

# СИММЕТРИЧНЫЕ ОДНОТАКТНЫЕ КАСКАДЫ

*Евгений Карпов*

В статье приведены варианты реализации однотоктных каскадов, обладающих свойствами симметричности, характерными для двухтактных схем. Описаны их преимущества и недостатки, приведены расчетные формулы и результаты исследования их параметров.

Рассмотренные в этой статье несколько вариантов выходных каскадов ламповых усилителей ведут свою родословную от обыкновенного однотактного выходного каскада [1], [4].

Модернизация схемы преследовала одну-единственную цель – получение наивысшего качества звука. Конечно, ничего не дается даром, поэтому я был готов все остальные характеристики каскада, такие как эффективность, простота, стоимость, принести в жертву качеству. С другой стороны, довлеют реалистичности жизни, и каждый лишний моточный элемент или чрезвычайно низкая эффективность – раздражают. Получившиеся схемы – сплошной компромисс, но каждая из них имеет некоторые преимущества, а насколько они ценны – судите сами.

### *Симметричный каскад с параллельным питанием.*

Первоначально я использовал эту схему (Рис. 1), несмотря на ее недостатки, вынужденно (смотрите статью – [Использование трансформаторов типа ТВЗ](#) [2]). Фактически, ее главное преимущество в отсутствии постоянного подмагничивания выходного трансформатора. Это позволяет улучшить параметры каскада за счет повышения индуктивности намагничивания и (или) уменьшения паразитных параметров трансформатора.

Но такая схема, на мой взгляд, уже не является однотактной, так как потеряла один из существенных признаков – перемагничивание сердечника трансформатора по частному циклу. Трансформатор работает по симметричной петле аналогично двухтактной схеме, это и хорошо и плохо. Хорошо потому, что сердечник не генерирует четные гармоники, и допустимый размах индукции увеличился. Плохо потому, что при переходе индукции через ноль (режим малого сигнала) кривая намагничивания существенно не линейна.

Раз трансформатор работает по симметричной петле, ничто нам не мешает преобразовать схему в двухтактную, и соответственно, добавить ее преимущества и недостатки к недостаткам уже имеющимся.

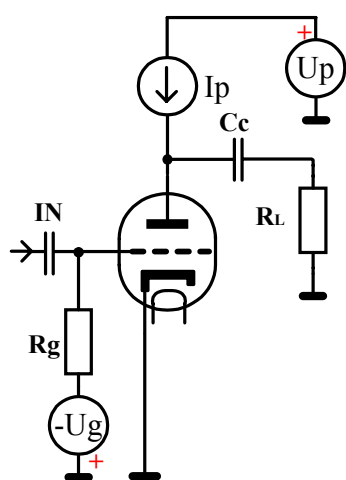


Рисунок 1

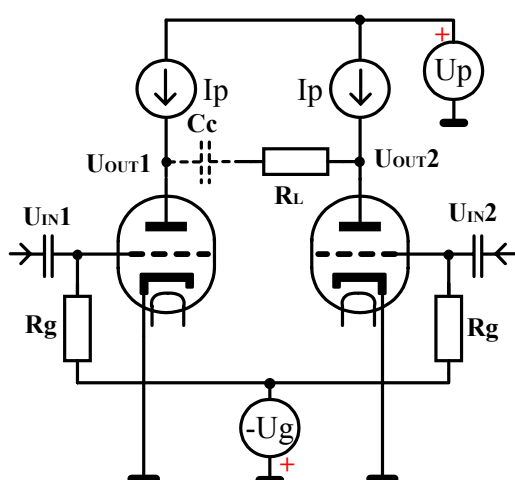


Рисунок 2

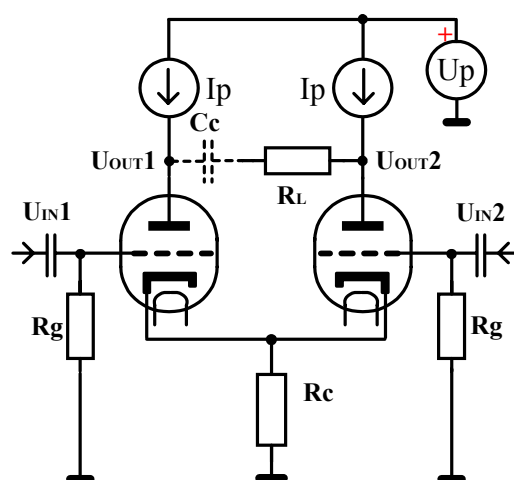


Рисунок 3

Естественно, Вы можете задать резонный вопрос: а зачем это делать? Попробую ответить.

Я считаю, что конечной целью разработчика является получение максимально линейного, то есть свободного от всяческих искажений, тракта звукоусиления. И надо пользоваться любыми методами, позволяющими это сделать, и в первую очередь, методами, позволяющими подавить нежелательную нелинейность без использования общей обратной связи. Как раз двухтактные схемы и дают такую возможность параметрическими методами без использования обратных связей повысить линейность системы и обеспечить ее симметричность. Обсуждаемые в литературе [3] способы подавления четных гармоник в однотактных схемах путем подбора типов и режимов ламп являются бледной тенью двухтактного каскада.

Конечно, в результате доминирующими в спектре выходного сигнала станут нечетные гармоники – это плохо. Но уровень этих гармоник на порядок меньше, чем подавленных четных, и с ними, поэтому, гораздо легче бороться другими методами. Этому вопросу мы коснемся подробнее позже.

