

ФОРМИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСОВ ОПТИМАЛЬНОЙ СКВАЖНОСТИ ДЛЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ МНОГОФАЗНЫХ ВЫХОДНЫХ КАСКАДОВ ПЕРЕДАТЧИКОВ

Комаров Сергей Николаевич,
генеральный директор
ООО "Радиовещательные технологии",
Москва, Россия,
komarov@radiostation.ru

Ключевые слова: схемотехника,
передатчик, скважности входных импульсов.

При построении мощных (десятки, сотни киловатт) высоконадежных радиопередатчиков НЧ, СЧ и ВЧ диапазонов с использованием многофазного принципа сложения мощности активных элементов необходимо обеспечить оптимальную скважность работы каждого. Это достигается с помощью формирования фазовой диаграммы в предварительном каскаде, представляющем собой мощный формирователь возбуждающих импульсов [1]. Помимо очередности работы активных элементов, необходимо также задать длительность работы каждого активного элемента выходного каскада на выходную колебательную систему. Обе эти задачи решаются с помощью распределителя и формирователя мощных импульсов оптимальной скважности.

Рассматриваются совместно как энергетика возбуждающих импульсов, так и цифровая схемотехника оптимального построения распределителей и формирователей импульсов.

Для определения коэффициентов разложения по постоянной составляющей и по первой гармонике были использованы таблицы коэффициентов разложения плоского импульса. Поскольку длительность фронта невелика относительно длительности импульса, и представляет собой нарастающую экспоненту заряда емкости, то ее аппроксимация косинусоидой при близких значениях верхнего и нижнего углов отсечки не вносит сколько-нибудь значительной погрешности. Данное положение позволило воспользоваться в энергетических расчетах таблицами коэффициентов разложения плоских косинусоидальных импульсов.

В заключении сделаны выводы, а энергетические параметры для импульсов оптимальных скважностей сведены в таблицу.

Для цитирования:

Комаров С.Н. Формирование импульсов оптимальной скважности для возбуждения многофазных выходных каскадов передатчиков // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2016. – Том 10. – №11. – С. 29-33.

For citation:

Komarov S.N. Formation of an optimal duty cycle for driving the multi-phase output stages of transmitters. T-Comm. 2016. Vol. 10. No.11. Pp. 29-33. (in Russian)

Помимо очередности работы активных элементов, необходимо задать длительность работы каждого активного элемента выходного каскада на выходную колебательную систему. Обе эти задачи решаются с помощью распределителя и формирователя мощных импульсов оптимальной скважности.

Как было показано в [2] диапазон оптимальных скважностей работы активных элементов при двухфазной диаграмме и при сохранении постоянной энергии импульса (при постоянной мощности, отдаваемой каждым активным элементом) лежит в пределах от 5 до 7 (рис. 1).

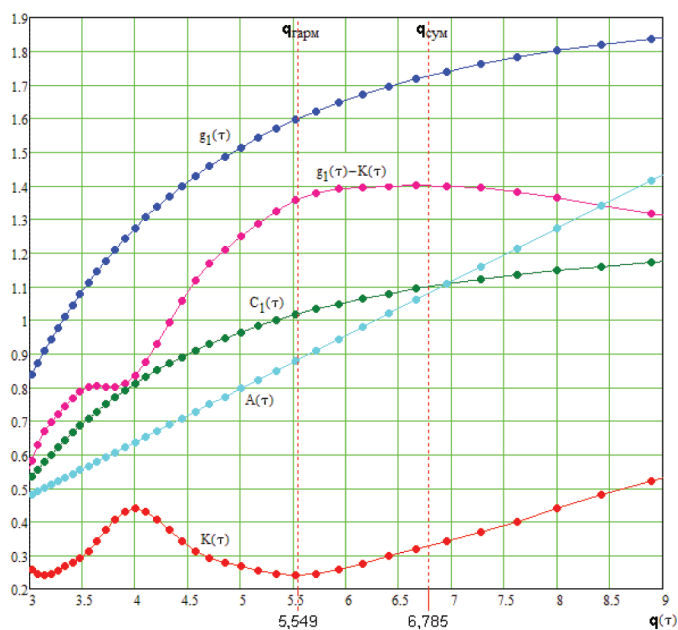


Рис. 1

Особый интерес представляют два значения оптимальной скважности $q(\tau)$:

5,549 – соответствующее максимальной чистоте спектра выходного сигнала, позволяющее строить передатчики с жесткими требованиями по электромагнитной совместимости при относительно простой схеме выходной фильтрующей системы;

6,785 – соответствующее максимальному КПД при весьма хорошей чистоте спектра выходного сигнала.

