

Исследование усилителя мощности радиочастотных колебаний с многофазным возбуждением

В настоящее время при построении вещательных и связанных радиопередатчиков по-прежнему актуально получение достаточно больших мощностей в диапазонах частот до 120 МГц, что требует обеспечения высокой энергетической эффективности тракта усиления мощности. Одним из наиболее известных способов построения высокоэффективных усилителей мощности является суммирование мощности нескольких активных элементов и применение ключевых режимов работы. Описан перспективный способ построения усилителя мощности с резонансной или фильтровой нагрузкой на основе импульсного сложения мощностей с использованием схмотехнического "горячего" резерва от нескольких усилительных приборов. Как показывают инженерные расчеты и натурное макетирование, такой способ построения усилителя мощности применим, как при полупроводниковом, так и при ламповом исполнении мощных каскадов усиления. Немаловажен и фактор высокой надежности усилителя мощности, в состав которого входят несколько поочередно работающих усилительных приборов, развязанных друг от друга временной диаграммой работы выходного каскада, задаваемой многофазным синтезатором радиочастот. Основным материалом статьи является теоретическое исследование оптимальных скважностей работы активных элементов и управляющих импульсов синтезатора радиочастот при импульсном суммировании мощности. Приведены результаты оптимизации скважности импульсов для двухтактной многофазной схемы по двум параметрам: на получение максимальной мощности усилителя, на максимальную чистоту выходного спектра и при их совмещении — на интегральные показатели (высокий КПД и одновременно низкий коэффициент высших гармоник). Для наглядности исследования выполнены двумя способами: спектральным и графическим и показана высокая точность совпадения результатов. Материалы данной статьи могут быть использованы при проектировании высоконадежных необслуживаемых радиопередатчиков с высоким КПД и многократным горячим резервированием диапазонов частот до 120 МГц.

Ключевые слова: импульсное суммирование мощности, многофазные ключевые каскады передатчиков.

Комаров С.Н., академик Международной академии связи, генеральный директор ООО "Радиовещательные технологии", старший преподаватель кафедры "Радиооборудование и схмотехника" МТУСИ, komarov@radiostation.ru

Морозова А.П., студентка магистратуры МТУСИ, shmasya@gmail.com

Для получения высокой мощности и одновременного увеличения надежности выходных каскадов, что особенно актуально для необслуживаемых радиопередатчиков работающих в отдаленных районах, предлагается принцип импульсного суммирования мощности. То есть, в выходном каскаде передатчика работают поочередно несколько активных элементов в импульсном режиме, отдавая в нагрузку импульсную мощность, которая в несколько раз превышает непрерывную, допустимую для данного активного элемента. И если использовать поочередную работу стольких активных элементов, какова скважность их работы, то мы получим в нагрузке непрерывную мощность, равную импульсной мощности отдельного активного элемента. То есть в выходном каскаде реализуется временное (импульсное) суммирование мощности.

Побочным эффектом такого принципа суммирования является многократное увеличение надежности самого мощного каскада передатчика, где наиболее вероятны отказы. При выходе из строя одного или нескольких активных элементов общая мощность передатчика уменьшается на долю, которую отдавали в нагрузку эти активные элементы. А сам передатчик остается работоспособным. То есть, имеет место линейная зависимость выходной мощности неисправного радиопередатчика от числа оставшихся в работе активных элементов. Что сильно превосходит схемы выходных каскадов с непрерывным аналоговым суммированием мощности, где при выходе из строя одного активного элемента мощность передатчика падает в 4 раза.

Схема такого выходного каскада может быть реализована как на лампах, так и на транзисторах. При получении

больших мощностей, к примеру, в радиовещательных передатчиках имеет смысл рассмотреть работу выходного каскада с импульсным суммированием мощности на радиолампах, специально спроектированных для импульсной работы.

Возможно построение многофазных схем выходных каскадов как по однотактному, так и по двухтактному принципу.

Детальное изложение принципов многофазного суммирования мощности приведено на примере двухтактной двухфазной схемы (рис. 1), где рядом показаны основные временные зависимости. Возбуждение к такому каскаду поступает от синтезатора радиочастот в виде четырех последовательностей прямоугольных импульсов, сдвинутых по фазе относительно друг друга на половину периода выходной частоты. Импульсы анодных токов ламп питают выходной колебательный контур попеременно, чем обеспечивается работа на нагрузку четырех активных элементов в импульсном режиме, причем каждый из них работает со скважностью около четырех.