Есть еще важный момент. Однотактный каскад принципиально несимметричен. Следствием этого является то, что скорости нарастания и спада фронтов сигналов импульсного характера принципно-

ально разные. Также это приводит к повышенному уровню фазовых искажений. В двухтактных схемах этот недостаток теоретически отсутствует.

В нашем случае двухтактную схему можно получить путем включения нагрузки между выходами двух каскадов с параллельным питанием, и соответственно, возбуждением этих каскадов парафазным сигналом (Рис. 2). Для ламп с малыми напряжениями смещения более удобна схема, показанная на рисунке 3, так как она не требует отдельного источника смещения. Фактически, схема на рисунке 3 соответствует обычному дифференциальному каскаду и очень часто используется в схемотехнике операционных усилителей. Нормальная работа всех схем возможна только в классе «А».

Если лампы идентичны, то коэффициент усиления такого каскада для парафазных сигналов равен -

$$K = \frac{U_{IN1}}{U_{OUT1}} = \frac{U_{IN2}}{U_{OUT2}} = -\frac{\mu \cdot R_L}{r_i + R_L} \quad (1),$$

где  $\mu$  – коэффициент усиления лампы,  $r_i$  – ее внутренне сопротивление,  $R_L$  – сопротивление нагрузки, а выходное сопротивление равно -

$$r_e = 2 \cdot r_i \quad (2).$$

Разделительная емкость  $C_s$ , в общем случае, может отсутствовать. Нет больших технических сложностей обеспечить балансировку каскада для поддержания равных напряжений на анодах, но я настоятельно рекомендую использовать разделительную емкость.

Наличие этой емкости позволяет произвольно, независимо и в широких пределах менять режим работы каждой лампы каскада. Появляется возможность установить режим работы каскада с желаемым уровнем четных гармоник, даже для ламп с сильно разнящимися характеристиками.

### **Итоги модификации.**

#### **ЗА**

- Удвоенная выходная мощность
- Компенсация четных гармоник ламп и трансформатора.
- Возможность регулировать спектр выходного сигнала.
- Отсутствие подмагничивания трансформатора.
- Уменьшение габаритов трансформатора или улучшение его параметров при тех же габаритах.
- Упрощение конструкции трансформатора и отсутствие требований по симметричности.

#### **ПРОТИВ**

- Повышенная сложность схемы.
- Наличие разделительного конденсатора.
- Удвоенное выходное сопротивление.
- Низкий КПД. Даже теоретически КПД не превышает 25%.
- Повышенный уровень нечетных гармоник, так как ток сигнала протекает через две лампы (это свойственно любому двухтактному каскаду, работающему в режиме «А»).
- Высокое напряжение питания.

### **Дальнейшее улучшение параметров.**

Конечно, самым неприятной проблемой являются нечетные гармоники. К сожалению, я не знаю других способов, кроме уменьшения числа ламп и введения обратной связи.

На мой взгляд, для подавления нечетных гармоник целесообразно ввести местную обратную связь в выходной каскад. Наиболее оптимальным вариантом будет использование катодной обратной связи (Рис. 4).

Посмотрим, что получится при введении обратной связи на реальном примере. В соответствии с теорией обратной связи [4], уменьшение уровня гармонических составляющих  $\dot{U}_n$  пропорционально глубине обратной связи  $\dot{A}$ .

$$\dot{U}_{n_{FB}} = \frac{\dot{U}_n}{A} \quad (3),$$

где  $\dot{U}_{n_{FB}}$  - уровень n-ой гармонической составляющей в усилителе, охваченном обратной связью.

В области средних частот вполне допустимо рассматривать не комплексные величины, а их модули, что мы в дальнейшем и будем делать.

Катодная отрицательная обратная связь является последовательной обратной связью по напряжению, в этом случае коэффициент усиления усилителя, охваченного обратной связью  $K_{FB}$  равен:

$$K_{FB} = \frac{K}{1 + K \cdot \beta} \quad (4),$$

где  $K$  – коэффициент усиления усилителя без обратной связи,  $\beta$  – коэффициент передачи цепи обратной связи. Знаменатель выражения 4 как раз и равен нужной нам величине  $A$ , то есть

$$A = 1 + K\beta \quad (5).$$

Теперь воспользуемся результатами реальных измерений, приведенных в статье [Спектры](#). Для нашего каскада желательно использовать лампу с максимальным усилением и минимальным уровнем третьей гармоники. Воспользуемся лампой типа 6П1П и зададим желаемое значение усиления каскада  $K_{FB}$ , равное 3 (эта величина выбрана мной произвольно, в реальных схемах величина  $K_{FB}$  определится возможностями драйверного каскада). Подставив величину  $K_{FB}$  в уравнение 4, вычислим значение  $A$ :

$$A = \frac{K}{K_{FB}} = \frac{7.1}{3} = 2.36.$$

Теперь в соответствии с выражением 3 пересчитаем уровни гармонических составляющих, считая, что четные гармоники скомпенсированы полностью (Таблица 1).