При этом скважность импульсов, возбуждающих выходную колебательную систему будет в число фаз меньше $q_{кк} = q(\tau)/2$. При двухтактном возбуждении и, соответственно, при симметричной выходной колебательной системе, приведенное оптимальное значение $q_{кк}$ будет относиться к каждому плечу схемы, а распределитель импульсов должен обеспечить поочередную работу групп активных элементов каждого плеча схемы.

При скважности $q(\tau) \geq 7$ энергия первой гармоники в импульсе становится весьма малой, и дальнейшее увеличение КПД является лишь теоретическим в математической модели, не учитывающей потери в проводниках и паразитные процессы в выходном каскаде передатчика при протекании импульсных токов больших амплитуд через выводы активных элементов.

Рассматриваются совместно как энергетика возбуждающих импульсов, так и цифровая схемотехника оптимального построения распределителей и формирователей импульсов.

Энергетика. На рисунке 2 показана диаграмма импульсов для двухтактной схемы выходного каскада и отдельно изображена форма реального импульса с учетом длительности фронта и спада.

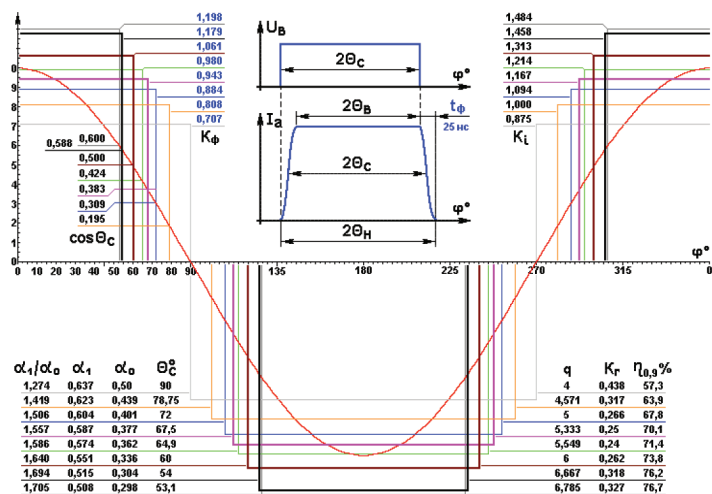


Рис. 2

В реальной схеме передатчика (при использовании в распределителе импульсов ЦИС ТТЛШ 530JA12 и ключевых транзисторов серии IRL500) длительности фронта и спада приблизительно одинаковы и составляет от 15 до 25 нс в зависимости от длины, формы и сечения проводника, соединяющего выход формирователя импульсов со входом возбуждения активного элемента выходного каскада. На рисунке 2 изображен худший случай, 25 нс.

Приведенный рисунок 2 выполнен как наглядная справочная таблица для определения параметров возбуждающих импульсов в зависимости от скважности q :

$4 - q_{кк} = q(\tau)/2 = 4/2 = 2$ – меандр, приведен как отправная точка для сравнения с остальными длительностями возбуждающих импульсов.

$4,571 -$ величина $q = 64/14 = 4,571$, при которой нормируется значение импульсного тока анода для импульсных (так называемых «токовых») лучевых тетродов и металлокерамических тетродов (к примеру, один из экспериментов ставился с применением мощных нувисторов 6ПЗ7Н-В). Относительно тока, при нормируемом значении скважности, рассчитывается коэффициент использования тетрода по току K_i .

$5 - q_{кк} = q(\tau)/2 = 5/2 = 2,5$ – такие импульсы удобно получать схемотехнически, используя в качестве формирователя счетчик по модулю 5.

$5,333 - q_{кк} = q(\tau)/2 = 5,333/2 = 2,666$ – такие импульсы удобно получать схемотехнически, используя в качестве формирователя счетчик по модулю 8 и дешифрируя для импульса возбуждения три из восьми его тактов: $q_{кк} = 8/3 = 2,666$.

$5,549 - q_{кк} = q(\tau)/2 = 5,549/2 = 2,7745$ – оптимальное значение длительности возбуждающих импульсов из расчета минимальной величины высших гармоник.

$6 - q_{кс} = q(\tau)/2 = 6/2 = 3$ – такие импульсы удобно получать схемотехнически, используя в качестве формирователя счетчик по модулю 3 или 6.

