

ИМПУЛЬСНОЕ СУММИРОВАНИЕ МОЩНОСТИ АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В МНОГОФАЗНЫХ ВЫХОДНЫХ КАСКАДАХ РАДИОПЕРЕДАТЧИКОВ

Комаров Сергей Николаевич^{1,2},

¹ ООО "РВТ", Москва, Россия,

² МТУСИ, Москва, Россия,

komarov@radiostation.ru

Ключевые слова: импульсное суммирование мощности, многофазные синтезаторы, многофазные выходные каскады передатчиков, ключевые усилители мощности, импульсы оптимальной скважности, многократное горячее резервирование.

При построении высоконадежных необслуживаемых радиопередатчиков малой, средней и большой мощности предлагается использовать метод многофазного импульсного суммирования мощности активных элементов выходного каскада с временной развязкой и, как следствие, многократным горячим резервированием. Суть метода заключается в том, что в выходном каскаде поочередно работают несколько активных элементов, но одновременно с колебательной системой работает лишь один, отдавая ей свою импульсную мощность, в скважность раз большую, чем непрерывная. Таким образом, мощность, отдаваемая выходным каскадом в колебательную систему равна импульсной мощности одного активного элемента.

Идея метода "подсмотрена" в работе цилиндров четырехтактного двигателя внутреннего сгорания, когда рабочий ход поршня происходит в разных цилиндрах по очереди, а оставшиеся три такта отработавший цилиндр "отдыхает". И так – в каждом цилиндре. Этот же принцип работает при подаче патронов в барабане револьвера, при смене инструмента в револьверных станках, в автоматических пушках с вращающимся блоком стволов.

Приведены структурные схемы выходных каскадов многофазных передатчиков в вариантах исполнения, как на мощных МДП транзисторах, так и с использованием в качестве активных элементов метало-керамических тетродов. Рассмотрены варианты построения одноктактных и двухтактных многофазных каскадов и временные диаграммы их работы. Предложен способ определения частотных ограничений к использованию метода. Перечислены достоинства и недостатки. Сформулированы рекомендации и обозначены области возможного применения многофазных передатчиков.

В заключении приведена практическая схема двухтактно-двухфазного выходного каскада передатчика малой мощности (100 Вт) на четырех металло-керамических тетродах (мощных нувисторах) управляемых по цепи катода МДП транзисторами и приведены ссылки на сайт автора, где подробно изложены практические методики расчета выходных колебательных систем для одноктактной и двухтактной схем построения многофазных выходных каскадов.

Информация об авторе:

Комаров Сергей Николаевич, радиоинженер, генеральный директор общества с ограниченной ответственностью Радиовещательные технологии" (ООО "РВТ"), старший преподаватель кафедры Радиооборудования и схемотехники (РОС) Московского технического Университета связи и информатики (МТУСИ), Москва, Россия.

Для цитирования:

Комаров С.Н. Импульсное суммирование мощности активных элементов в многофазных выходных каскадах радиопередатчиков // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2017. Том 11. №5. С. 9-14.

For citation:

Komarov S.N. (2017). Pulsed power summation of active elements in the multiphase output stages of transmitters. *T-Comm*, vol. 11, no.5, pp. 9-14. (in Russian)

Предлагаемый способ суммирования мощности отличается от известных тем, что во время каждого рабочего полу- периода с колебательной системой работает только один активный элемент. Остальные элементы находятся в отсечке или как-то иначе отключены от колебательной системы, например, мощными ключами (рис. 1).