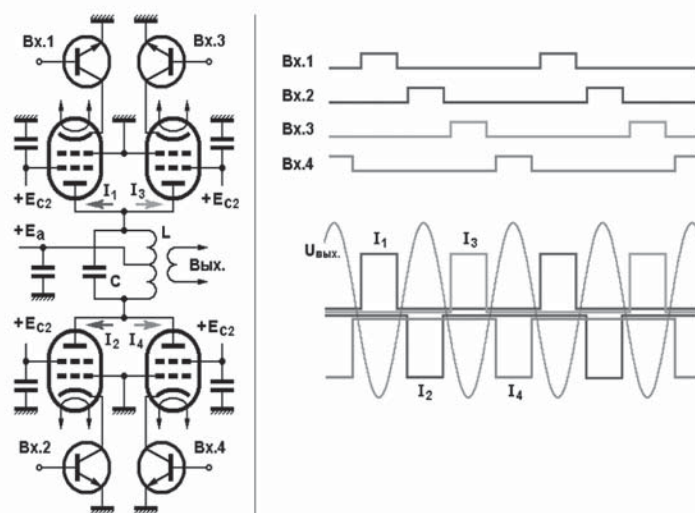


Рис. 1. Двухфазная двухтактная схема

При возбуждении контура *прямоугольными* импульсами осциллограммы выходных импульсных токов выглядят так (рис. 2). Форма одного импульса описывается нижеследующим уравнением, исходя из условия равенства площадей синусоиды за половину периода и прямоугольника за длительность импульса τ :

$$\int_0^{\tau} \sin x dx = I_1 \times \tau \quad (1)$$

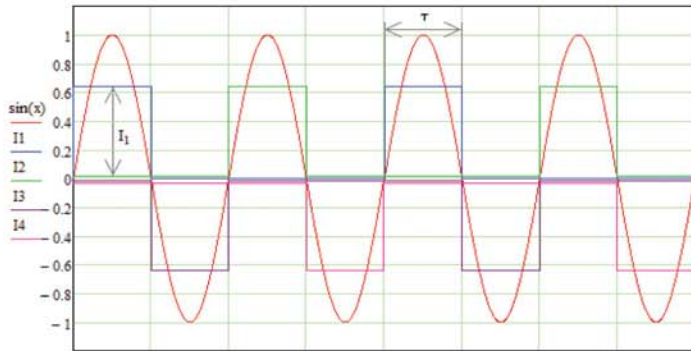


Рис. 2. Осциллограммы токов при возбуждении контура прямоугольными импульсами

Как видно из осциллограмм выходных токов, скважность импульсов $Q = 4$ (для каждой лампы).

Спектр полученных прямоугольных импульсов очень широкий, так как большая часть энергии уходит на создание высших гармоник. Для увеличения КПД передатчика и улучшения чистоты спектра его выходного сигнала необходимо, чтобы как можно большая энергия тратилась на первую гармонику. Этого можно добиться проведя оптимизацию длительности возбуждающих импульсов и перейти от прямоугольной формы к ступенчатой. Поиск оптимального значения будет вестись при возбуждении контура именно *ступенчатыми* импульсами (рис. 3) путем изменения значения скважности Q .

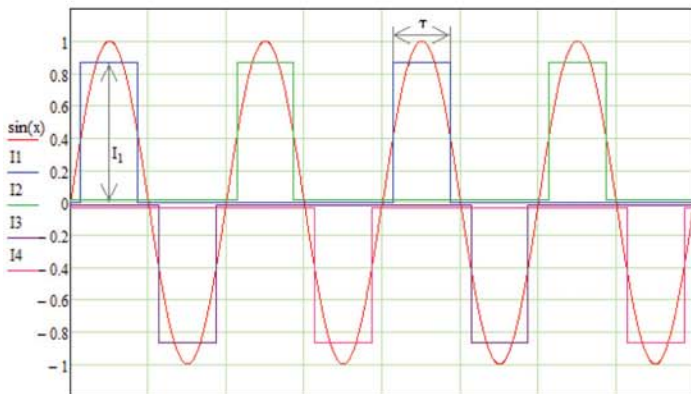


Рис. 3. Осциллограммы токов при возбуждении контура ступенчатыми импульсами

Первый вариант оптимизации (спектральный)

Для проведения оптимизации по чистоте спектра необходимо разложить выходной сигнал на спектральные составляющие. Ступенчатый выходной сигнал можно представить в виде двух противоположных по знаку последовательностей, сдвинутых на половину периода:

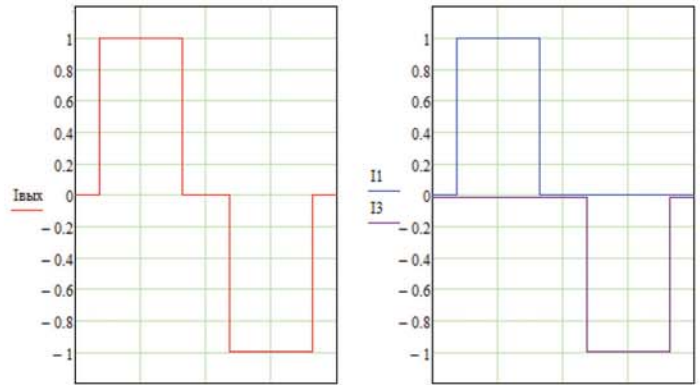


Рис. 4. Представление ступенчатого импульса в виде двух последовательностей

Необходимо разложить первую полученную периодическую последовательность прямоугольных импульсов в комплексный ряд Фурье. За начало отсчета времени взята середина импульса. Пусть длительность импульсов равна τ , период следования импульсов равен T , амплитуда импульсов равна A .