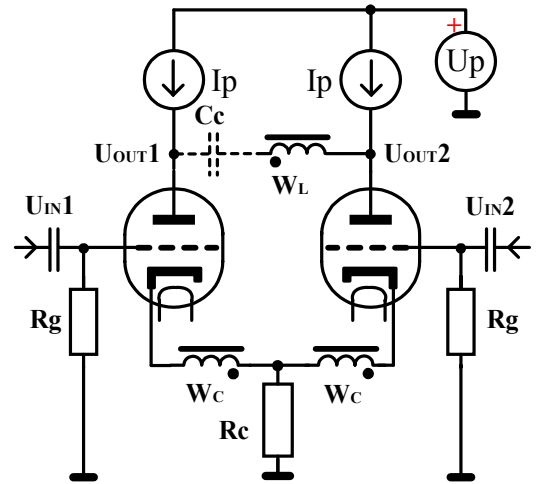


Рисунок 4

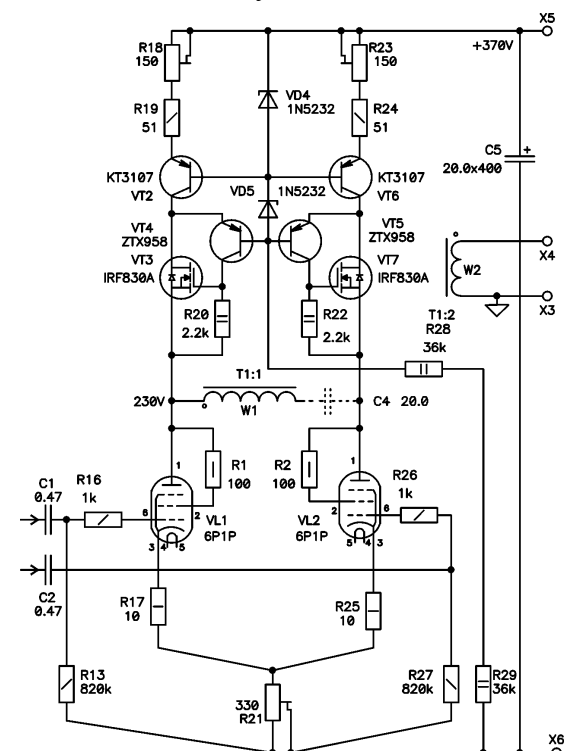


Рисунок 5

Таблица 1

Гармонические составляющие	Схема	Рисунок 1		Рисунок 3		Рисунок 4	
		Amplitude (mV)	THD (%)	Amplitude (mV)	THD (%)	Amplitude (mV)	THD (%)
1		1820	100%	3640	100%	3640	100%
2		90.4	4.96%	-	-	-	-
3		6.68	0.36%	9.44	0.26%	4	0.1%
4		1.46	0.08%	-	-	-	-
5		0.34	0.018%	0.48	0.013%	0.2	0.005%
6		0.3	0.016%	-	-	-	-
THD		4.96%		0.26%		0.11%	

Полученные расчетным путем результаты отличаются от измеренных на 20÷25%, и конечно, в сторону ухудшения. Это объясняется и неполной компенсацией четных гармоник (использовались лампы без какого-либо предварительного подбора), и упрощенным подходом, использованным при расчете. Для проведения экспериментов использовался выходной каскад, собранный по схеме, показанной на рисунке 5 (соответствует схеме на рис. 3). На рисунке 6 показан спектр его выходного сигнала.

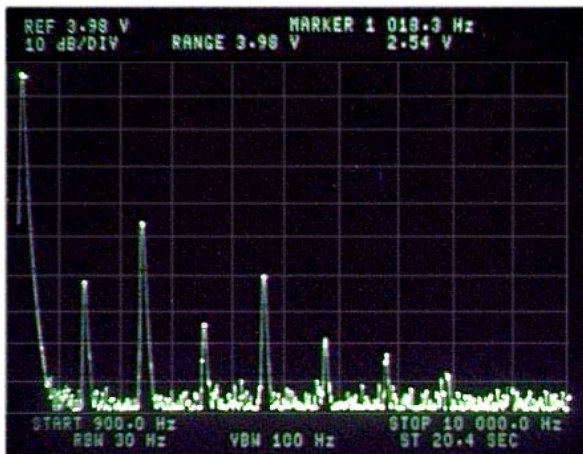


Рисунок 6

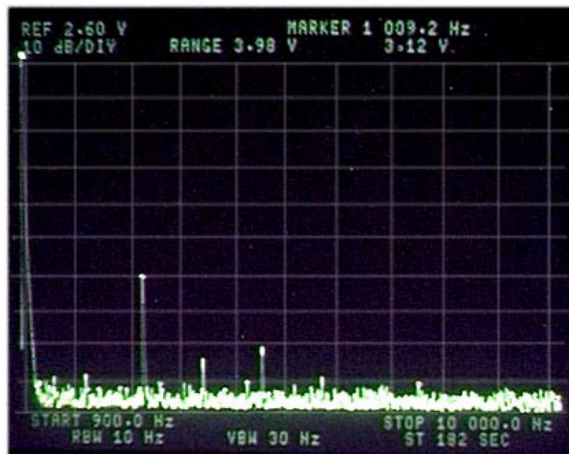


Рисунок 7

Но даже при учете всех неточностей линейность усилителя существенно выросла. Особенно привлекательна схема с катодной обратной связью [5], [6], в этом случае улучшаются все параметры каскада.