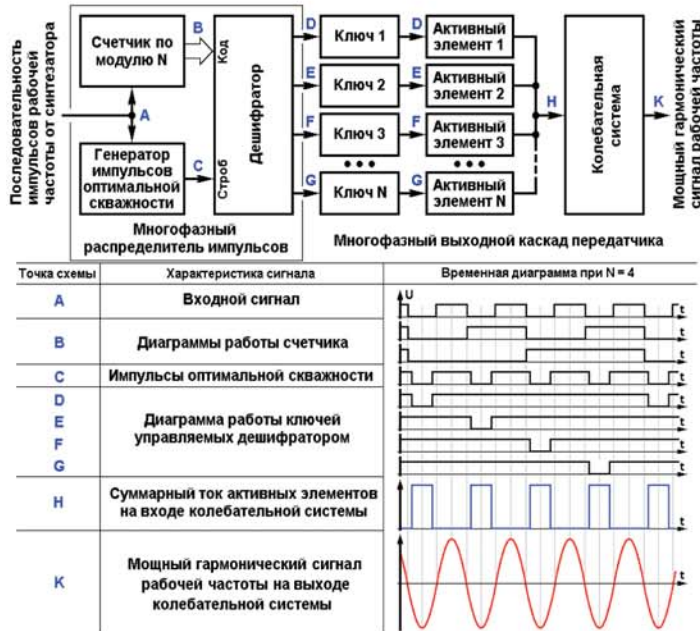


Рис. 1

Следующий активный элемент будет отдавать свою мощность колебательной системе во время следующего рабочего полупериода. И так будет продолжаться столько раз, сколько активных элементов (N) участвуют в импульсном суммировании мощности. После этого отдавать свою мощность в колебательную систему будет снова первый активный элемент. Таким образом, каждый активный элемент работает на колебательную систему со скважностью равной их числу N. За счет этого импульсная мощность, отдаваемая каждым активным элементом в колебательную систему, может быть увеличена в скважность раз. То есть, имеет место импульсное суммирование мощности активных элементов, при котором непрерывная выходная мощность передатчика будет равна импульсной мощности одного активного элемента. Суммирование мощности всех активных элементов происходит за N периодов рабочей частоты. Для управления выходным каскадом нужен многофазный распределитель импульсов, частота работы каждого выхода которого в N раз ниже рабочей частоты передатчика.

Длительность управляющего импульса, поступающего на вход ключа [2] меньше половины периода рабочей частоты и определяется Формирователем (генератором) импульсов оптимальной скважности [3], который, в свою очередь, управляет Дешифратором по входу стробирования. Благодаря этому, реальная скважность работы каждого активного элемента повышается, что можно использовать двояко: либо для еще большего увеличения выходной мощности передатчика (за счет увеличения импульсной мощности активных элементов), либо для облегчения режима работы, что ведет к косвенному увеличению надежности передатчика в целом.

Частотные свойства метода

При работе на предельно высокой частоте, где из-за конечной длительности фронта прямоугольный импульс анодного тока (стока, коллектора) вырождается в косинусоидальный (рис. 2), предельный КПД можно посчитать как половину произведения коэффициента использования анодного напряжения ξ на отношение коэффициентов Берга первой гармоники и постоянной составляющей. В двухфазном выходном каскаде и работе с оптимальной скважностью $q = 6$ [3], что соответствует углу отсечки $\theta = 60^\circ$ косинусоидального импульса, КПД на предельной частоте для активных элементов на тетрадах (средний $\xi = 0,8$) составит:

$$\eta = \xi \alpha_1 / 2\alpha_0 = \xi \times 0,391 / (2 \times 0,218) = 0,8 \times 0,897 = 0,717$$

или 71,7%.

Для аналогичного случая и выходного каскада на МДП транзисторах (средний $\xi = 0,95$):

$$\eta = \xi \alpha_1 / 2\alpha_0 = \xi \times 0,391 / (2 \times 0,218) = 0,95 \times 0,897 = 0,852$$

или 85,2%.

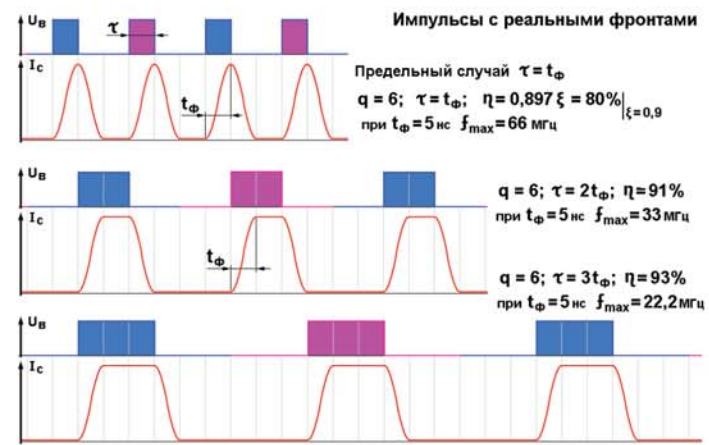


Рис. 2

Разумеется, с понижением частоты (или при увеличении быстродействия транзисторов) КПД ключевого усилителя мощности может асимптотически приближаться к значению ξ .

Достоинствами предлагаемого метода являются:

- одновременно с колебательной системой работает только один активный элемент, таким образом, все активные элементы развязаны от влияния друг на друга по времени. То есть, изменение параметров любого из активных элементов не влияет на режимы работы остальных.
- выход из строя одного или нескольких активных элементов (обрыв цепи катода, потеря эмиссии или усилительных свойств, перегорание цепи эмиттера или истока) не приводит к выходу из строя радиопередающего устройства в целом.
- при выходе из строя активных элементов выходная мощность передатчика снижается линейно их числу. При этом КПД передатчика не изменяется и, соответственно, уменьшается потребляемая мощность.
- длительная работа передатчика с одним или несколькими вышедшими из строя активными элементами не ска-

зывается на работоспособности и надежности остальных элементов и передатчика в целом.