$6,667 - q_{кс} = q(\tau)/2 = 6,667/2 = 3,333$ – такие импульсы удобно получать схемотехнически, используя в качестве формирователя десятичный счетчик и дешифрируя для импульса возбуждения три из десяти его тактов: $q_{кс} = 10 / 3 = 3,333$.

$6,785 - q_{кс} = q(\tau)/2 = 6,785/2 = 3,3925$ – оптимальное значение скважности, при котором достигается максимальный КПД при приемлемом коэффициенте высших гармоник.

Дальнейшее увеличение скважности и, как следствие, увеличение относительной доли фронтов в длительности импульса, приводит к резкому уменьшению КПД в диапазоне ВЧ. Также на уменьшение КПД при увеличении скважности более 7 оказывает влияние индуктивное сопротивление проводника, соединяющего выход формирователя импульсов возбуждения со входом выходного каскада, которое растет с уменьшением длительности возбуждающего импульса. В диапазонах НЧ и СЧ эти явления ослаблены в соотношении частот раз.

Для определения коэффициентов разложения по постоянной составляющей и по первой гармонике были использованы таблицы коэффициентов разложения плоского импульса, приведенные в [7]. Поскольку длительность фронта невелика относительно длительности импульса, и представляет собой нарастающую экспоненту заряда емкости (см. рис. 2), то ее аппроксимация косинусоидой при близких значениях верхнего и нижнего углов отсечки не вносит сколько-нибудь значительной погрешности. Данное положение позволило воспользоваться в энергетических расчетах таблицами коэффициентов разложения плоских косинусоидальных импульсов.

Схемотехника.

Двухфазные формирователи возбуждающих импульсов.

Вариант формирователя импульсов со скважностью $q = 5$ (Рис. 3) применен в двухфазном средневолновом синтезаторе радиочастот С9-1449-1800 [3]:

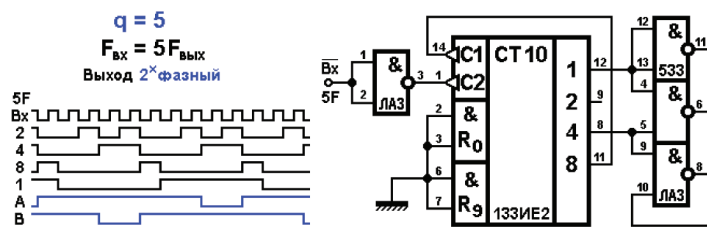


Рис. 3

Схема проста, работает надежно до входной частоты 10 МГц, однако у нее есть недостаток: в ней используется устаревшая ЦИС ТТЛ 133IE2, которая не рекомендована для перспективных разработок.

Вариант формирователя импульсов с $q = 5,333$ (рис. 4). Устройство позволяет формировать импульсы возбуждения как для одноктактной двухфазной схемы выходного каскада передатчика, так и для двухтактной однофазной. Переключение режима работы осуществляется перепайкой перемычек П1 на плате.

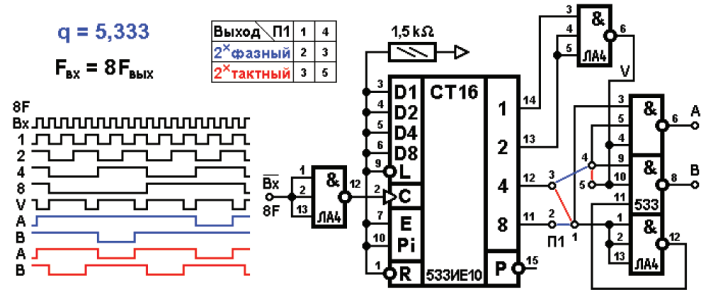


Рис. 4

Помимо достоинств, простоты и многорежимности, у данной схемы имеется и недостаток:

даже при использовании в ней ЦИС ТТЛШ 530 серии, рабочая частота передатчика не может быть выше 10 МГц. Это обусловлено высокой кратностью деления входной частоты при формировании импульсов оптимальной скважности. Частично устранить этот недостаток и снизить кратность до 4-х (рабочая частота передатчика до 20 МГц) возможно в измененной схеме (рис. 5), с наложением дополнительного требования к входному сигналу – скважность входных импульсов должна быть в пределах от 1,96 до 2.