### Варианты использования.

Основным ограничением при практическом использовании такого каскада является его низкая эффективность. При использовании широко распространенных ламп можно получить выходную мощность порядка 2÷3 W. Применение такой схемы целесообразно, в первую очередь, при наличии готовых выходных трансформаторов от однокатных каскадов старой радиоаппаратуры (зазор в трансформаторе следует устранить). Также описанная схема хорошо подходит для выходного каскада высококачественного телефонного усилителя, особенно если используется специально изготовленный трансформатор. На рисунке 7 показан спектр выходного сигнала такого усилителя, при максимальной мощности 0.6 W общий коэффициент гармоник всего тракта не превышает 0.06%.

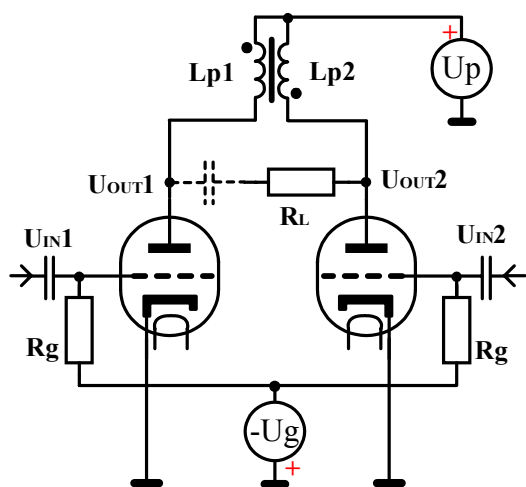


Рисунок 7

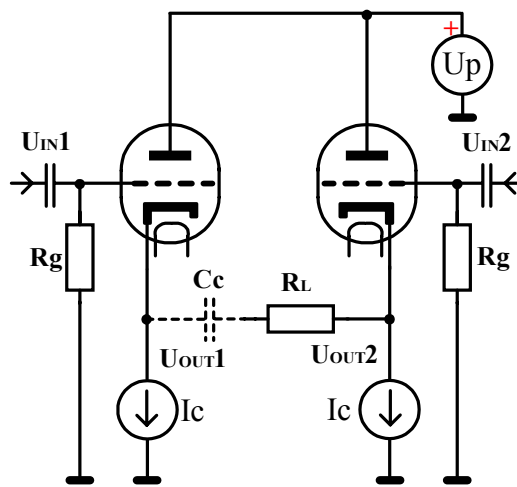


Рисунок 8

Предложенный подход без особых модификаций можно применить и к другим вариантам каскада с параллельным питанием. Заменяв источники тока в анодах ламп на магнитосвязанный дроссель, Вы получите симметричный дроссельный каскад с эффективностью, равной уже 50%, и в придачу второй, достаточно сложный моточный узел (Рис. 7). Перенос источников тока или дросселя в катодную цепь ламп дает симметричный катодный повторитель (Рис. 8). Последний вариант схемы представляет практический интерес для применения в выходных каскадах предварительных усилителей с трансформаторным выходом, и опять же для телефонных усилителей.

Хочу заметить, что в схеме, показанной на рисунке 4, исключив резистор  $R_c$  и применив фиксированное смещение, можно с успехом использовать пентоды и лучевые тетроды. Но наибольший интерес представляет применение этого подхода к классическому однокатному каскаду, и об этом мы поговорим более подробно.

## Симметричный однотактный каскад

Как я отмечал выше, каскад с параллельным питанием уже нельзя в полной мере считать однотактным, но хотелось совместить преимущества, а не недостатки, однотактного и двухтактного каскадов. А именно, иметь параметрическую компенсацию четных гармоник и работу трансформатора на частой петле намагничивания.

Такое желание возникло не только у меня одного, в статье - [The Accordion Amplifier](#), опубликованной в интернет-журнале [TUBE CAD JOURNAL](#), предложена схема, сочетающая в себе свойства двух типов выходных каскадов (Рис. 9). Это красивое и относительно дешевое решение проблемы, на мой взгляд, имеет два небольших недостатка. Во-первых, это сложность возбуждения верхней лампы. При полном совпадении характеристик выходных ламп абсолютной симметрии можно достичь только при использовании межкаскадных трансформаторов для возбуждения обеих ламп. Во вторых, в этой схеме невозможно использовать лампы в пентодном включении. Вернее, это относится к верхней лампе, протекание тока экранирующей сетки по цепям нагрузки приведет к возникновению асимметрии.

Хочу предложить вашему вниманию новый вариант однотактного симметричного каскада, у которого отсутствуют недостатки, присущие схеме на рисунке 9, но зато имеется свой собственный – наличие двух выходных трансформаторов (Рис. 10, 11). На мой взгляд, это допустимая цена за исключительно хорошие свойства и высокую гибкость.

Симметричный однотактный каскад получается при объединении вторичных обмоток выходных трансформаторов двух однотактных каскадов и возбуждении этих каскадов парафазным сигналом. В результате получается симметричная система.

Каскад абсолютно симметричен, позволяет практически полностью подавить четные гармоники (естественно, при симметрии компонентов плеч), может возбуждаться от фазоинверсного каскада любого типа, в нем можно использовать без ограничений любые типы ламп и вводить все известные типы местной обратной связи, как в каждое плечо независимо, так и перекрестно. Нормальная работа каскада возможна только в классе «А»

### Особенности работы однотактного симметричного каскада

Как Вы уже заметили, возможны два варианта реализации каскада, существенно отличающиеся по свойствам. Если по постоянному току в обоих вариантах лампы включены параллельно, то по переменному току способ соединения ламп зависит от того, как соединены вторичные обмотки выходных трансформаторов и как подключена к ним нагрузка.