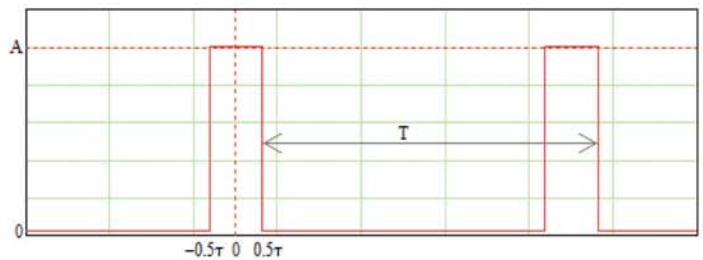


Рис. 5. Последовательность прямоугольных импульсов

Коэффициенты комплексного преобразования Фурье для периодической функции $f(t)$ определяются по формуле:

$$C_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cdot \exp\left(\frac{-2j\pi n t}{T}\right) dt \quad (2)$$

Для последовательности прямоугольных импульсов выражение принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} C_n &= \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} A \cdot \exp\left(\frac{-2j\pi n t}{T}\right) dt = -\frac{2A}{2j\pi n} \exp\left(\frac{-2j\pi n t}{T}\right) \Big|_{-T/2}^{T/2} = \\ &= -\frac{2A}{\pi n} \frac{\exp\left(\frac{-j\pi n \tau}{T}\right) - \exp\left(\frac{j\pi n \tau}{T}\right)}{2j} = \frac{2A}{\pi n} \frac{\exp\left(\frac{j\pi n \tau}{T}\right) - \exp\left(\frac{-j\pi n \tau}{T}\right)}{2j} = \\ &= \frac{2A}{\pi n} \cdot \sin\left(\frac{\pi n \tau}{T}\right) = \frac{2A\tau}{T} \cdot \frac{\sin\left(\frac{\pi n \tau}{T}\right)}{\frac{\pi n \tau}{T}} = \frac{2A\tau}{T} \cdot \text{sinc}\left(\frac{n\tau}{T}\right), \end{aligned} \quad (3)$$

где $\text{sinc}(x)$ – нормированная функция, определяемая следующим соотношением:

$$\text{sinc}(x) = \begin{cases} \frac{\sin(\pi x)}{\pi x}, & x \neq 0 \\ 1, & x = 0 \end{cases} \quad (4)$$

Для первой последовательности нормированные коэффициенты разложения в ряд Фурье (амплитуда $A = 1$), в зависимости от длительности импульса, выглядят так:

$$C'_n(\tau) = \frac{2\tau}{T} \cdot \operatorname{sinc}\left(\frac{n\tau}{T}\right) \quad (5)$$

Вторая последовательность прямоугольных импульсов является отрицательной по отношению к первой и сдвинута относительно неё на половину периода. Тогда выражение для коэффициентов разложения в ряд Фурье будут выглядеть следующим образом:

$$C_n = \frac{2}{T} \int_{-\tau/2}^{\tau/2} A \cdot \exp\left(\frac{-2j\pi n t}{T}\right) dt = -\frac{2A}{2j\pi n} \cdot \exp\left(\frac{-2j\pi n t}{T}\right) \Big|_{(T+\tau)/2}^{(T-\tau)/2} =$$

$$= -\frac{2A}{\pi n} \cdot \frac{\exp\left[\frac{-j\pi n(T+\tau)}{T}\right] - \exp\left[\frac{-j\pi n(T-\tau)}{T}\right]}{2j} =$$

$$= -\frac{2A}{\pi n} \cdot \exp(-j\pi n) \cdot \frac{\exp\left(\frac{j\pi n\tau}{T}\right) - \exp\left(\frac{-j\pi n\tau}{T}\right)}{2j} =$$

$$= \frac{2A}{\pi n} \cdot \exp(-j\pi n) \cdot \frac{\exp\left(\frac{j\pi n\tau}{T}\right) - \exp\left(\frac{-j\pi n\tau}{T}\right)}{2j} =$$

$$= \frac{2A}{\pi n} \cdot \exp(-j\pi n) \cdot \sin\left(\frac{\pi n\tau}{T}\right) =$$

$$= \frac{2A\tau}{T} \cdot \exp(-j\pi n) \cdot \frac{\sin\left(\frac{\pi n\tau}{T}\right)}{\frac{\pi n\tau}{T}} = \frac{2A\tau}{T} \cdot \exp(-j\pi n) \cdot \operatorname{sinc}\left(\frac{n\tau}{T}\right) \quad (6)$$