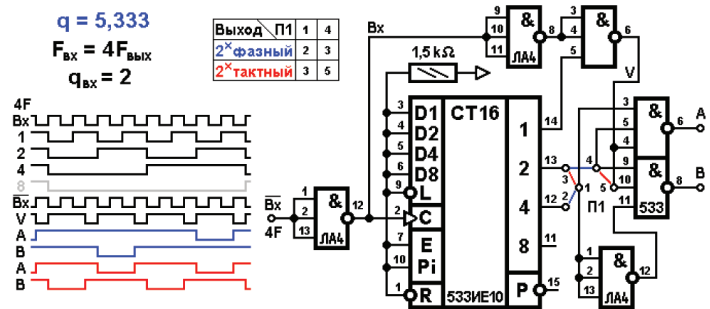


Рис. 5

При скважности входных импульсов не точно равной двум, происходит пропорциональное изменение скважности выходных импульсов. Это свойство схемы можно использовать для плавного регулирования длительности выходных импульсов формирователя и установки оптимального значения скважности $q = 5,549$.

Вариант формирователя импульсов с $q = 6$ (рис. 6) построен на D-триггерах. По частотным свойствам схема лучшая из всех приведенных, поскольку имеет самую низкую кратность деления входной частоты – 3. То есть, при использовании ЦИС ТТЛШ 530 серии максимальная рабочая частота передатчика может составить 25 МГц.

Однако, эта схема может работать только в двухфазном одноктактном режиме.

При желании иметь формирователь импульсов с переключаемой диаграммой распределения импульсов «двухфазный-двухтактный» схему придется видоизменить, увеличив также и кратность деления. Переключение режима осуществляется установкой переключателя П1 в соответствии с таблицей, приведенной на рисунке 7.

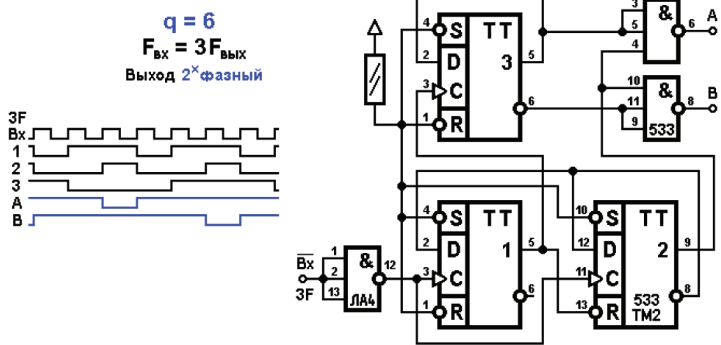


Рис. 6

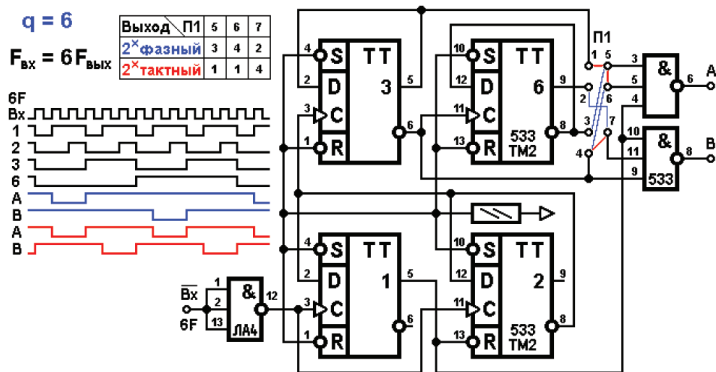


Рис. 7

Двухтактно-двухфазный (четырёхфазный) формирователь возбуждающих импульсов МФИ-4. (рис. 8). Предназначен для возбуждения двухтактного выходного каскада передатчика в каждом плече которого поочередно работают по два активных элемента. Применен на выходе синтезатора С9-1449-1800-4.