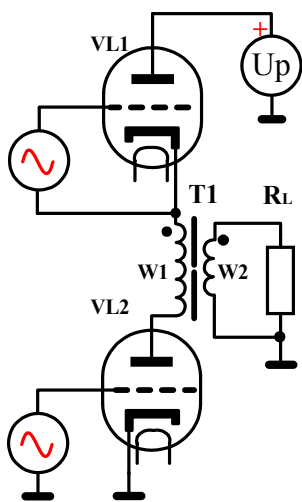


Рисунок 9

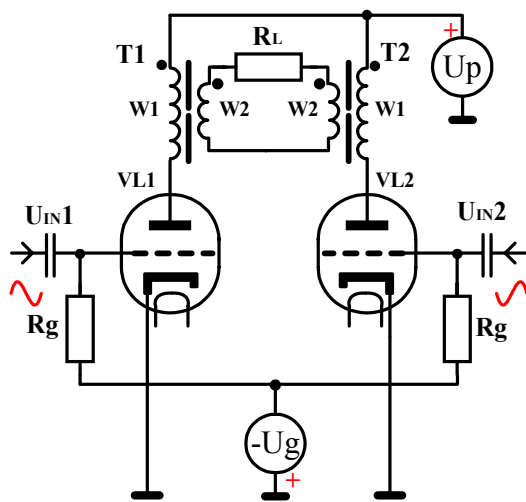


Рисунок 10

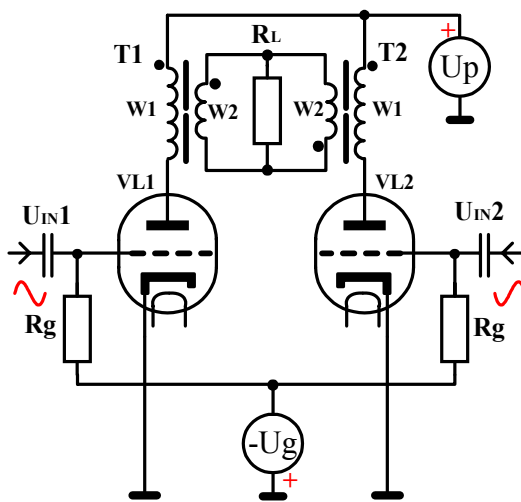


Рисунок 11

При внешней схожести свойств на обычный двухтактный каскад существуют различия в способе работы и расчетных соотношениях.

Выходных трансформаторов два, и они работают в однотактном режиме. Искушенный читатель скажет – это недостаток. Да, с позиций уменьшения стоимости, габаритов конструкции и сложности это так, но если во главу угла ставится вопрос качества – это достоинство.

Во-первых, устраняется переход индукции в трансформаторе через ноль и, соответственно, характерные нелинейности трансформатора на малых уровнях сигнала. Во вторых, так как мы не связаны с необходимостью обеспечения равенства токов покоя в плечах каскада, их можно установить разными сознательно. Это дает нам возможность регулировать уровень четных гармоник в выходном сигнале и использовать лампы с большим разбросом характеристик.

Еще одним отличием от двухтактного каскада является место, где происходит компенсация четных гармоник плеч каскада. В двухтактном каскаде компенсация происходит в магнитном поле выходного трансформатора; в симметричном однотактном каскаде - непосредственно на сопротивлении нагрузки.

Для получения основных расчетных соотношений и лучшего уяснения свойств каскадов представим их в виде эквивалентных схем, предположив, что лампы и трансформаторы одинаковы. Для этого представим лампы как эквивалентный источник э.д.с.  $\dot{E}$ , с выходным сопротивлением  $r_i$ , или как эквивалентный источник тока  $\dot{I}$ , зашунтированный сопротивлением  $r_i$ .

$$\dot{E} = -\mu \cdot \dot{U}_g, \quad \dot{I} = -S \cdot \dot{U}_g \quad (6),$$

где  $\mu$  - коэффициент усиления лампы,  $S$  - крутизна лампы,  $U_g$  - напряжение на управляющей сетке лампы,  $r_i$  - выходное сопротивление лампы.

Каскаду, показанному на рисунке 10, соответствует схема 12a, а каскаду, показанному на рисунке 11 -

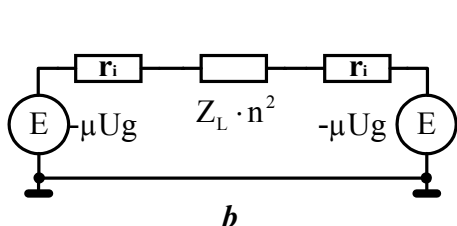
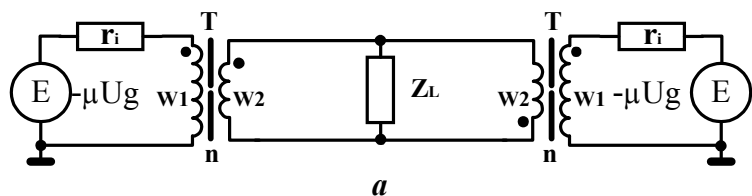
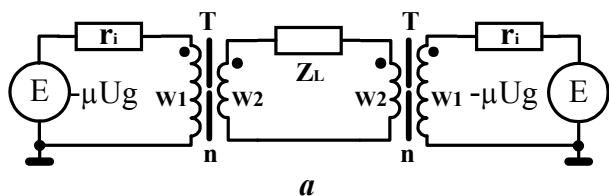