Для второй последовательности нормированные коэффициенты разложения в ряд Фурье (амплитуда $A = 1$), в зависимости от длительности импульса, выглядят так:

$$C''_n(\tau) = \frac{-2\tau}{T} \cdot \exp(-j\pi n) \cdot \operatorname{sinc}\left(\frac{n\tau}{T}\right) \quad (7)$$

Коэффициенты разложения в ряд Фурье для выходного спектра сигнала представляют собой сумму коэффициентов для двух рассмотренных последовательностей (5,7):

$$C_n(\tau) = C'_n(\tau) + C''_n(\tau) \quad (8)$$

Зная коэффициенты разложения ступенчатого импульса можно рассчитать коэффициент высших гармоник по формуле:

$$K_T = \frac{\sqrt{C_2^2(\tau) + C_3^2(\tau) + \dots + C_n^2(\tau)}}{C_1} \quad (9)$$

А так же можно рассчитать коэффициент g_1 , главным образом определяющий КПД усилителя, т.к. он отражает преобразование постоянной энергии в энергию полезной первой гармоники:

$$g_1 = \frac{C_1}{C_0} \quad (10)$$

Результаты расчетов представлены в виде таблицы, где с помощью изменения длительности импульса в пределах скважности $Q = 3 \dots 9$ (а, следовательно, и необходимой скважности импульсов синтезатора частоты q), получены значения первых двенадцати коэффициентов разложения ступенчатого импульса в ряд Фурье (таблица 1), коэффициент высших гармоник (по первым 11 гармоникам), а так же КПД (табл. 2). Для наглядности представлены графические зависимости коэффициента высших гармоник $K_T(\tau)$, КПД $g_1(\tau)$, кривая оптимизации одновременно и по КПД и по гармоникам (определение максимального раскрыва “глаза”)

$g_1(\tau) - K_T(\tau)$, а так же коэффициента первой гармоники выходного сигнала в зависимости от скважности импульсов Q $C_1(\tau)$ (рис. 6). Предел изменения скважности выбран более широким (оптимальное значение лежит в пределах $Q = 4 \dots 6$) для того, чтобы полностью видеть поведение кривых.

Таблица 1

T	C ₀	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁
1,396	0	0,818	0	0,368	0	-0,087	0	-0,179	0	0	0	0,114
1,478	0	0,858	0	0,339	0	-0,134	0	-0,163	0	0,051	0	0,111
1,571	0	0,9	0	0,3	0	-0,18	0	-0,129	0	0,1	0	0,082
1,676	0	0,946	0	0,249	0	-0,221	0	-0,074	0	0,135	0	0,024
1,795	0	0,995	0	0,184	0	-0,248	0	0	0	0,138	0	-0,05
1,933	0	1,048	0	0,102	0	-0,253	0	0,085	0	0,094	0	-0,108
2,094	0	1,103	0	0	0	-0,221	0	0,185	0	0	0	-0,1
2,285	0	1,158	0	-0,12	0	-0,138	0	0,18	0	-0,107	0	0
2,513	0	1,211	0	-0,249	0	0	0	0,107	0	-0,135	0	0,11
2,793	0	1,254	0	-0,363	0	0,164	0	-0,062	0	0	0	0,04
3,142	0	1,273	0	-0,424	0	0,255	0	-0,182	0	0,141	0	-0,116
3,59	0	1,241	0	-0,332	0	0,11	0	0	0	-0,061	0	0,09
4,189	0	1,103	0	0	0	-0,221	0	0,158	0	0	0	-0,1

Таблица 2

T	Q	Q	K _T	g ₁
1,396	9	4,5	0,529	1,841
1,478	8,5	4,25	0,487	1,823
1,571	8	4	0,438	1,801
1,676	7,5	3,75	0,388	1,774
1,795	7	3,5	0,344	1,742
1,933	6,5	3,25	0,305	1,703
2,094	6	3	0,262	1,654
2,285	5,5	2,75	0,24	1,592
2,513	5	2,5	0,266	1,514
2,793	4,5	2,25	0,326	1,411
3,142	4	2	0,438	1,273
3,59	3,5	1,75	0,295	1,086
4,189	3	1,5	0,262	0,827