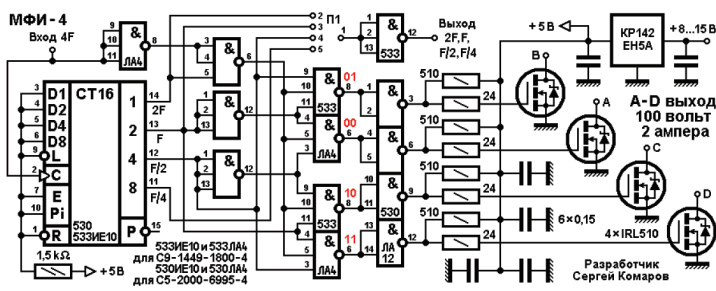


Рис. 8

Схема работает аналогично приведенной на рис 5, с той лишь разницей, что дешифрируются не две, а 4 выходных последовательности, обеспечивает работу активных элементов выходного каскада со скважностью 5,333 и требует входной последовательности импульсов учетверенной частоты со скважностью $q = 2$. Если же преобразователь синусоидального сигнала в прямоугольные импульсы на выходе ГУН синтезатора сформирует последовательность со скважностью $q = 1,96$, то МФИ-4 сформирует возбуждающие импульсы для выходного каскада со скважностью оптимальной для максимальной чистоты спектра $q = 5,549$. То же самое касается схемы на рис. 5.

На выходе распределителя импульсов установлен мощный формирователь, состоящий из ЦИС ТТЛШ 530IA12 и четырех ключей на полевых транзисторах серии IRL500 с низким порогом переключения.

При подключении транзисторных ключей непосредственно к колебательной системе АМ передатчика схема сможет надежно работать при напряжении питания не более 24 вольт и при хорошем охлаждении транзисторов.

Если со счетчика 530IE10 (рис. 8) дешифрировать восемь выходных последовательностей, то возможно построение схемы восьмифазного (двухтактно-четырёхфазного) формирователя импульсов оптимальной скважности (рис. 9).

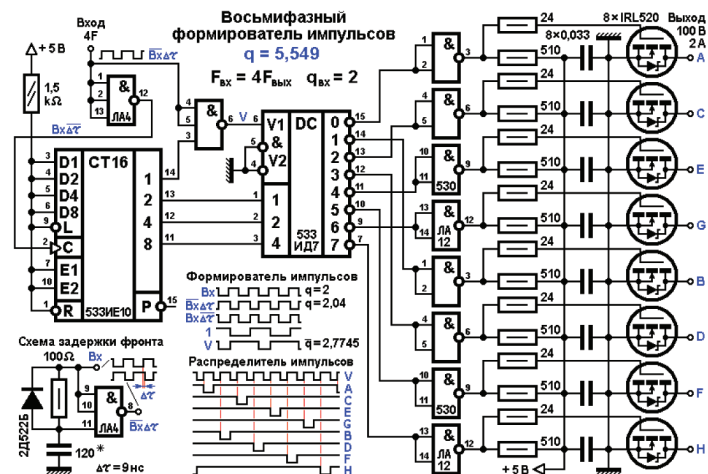


Рис. 9

В схеме возможна плавная регулировка длительности импульса с помощью изменения задержки фронта на RC цепочке. К примеру, на выходной частоте 1,6 МГц можно получить оптимальную скважность импульсов 2,7745 при емкости конденсатора 120 пФ. Поскольку несинхронная задержка фронта импульса RC цепочкой ($\Delta t = 9$ нс) будет иметь изменяющийся фазовый угол на разных частотах, то получить точное значение скважности возможно лишь на одной частоте. Однако, плавный минимум коэффициента гармоник в области оптимума скважности (Рис. 1) и малая доля фиксированной задержки Δt от синхронной длительности импульса (на частоте 1,6 МГц составляет 4%) позволяет использовать такое схемотехническое решение при диапазоне перестройки до $\pm 25\%$ от рабочей частоты. При этом точность поддержания оптимального значения скважности по диапазону будет не хуже $\pm 1\%$.

Выводы

Анализ приведенных схемотехнических решений показывает:

- При требовании высокой чистоты спектра оптимально использовать формирователи со скважностью 5,333 с подстройкой до точного значения скважности 5,549 на середине рабочего диапазона частот.
- В случаях, когда важен КПД, и максимальное использование активных элементов по мощности, наиболее удачным решением будет формирователь со скважностью 6,667 с подстройкой значения скважности до 6,785, или без него.

– МФИ для наиболее простых передатчиков НЧ, СЧ и ВЧ диапазонов имеет смысл выполнять, используя формирователи со скважностью 6 без какой-либо подстройки.

– При проектировании на описанном принципе мало-мощных высоконадежных связанных передатчиков (десятки, первые сотни ватт), на выходную колебательную систему может работать непосредственно многофазный каскад на полевых транзисторах (МФИ-4 и ему подобные).