Рисунок 12

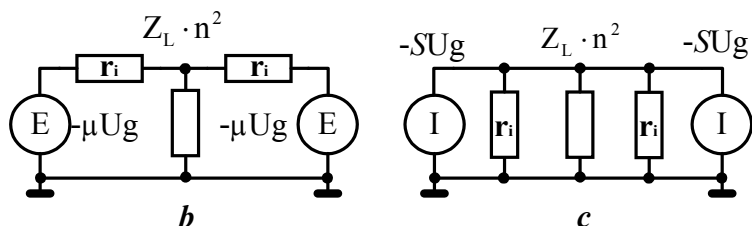


Рисунок 13

13a. Дальнейшее упрощение приводит к эквивалентным схемам, показанным на рисунках 12b, 13b, 13c, соответственно.

Если Вы внимательно посмотрите на конечные варианты эквивалентных схем, то сразу увидите разницу. В схеме, показанной на рисунке 10 (Рис. 12b), лампы соединены по переменному току последовательно - назовем этот каскад последовательным, а в схеме показанной на рисунке 11 (Рис. 13b) - параллельно, назовем этот каскад параллельным. Из полученных эквивалентных схем достаточно просто получить основные расчетные соотношения [7] (Таблица 2).

Таблица 2

Тип симметричного каскада		Последовательный	Параллельный
Параметры эквивалентного генератора	$\mu_e$	$2 \cdot \mu$	$\mu$
	$S_e$	$S$	$2 \cdot S$
	$r_{ie}$	$2 \cdot r_i$	$0.5 \cdot r_i$
Сопротивление нагрузки, приведенное между анодами ламп $Z_{Lpp}$		$Z_L \cdot n^2$	$Z_L \cdot n^2$
Сопротивление нагрузки, приведенное к аноду лампы плеча $Z_{Lp}$		$n^2 \cdot 0.5 \cdot Z_L$	$n^2 \cdot 2 \cdot Z_L$

Для удобства сравнения характеристик выходных каскадов разных типов их основные параметры сведены в таблице 3. Все параметры нормированы относительно обычного однотактного выходного каскада. Предполагается, что все каскады работают в классе «А», и конечно, в них используется один тип лампы.

Тип каскада	$\mu_e$	$S_e$	$r_{ie}$	$P_{OUT}$
Однотактный	1	1	1	1
Двухтактный	1	2	0.5	2
Accordion	2	1	2	2
Симметричный последовательный	2	1	2	2
Симметричный параллельный	1	2	0.5	2

### Применение однотактных симметричных каскадов

Выбор типа каскада во многом зависит от используемых ламп. Для выходных ламп с относительно большим выходным сопротивлением и высоким  $\mu$  целесообразно использовать параллельный каскад. Для мощных выходных триодов может быть целесообразным использование последовательного каскада. Так как в этом случае  $\mu_e$  равно двум, это облегчает возбуждение выходных ламп. В симметричных однотактных каскадах можно с успехом использовать стандартные выходные трансформаторы, предназначенные для однотактных каскадов.

Небольшая модификация последовательного каскада, показанная на рисунке 14, позволяет улучшить его общие параметры. Перенос выходных обмоток и нагрузки в цепи катодов ламп дает следующие преимущества:

Во-первых, возрастает общая индуктивность намагничивания, так как последовательно с первичной обмоткой дополнительно включается выходная. Выходной трансформатор становится автотрансформатором, что в общем случае, позволяет уменьшить его габариты.

Во вторых, в каскаде появляется местная катодная обратная связь со всеми вытекающими из этого последствиями.

В третьих, в этой схеме можно использовать стандартные трансформаторы без дополнительной обмотки.

Конечно, используя стандартные трансформаторы, мы не можем произвольно регулировать глубину этой обратной связи, но зато она бесплатная. Здесь очень перспективно использование трансформаторов с большим количеством отводов на вторичной обмотке, тогда катоды ламп подключаются к самому высокоомному отводу, а нагрузка, в зависимости от сопротивления, к одноименным промежуточным отводам.