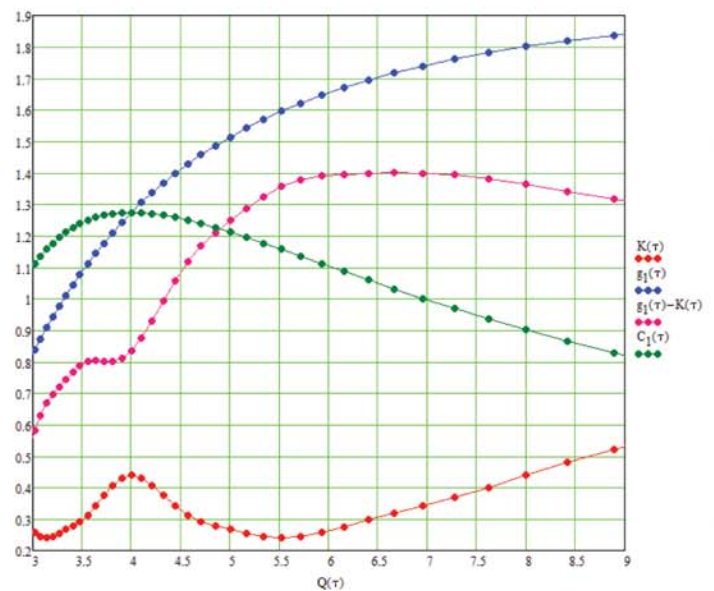


Рис. 6. Зависимости исследуемых параметров от скважности импульсов

Из графиков видно, что кривая коэффициента высших гармоник $K_T(\tau)$ имеет минимум в диапазоне $Q = 5 \dots 6$. Этот минимум - оптимальное значение скважности для достижения максимальной чистоты спектра. Точное значение скважности можно определить, приравняв к нулю первую производную:

$$\frac{d}{d\tau} K_r(\tau) = 0 \quad (11)$$

При этом длительность импульса равна $\tau = 2,265$. Тогда оптимальная скажность Q :

$$Q = 2T/\tau = 4\pi / 2,265 = 12,566 / 2,265 = 5,549 \quad (12)$$

Оптимальная скажность импульсов для синтезатора частоты q в этом случае составляет:

$$q = T/\tau = 2\pi / 2,265 = 6,283 / 2,265 = 2,774 \quad (13)$$

Осциллограммы выходных токов при полученной скажности:

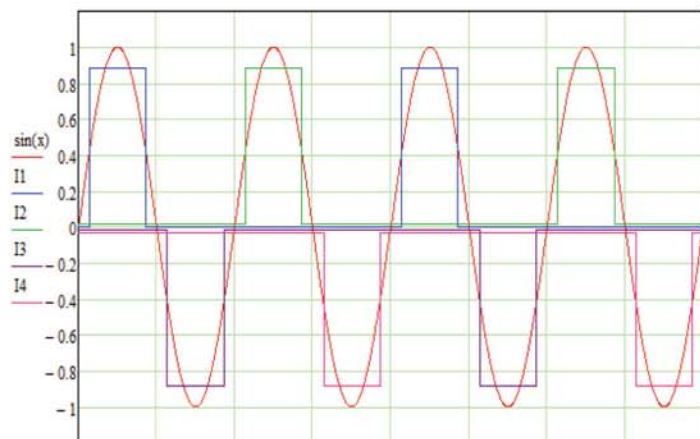


Рис. 7. Осциллограммы токов при скажности, оптимизированной на чистоту спектра

Если при проектировании усилителя стоит задача получения максимальной *мощности*, то необходимо ориентироваться на кривую изменения первой гармоники ступенчатого импульса $S_1(\tau)$ в зависимости от скажности. Максимум первой гармоники достигается при значении скажности $Q = 4$ (Однако при этом имеет место и максимум побочных гармонических составляющих в спектре сигнала). Это и есть оптимальное значение для решения поставленной задачи. При этом синтезатор частоты должен выдавать последовательности импульсов со скажностью $q = 2$. Осциллограммы выходных импульсных токов будут выглядеть так же, как при возбуждении контура прямоугольными импульсами (рис. 2).

Если при проектировании усилителя стоит задача получения одновременно высоких *КПД* и *чистоты спектра*, то необходимо найти значение скажности, при которой достигается максимальный раскрыв “глаза” между двумя кривыми K_r и g_1 . Для наглядности на графике (рис.6) приведена кривая разности $g_1 - K_r$, максимум которой и указывает на оптимальное значение скажности в этом случае. Однако максимум является достаточно плоским и лежит в диапазоне скажности $Q = 6...7,25$. Точное значение пика можно определить, взяв производную:

$$\frac{d}{d\tau} [g_1(\tau) - K_r(\tau)] = 0 \quad (14)$$

При этом длительность импульса равна $\tau = 1,852$. Тогда оптимальная скажность Q :

$$Q = 2T/\tau = 4\pi / 1,852 = 12,566 / 1,852 = 6,785 \quad (15)$$

Оптимальная скажность импульсов для синтезатора частоты q в этом случае составляет:

$$q = T/\tau = 2\pi / 1,852 = 6,283 / 1,852 = 3,393 \quad (16)$$

Осциллограммы выходных импульсных токов:

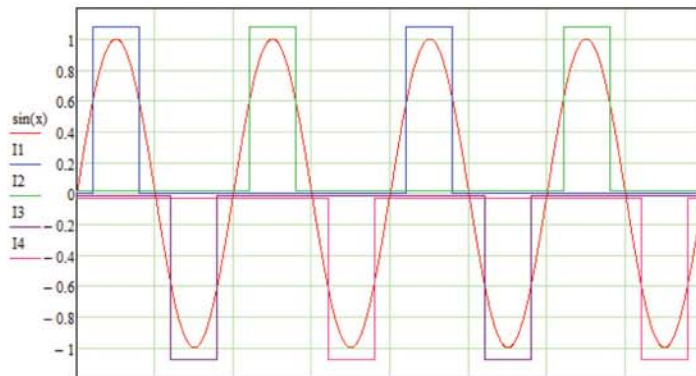


Рис. 7. Осциллограммы токов при скажности, оптимизированной одновременно на высокий КПД и минимальный коэффициент высших гармоник

Второй вариант оптимизации (графический)

Графически определить длительность импульса, при которой достигается минимум коэффициента высших гармоник, можно определить при помощи сведения трех «крайних» выступающих площадей за четверть длительности синусоиды к минимуму (рис. 8). Так как площадь, выступающая за пределы синусоиды, вызывает появление дополнительных составляющих в выходном спектре сигнала. Математически форма импульса описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \int_0^{\pi} \sin x dx = I_1 \cdot \tau \\ y = (\pi - \tau)/2 \\ \sin z = I_1 \end{cases} \quad (17)$$

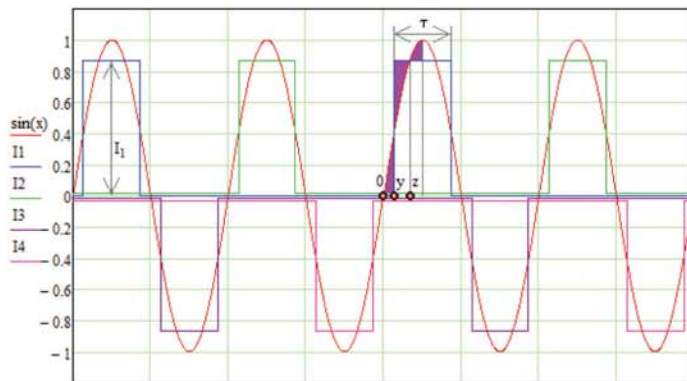


Рис. 8. Графический способ нахождения минимума коэффициента высших гармоник

Сумма S указанных на рис. 8 трех площадей в зависимости от значения y и z математически описывается следующим образом (с учетом (17)):

$$S(y,z) = \int_0^{\pi} \sin(x) dx + [I_1 \cdot (z - y) - \int_0^z \sin(x) dx] + \left[\int_0^{\pi/2} \sin(x) dx - I_1 \cdot (\pi/2 - z) \right] \quad (18)$$

Построив на объемном графике данную зависимость можно, путем уточнения диапазона изменения y и z , определить минимум. Рядом, для удобства показана карта уровней поверхности, соответствующей выбранному диапазону из-

менения переменных. Этот способ является более наглядным, чем представление результатов в таблицах. Изначально переменные изменяются в пределах от 0 до $\pi/2$ (четверть синусоиды). Черным на рис. 9 показана область минимума.

