	10	Примечание
$U_c \max$ (в)	$\frac{145}{173}$	$\frac{190}{205}$	$\frac{201}{220}$	$\frac{220}{230}$	$\frac{240}{248}$	При минимальном напряжении питания
$I_2 \max$ (а)	$\frac{0,193}{0,22}$	$\frac{0,365}{0,38}$	$\frac{0,455}{0,49}$	$\frac{0,6}{0,57}$	$\frac{0,8}{0,77}$	
$U_c \min$ (в)	$\frac{85}{78}$	$\frac{105}{98}$	$\frac{1,6}{107}$	$\frac{1,15}{113}$	$\frac{1,30}{123}$	При «критической» нагрузке
$I_2 \min$ (а)	$\frac{0,12}{0,1}$	$\frac{0,21}{0,185}$	$\frac{0,28}{0,24}$	$\frac{0,325}{0,28}$	$\frac{0,44}{0,39}$	

Независимо от режима работы параметрона справедливо выражение

$$U_c < \dot{U}_c + \dot{U}_{Rн} = \dot{U}_{2r} + \dot{U}_{2л}, \quad (1')$$

где  $U_{Rн}$  — падение напряжения на нагрузке.



На основании экспериментальных данных можно сказать, что максимальное напряжение на емкости определяется точкой пересечения в. а. х. емкости и кривой 2, спроектированной на ось ординат; вторичный ток — проекцией отрезка, ограниченного этой точкой, на ось абсцисс.

Экспериментальные и расчетные данные о выяснении ограничений напряжения на емкости по максимуму и минимуму приведены в табл. 2. В числителе дроби приводятся экспериментальные данные, в знаменателе — расчетные.

Уменьшение напряжения накачки до точки срыва приводит к значительному уменьшению напряжения на трансформаторе и незначительному насыщению дросселя. Минимальное напряжение на трансформаторе, при котором еще возможны колебания, определяется точкой пересечения в. а. х. емкости и одного дросселя (отрезок *вв*):

$$U_{2т\ min} = 66. \quad (9)$$

Напряжение на дросселе двойного питания в первом приближении равно напряжению на нем для случая возбуждения.

$$U_{2д} = U_{2д.в}. \quad (10)$$

Минимальное напряжение накачки можно определить с достаточной точностью в зоне II как отрезок между началом координат и точкой пересечения касательной к в. а. х. обеих дросселей (кривая 2) (табл. 3).

Таблица 3

<i>C</i> , мкф	4	6	7	8	10	24
Параметры						
$U_{п\ min\ э}$	82	70	72	70	80	122
$U_{п\ min\ р}$	50	70	77	84	97	148

### 3. Некоторые соотношения при «критической» нагрузке

Минимальное напряжение на емкости, при котором еще возможны колебания, зависит от величины нагрузки, а также от активных сопротивлений вторичных обмоток и не может быть меньше, чем напряжение на трансформаторе в момент возбуждения:

$$U_{с\ min} \geq U_{2т.в}. \quad (11)$$

Следует отметить, что условие (11) справедливо при питании схемы напряжением, равном напряжению возбуждения или превышающем его максимум в 1,2 раза. В этом случае наглядно виден срыв и возбуждение параметрических колебаний. При большем напряжении накачки значительные колебания нагрузки ведут к плавному изменению напряжения на выходе.

Величина вторичного тока ограничена перпендикуляром к оси абсцисс, проходящим через точку на в. а. х. емкости  $U_{с\ min}$ . В табл. 2 приведены экспериментальные и расчетные значения напряжений и токов для данного случая.

Ориентировочно можно считать «критическое» сопротивление нагрузки равным  $(0,2 \div 0,3)X_c$  при последовательном соединении с емкостью  $(2,3 \div 4)X_c$  — при параллельном. Большому сопротивлению при последовательной нагрузке соответствует меньшее при параллельной.



## Выводы

1. В индуктивном параметроне с выходом на основной частоте один из дросселей работает в режиме трансформатора, второй — в режиме дросселя двойного питания, что не наблюдается в таком же параметроне с выходом на удвоенной частоте.

2. В работе предлагается использование условной в. а. х. индуктивной части, что делает дальнейшие расчеты достаточно простыми (выражение 6).

3. Основные соотношения напряжений и токов для параметрона в крайних режимах могут быть определены с достаточной точностью графическим способом с применением векторных диаграмм.

4. В работе приведены некоторые данные, отражающие физические процессы работающего параметрона.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Тихиро Хаяси. Вынужденные колебания в нелинейных системах. ИЛ., 1957.
2. Л. А. Бессонов. Нелинейные электрические цепи. «Высшая школа», 1964.
3. И. И. Белополюский. Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности. ГЭИ, 1963.
4. Л. А. Бессонов. Теоретические основы электротехники. «Высшая школа», 1964.