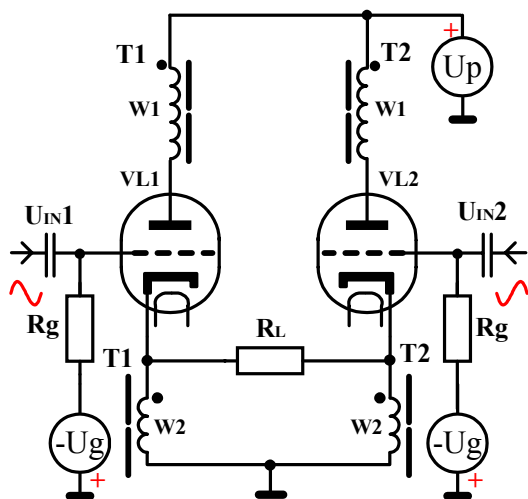


Рисунок 14

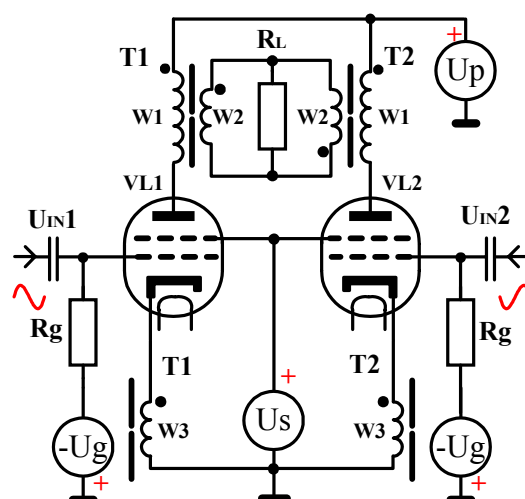


Рисунок 15

В этой схеме постоянная составляющая напряжения к нагрузке практически не прикладывается. Это обусловлено низким активным сопротивлением выходных обмоток (единицы - доли Ома) и небольшой величиной тока разбаланса. Практически, значение постоянной составляющей, приложенной к  $R_L$ , не превышает  $5 \div 15$  mV.

Еще одним побочным результатом такого включения нагрузки является симметричный дифференциальный выход, собственно говоря, последовательный каскад позволяет получить дифференциальный выход и при базовом включении выходных обмоток.

Как было сказано выше, в симметричных каскадах можно использовать любые типы ламп и вводить любые типы местных обратных связей. В качестве примера на рисунке 15 показано включение



пентодов с катодной обратной связью, а на рисунках 16 и 17 - использование ультралинейного и комбинированного включения пентодов (лучевых тетродов), соответственно [8], [9].

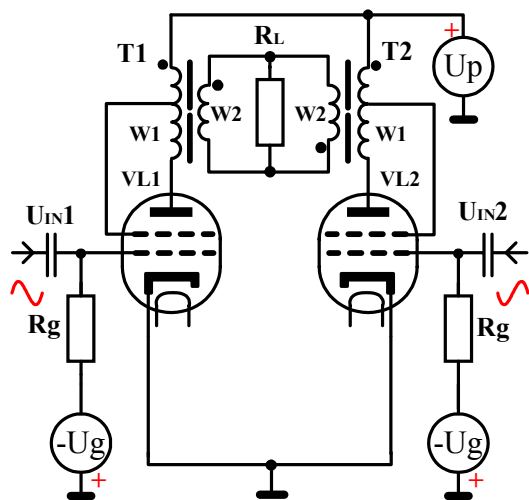


Рисунок 16

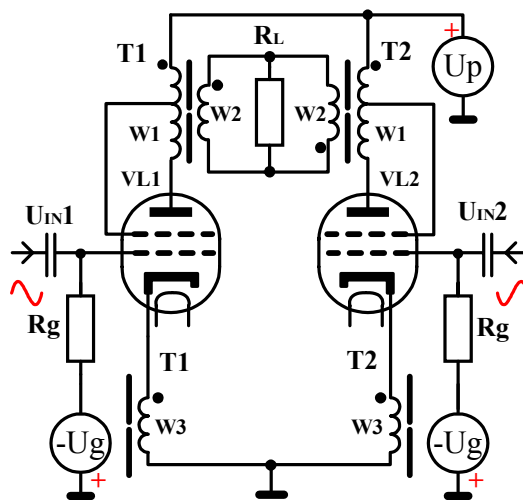


Рисунок 17

Применение пятиэлектродных ламп позволит еще более повысить линейность каскада за счет выбора оптимальной глубины местной обратной связи.

### Практические результаты

Проверка теоретических предположений проводилась на трех макетах, собранных по схемам, показанным на рисунках 10, 11 и 14. За базовую была принята схема, показанная на рисунке 1, во всех случаях использовались одни и те же лампы и выходные трансформаторы. Сопротивление нагрузки и режим ламп выбирался, исходя из получения минимального уровня гармоник при заданной мощности. Численные результаты измерений приведены в таблице 4, а спектры выходного сигнала на рисунках 18, 19, 20, 21 соответственно.

Таблица 4

Схема	Однотактная		Симметричная последовательная		Симметричная параллельная		Симметричная с катодной связью		
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Гармонические составляющие	1	1820 mV	100%	4060mV	100%	2780mV	100%	4060mV	100%
	2	90.4 mV	4.96%	4.94mV	0.121%	8.24mV	0.29%	0.81mV	0.019%
	3	6.68 mV	0.36%	19.1mV	0.47%	12.4mV	0.44%	17.4mV	0.42%
	4	1.46 mV	0.08%	0.55mV	0.013%	0.86mV	0.03%	0.17mV	0.004%
	5	0.34 mV	0.018%	0.6mV	0.014%	0.4mV	0.014%	1mV	0.024%
	6	0.3 mV	0.016%	0.135mV	0.003%	0.392mV	0.014%	0.18mV	0.0044%
	7	0	0	0.127mV	0.003%	0.13mV	0.0046%	0	0
THD	4.96%		0.486%		0.53%		0.43%		
P <sub>OUT</sub> (W)	1		2		2		2		