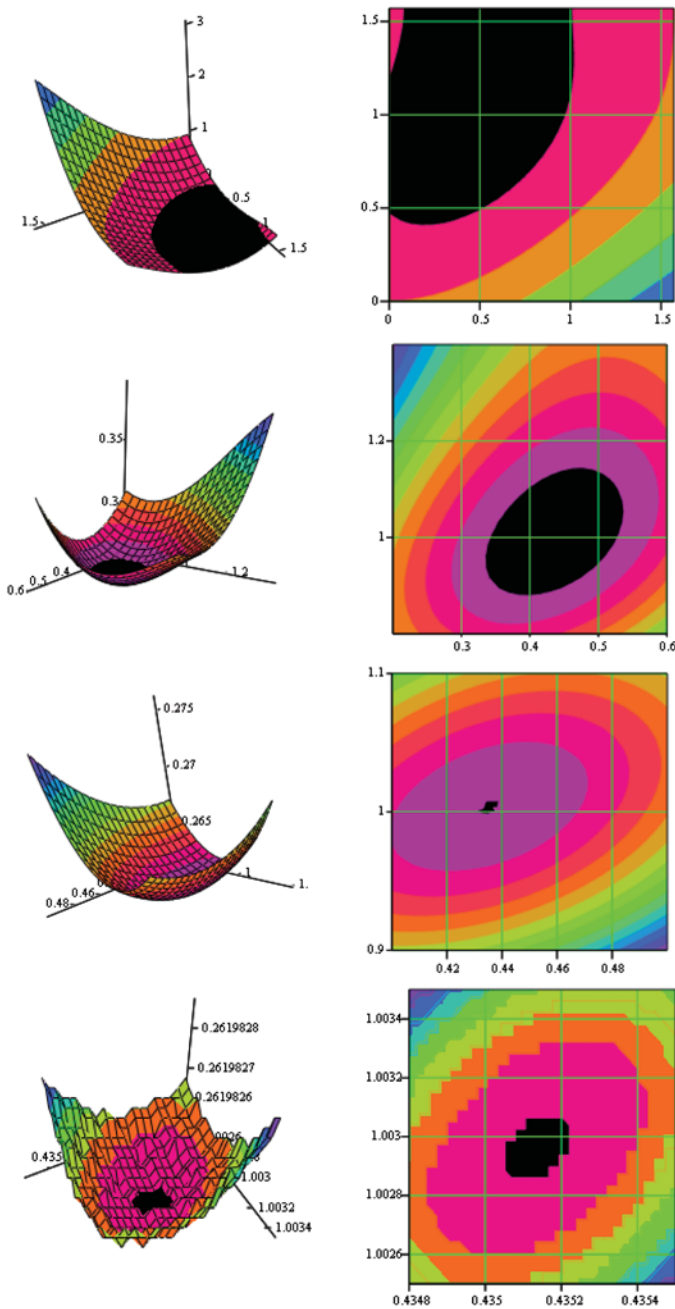


Рис. 9. Объемная зависимость выступающих площадей от переменных y и z и карта уровней поверхности для определения минимума значения $plo(y,z)$

Минимальное значение площади достигается при значениях:

$$y = 0,4351; z = 1,000295.$$

При этом длительность импульса τ , скважность Q и скважность импульсов синтезатора q будут равны:

$$\tau = \pi - 2y = 3,1416 - 0,8702 = 2,2714 \quad (19)$$

$$Q = 2T/\tau = 4\pi / 2,2714 = 12,566 / 2,2714 = 5,5324 \quad (20)$$

$$q = T/\tau = 2\pi / 2,2714 = 6,283 / 2,2714 = 2,766 \quad (21)$$

Полученное значение скважности импульса отличается от оптимального значения, рассчитанного при помощи разложения выходного сигнала на спектральные составляющие (12) и (13) на 0,3%.

Осциллограммы выходных импульсов токов будут совпадать с представленными на рис. 7.

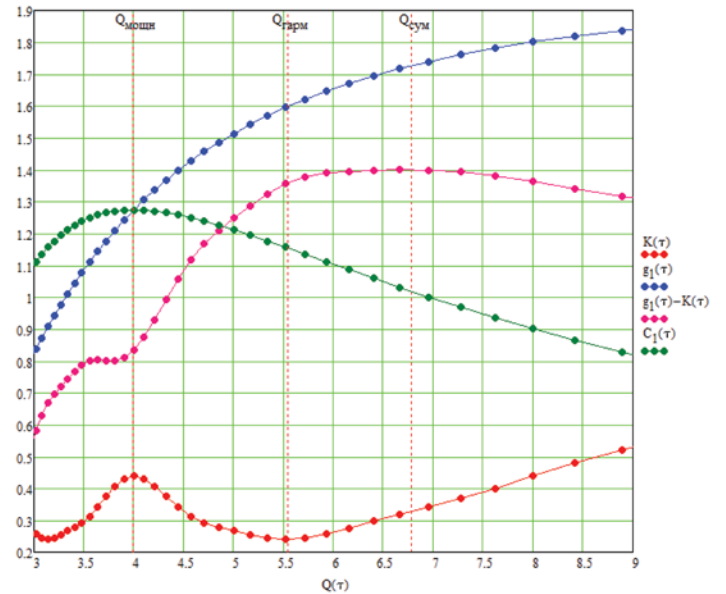


Рис. 10. Зависимости исследуемых параметров с отметками скважности импульсов, оптимизированной на решение трех разных задач