– Энергетические параметры для импульсов оптимальных скважностей сведены в таблицу.

q_2	$q_{кв}$	θ_c	$\cos \theta_c$	α_1	α_0	α_1 / α_0	$K\phi$	K_i	K_r	$\eta\%$ (при $\xi = 0,9$)
5,333	2,667	67,5	0,383	0,587	0,377	1,557	0,943	1,167	0,250	70,1
5,549	2,775	64,9	0,424	0,574	0,362	1,586	0,980	1,214	0,240	71,4
6	3	60	0,5	0,551	0,336	1,640	1,061	1,313	0,262	73,8
6,667	3,333	54	0,588	0,515	0,304	1,694	1,179	1,458	0,318	76,2
6,785	3,393	53,1	0,6	0,508	0,298	1,705	1,198	1,484	0,327	76,7

В таблице обозначены:

q – значение скважности импульсов, при работе активного элемента в двухфазной схеме;

θ_c – угол отсечки активного элемента, задаваемый возбуждающими импульсами;

α_1 – коэффициент разложения плоского импульса по первой гармонике;

α_0 – коэффициент разложения плоского импульса по постоянной составляющей;

$K\phi$ – коэффициент формы импульса;

K_i – коэффициент увеличения импульса выходного тока активного элемента при скважности большей, чем в типовом режиме;

K_r – коэффициент высших гармоник;

η – теоретический КПД выходного каскада (%) при значении коэффициента использования питающего напряжения $\xi = 0,9$.

Литература

1. Комаров С.Н., Тертышников А.В. Разработка и исследование многофазных синтезаторов радиочастот с мощным выходом // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт, 2013. №9. С. 97-99.

2. Комаров С.Н., Морозова А.П. Исследование усилителя радиочастотных колебаний с многофазным возбуждением // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт, 2014. №10. С. 33-38.

3. Комаров С.Н. Средневолновый радиовещательный синтезатор частоты // Радио, 2012. № 9. С. 19-22; Радио, 2012. №10. С. 21-23.

4. Комаров С.Н. Мало-мощный радиовещательный передатчик на базе синтезатора С9-1449-1800. <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.

6. Комаров С.Н. Передающий комплекс Индивидуального радиовещания // Радио, 2015. № 9. С. 21-26.

7. Агафонов Б.С. Теория и расчет радиотелефонных режимов генераторных ламп. – М.: Советское радио, 1955. С. 60-61.

FORMATION OF AN OPTIMAL DUTY CYCLE FOR DRIVING THE MULTI-PHASE OUTPUT STAGES OF TRANSMITTERS

Sergey N. Komarov, General Director of "Broadcasting Technology", Moscow, Russia, ros.mtuci@yandex.ru

Abstract

When building a powerful (tens or hundreds of kilowatts), highly reliable radio transmitters LF, MF and HF bands, using the principle of a multi-phase power addition of active elements necessary to ensure the optimum performance of each duty cycle. This is achieved by the formation of the phase diagram in the preliminary stage, it is a powerful generator excitation pulses [1]. In addition to the priority of the work of the active elements, you must also specify the duration of each active element of the output stage to the output oscillating system. Both of these problems are solved with the help of generator and distributor of high-power pulses optimal duty cycle.

Keywords: circuit engineering, transmitter, duty cycle of the input pulse.

References

1. Komarov S.N., Tertyshnikova A.V. Development and research of multi-phase radio-frequency synthesizer with a powerful output / T-Comm. 2013. No.9. Pp. 97-99. (in Russian)
2. Komarov S.N., Morozova A.P. A study of radio frequency oscillation amplifier with multi-phase excitation / T-Comm. 2014. Vol. 8. No.10. Pp. 33-38. (in Russian)
3. Komarov S.N. Medium wave broadcasting frequency synthesizer / Radio. 2012. No.9. Pp. 19-22.; Radio. 2012. No.10. Pp. 21-23. (in Russian)
4. Komarov S.N. The low-power broadcasting transmitter based S9-1449-1800 synthesizer. <http://www.cqf.su/technics5-2a.html>, www.cqf.su/technics5-2b.html, www.cqf.su/technics5-2c.html. (in Russian)
5. Komarov S.N. Generator two exemplary frequency synthesizer for radio transmitters / Radio. 2014. No. 6. Pp. 23-25. (in Russian)
6. Komarov S.N. The transmitting range of personal broadcasting / Radio. 2015. No. 9. Pp. 21-26. (in Russian)
7. Agafonov B.S., theory and calculation radiotelephone generator tubes. Moscow: Soviet Radio. 1955. Pp. 60-61. (in Russian)