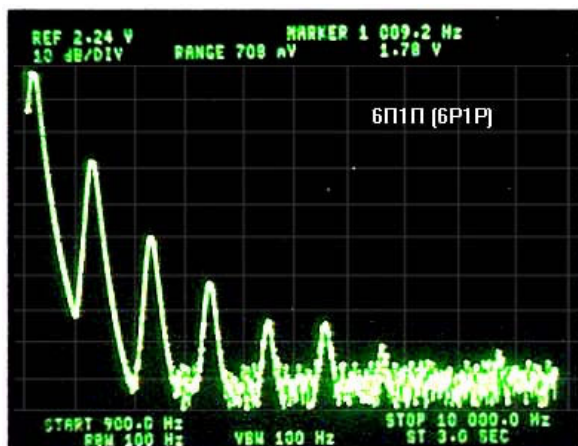


Рисунок 18

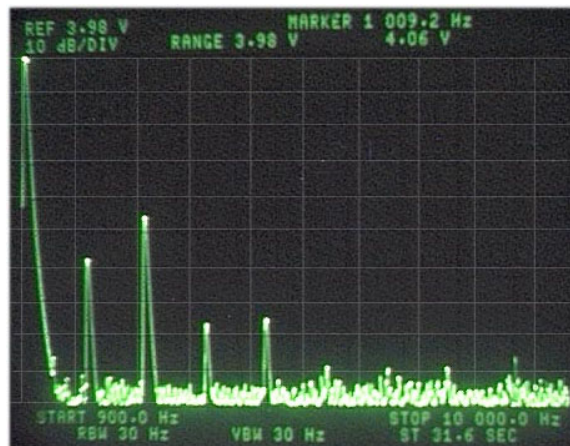


Рисунок 19

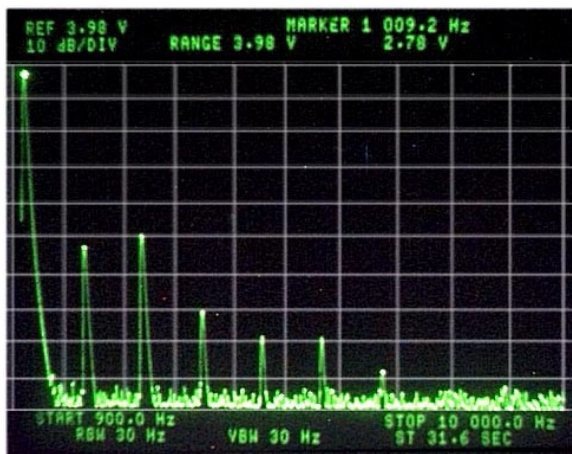


Рисунок 20

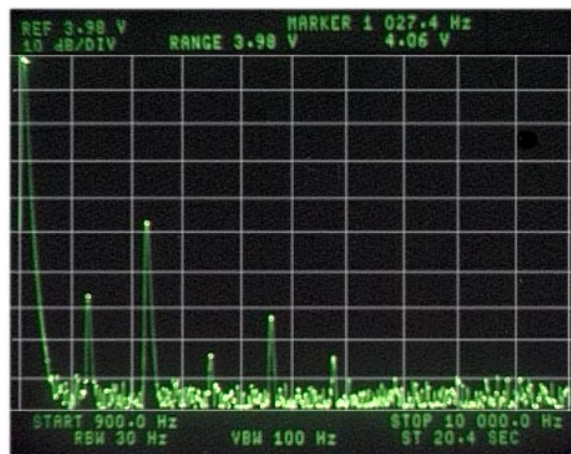


Рисунок 21

Полученные результаты в полной мере подтвердили справедливость теоретических предположений. Как Вы видите, даже использование случайно выбранных ламп и трансформаторов позволяет резко снизить уровень четных гармоник и повысить линейность каскада. Наилучшие результаты, как и предполагалось, обеспечивает каскад, охваченный местной обратной связью. Кроме понижения общего уровня гармонических составляющих, за счет нивелирования разброса параметров ламп удастся обеспечить лучшую симметрию каскада. Соответственно, это выражается в более глубоком подавлении четных гармоник.

Из приведенных результатов видно, что спектр выходного сигнала симметричного каскада подобен спектру обычного двухтактного каскада, преобладающими становятся нечетные гармоники. Но относительно малый уровень нечетных гармоник позволяет их эффективно подавлять местными обратными связями.

Попутно хочу сделать одно замечание. Как показала практика, местные обратные связи, в большинстве случаев, оказывают благотворное влияние, и я рекомендую их использовать для повышения линейности и стабилизации режима работы выходных и драйверных каскадов.

## Литература

1. R.W. Landee, D. C. Davis, A.P. Albrecht, Electronic designers' handbook, 1957.
2. Е.В. Карпов, [Использование трансформаторов типа ТВЗ](#), NexTube, 2002.
3. [Inverse Complementary Distortion Cancellation](#), GlassWare, 2001.
4. Г.В. Войшвилло, Усилители низкой частоты на электронных лампах, Связьиздат, 1963.
5. Т.Н. Вильямсон, П.Д. Волкер, [Преувеличения и Усилители](#), 1955.
6. F.H. McIntosh, Wide-Band amplifier coupling circuit, US Patent [2,477,074](#)
7. Л.А. Бессонов, Теоретические основы электротехники, М.: Высш. Школа, 1978
8. D. Hafler, H.I. Keroes, Ultra Linear Amplifiers, US Patent [2,710,312](#)
9. Menno van der Veen, [Новые схемы двухтактных ламповых усилителей мощности](#), 1999.