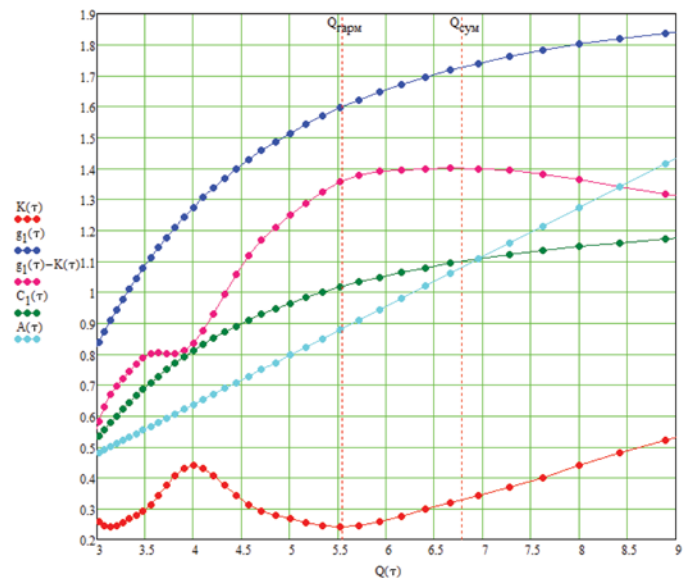


Рис. 11. Зависимости от изменения длительности импульса при сохранении постоянной его амплитуды

Если же считать постоянной энергию импульса (произведение амплитуды импульса на его длительность) и с увеличением скважности позволить амплитуде импульса увеличиваться (что имеет место для реальных импульсных усилительных элементов), то график составляющей первой гармоники пойдет иначе и с ростом скважности будет увеличиваться КПД, но будет ухудшаться чистота спектра выходного сигнала.

Литература

1. *Комаров С.* Средневолновый радиовещательный синтезатор частоты // Радио, 2012. №9. – С. 19-22; №10. – С. 21-23.
2. *Комаров С.Н., Тертышников А.В.* Разработка и исследование многофазных синтезаторов радиочастот с мощным выходом // VII отраслевая научная конференция «Технологии информационного общества» / Программа научно-методических секций. – М.: МТУСИ, 2013.
3. *Комаров С.Н., Морозова А.П.* Исследование усилителя мощности радиочастотных колебаний с многофазным возбуждением // Труды северо-кавказского филиала московского технического университета связи и информатики. – Ростов-на-Дону: СКФ МТУСИ, 2013.
4. *Комаров С.Н.* Маломощный радиовещательный передатчик на базе синтезатора. – С.9-1449-1800. <http://www.cqf.su/technics5-2a.html>, www.cqf.su/technics5-2b.html, www.cqf.su/technics5-2c.html.
5. *Комаров С.Н.* Генератор двух образцовых частот для синтезаторов радиовещательных передатчиков // Радио, 2014, №6. – С. 23-25.

Research of the amplifier of power of radio-frequency fluctuations with multiphase excitement

Komarov S.N., Academician of the International Telecommunication Academy, Director of the Radio Broadcasting technologies Ltd, "Radio Equipment and Circuitry" chair MTUCI, komarov@radiostation.ru
Morozova A.P., student of a magistracy of MTUCI, e-mail: shmasya@gmail.com

Abstract

Now at creation of broadcasting transmitters still actually receiving enough big capacities that demands ensuring high power efficiency of a path of strengthening of power. One of the most known ways of creation of highly effective amplifiers of power is application of key operating modes. In the report the perspective way of creation of the amplifier of power is discussed with resonant or filter loading on the basis of pulse addition of capacities from several intensifying devices. As show engineering calculations and natural prototyping, such way of creation of the amplifier of power is applicable, both at semiconductor, and at lamp execution of powerful cascades of strengthening. The factor of high reliability of the amplifier of power into which structure enter a little serially working intensifying devices is important also. As results of optimization of porosity of impulses are presented in the report for the duple multiphase scheme on obtaining the maximum power of the amplifier, on the maximum purity of an output range and on integrated indicators (high efficiency and at the same time low coefficient of high harmonicas).

Keywords: pulse summation of power, multiphase key cascades of transmitters.

References

1. *Komarov S.N.* Medium wave broadcast frequency synthesizer / Radio, 2012. No9. pp. 19-22; No10. pp. 21-23.
2. *Komarov S.N., Tertyshnikova A.V.* Development and research of multi-phase radio frequency synthesizer with a powerful output / VII Industrial Scientific Conference "Information Society Technologies" / program of scientific and methodological sections. Moscow: MTUCI, 2013.
3. *Komarov S.N., Morozov A.P.* Investigation of RF power amplifier with multi-phase oscillation excitation / Proceedings of the North Caucasian branch of the Moscow Technical University of Communications and Informatics. Rostov-on-Don, 2013.
4. *Komarov S.N.* Low-power broadcasting transmitter based synthesizer. P.9-1449-1800. <http://www.cqf.su/technics5-2a.html>, www.cqf.su/technics5-2b.html, www.cqf.su/technics5-2c.html.
5. *Komarov S.N.* Two model generator frequency for the synthesis of tori / Radio broadcast transmitters, 2014, No6. pp. 23-25.