- при числе активных элементов в выходном каскаде 5 и более, выход из строя одного элемента приведет к уменьшению выходной мощности передатчика на 1 дБ и менее, что укладывается в допустимые нормы для безотказной работы радиовещательных передатчиков

- работоспособность передатчика сохраняется до тех пор, пока в выходном каскаде останется хотя бы один исправный активный элемент.

- в процессе работы возможна замена активных элементов без отключения передатчика.

- данная схема обеспечивает N -кратное снижение интенсивности отказов выходного каскада передатчика (увеличение надежности работы) за счет рабочего горячего резервирования активных элементов.

- схема суммирования мощности проста: в ней отсутствуют элементы сумматоров мощности, что положительно сказывается на надежности, простоте регулировки и стоимости передатчика.

- для работы такого выходного каскада необходима последовательность импульсов рабочей частоты и не требуется гармонический, спектрально чистый сигнал от синтезатора.

- весь тракт возбуждения выходного каскада передатчика является ключевым, как следствие - широкополосным, не требующим настройки на рабочую частоту и регулировки в процессе производства, и построен на цифровых интегральных микросхемах.

- тракт возбуждения выходного каскада передатчика в силу использования в нем исключительно цифровой схемотехники, обладает высокой устойчивостью к наводкам и самовозбуждению.

- в процессе производства передатчиков с таким выходным каскадом не требуются регулировочные работы в предварительных каскадах, поскольку все формирование сигнала происходит синхронно, в ключевом режиме, вплоть до выходной колебательной системы.

- в многофазных передатчиках не требуются измерительные приборы ни в маломощных, ни в мощных каскадах. В маломощных каскадах – логические уровни, в мощных – режимы активных элементов жестко заданы стробирующим импульсом и эквивалентным сопротивлением нагрузки колебательной системы. Нужен только индикатор тока антенны «больше-меньше», для настройки колебательной системы в резонанс и нахождения оптимального коэффициента трансформации.

- при существующих МДП транзисторах и мощных металлокерамических тетродах выходная мощность многофазных необслуживаемых передатчиков в диапазонах НЧ, СЧ и нижней части ВЧ может достигать десятков и первых сотен киловатт.

- использование в выходном каскаде передатчиков малой и средней мощности вместо одного мощного активного элемента нескольких маломощных (меньших габаритов), позволяет при конструировании передатчика выполнить более плотную компоновку.

- в многофазных выходных каскадах передатчиков легче организовать теплоотвод, поскольку выделение тепла распределено на несколько активных элементов, а не сосредоточено в одной точке (ниже температура перегрева).

Недостатки метода.

- частотные свойства ключевых активных элементов должны быть выше, чем при усилении гармонического сигнала, чтобы работать на максимальной рабочей частоте в импульсном режиме с короткими фронтами и хорошим КПД.

- синхронное формирование импульсов оптимальной скважности требует повышения входной частоты, как минимум, в три раза [1]. При асинхронном формировании этого ограничения нет, но в этом случае увеличивается фазовый шум за счет нестабильности временного положения спада стробирующего импульса. Значение фазового шума зависит от схемы формирователя строба.

- максимальная рабочая частота многофазных передатчиков при синхронном формировании стробирующих импульсов ограничена частотными свойствами логических ИС и быстродействием драйверов для управления мощными МДП транзисторами. Ограничения чисто технологические.

- при работе передатчика с вышедшими из строя одним или несколькими активными элементами в выходном спектре появляются субгармоники, кратные частоте f_p/N . Уровень субгармоник и их присутствие в спектре зависит от фазового положения вышедших из строя активных элементов и параметров принципиальной схемы выходной колебательной системы.

Рекомендации к применению

Оптимальный частотный диапазон передатчиков, выполненных на традиционной (корпусной) элементной базе и металло-керамических тетродах – от низких частот до 16 МГц реализуется без каких-либо сложностей с использованием цифровых микросхем с максимальной рабочей частотой 30-50 МГц, и драйверов для управления мощными МДП транзисторами с $t_f \leq 7$ нс.

При использовании цифровых ИС с $f_{max} = 70$ МГц (ТТЛШ 530 серии, 74Sxx) и драйверов с $t_f \leq 6$ нс, максимальная рабочая частота передатчика составит 24 МГц.

Для ИС с $f_{max} = 150$ МГц (КМДП 1554 серии или 74АСxx) и драйверов с $t_f \leq 5$ нс, возможна работа на частотах до 66 МГц.

При использовании ЭСЛ ИС серий 100, 500 или более современных, и при наличии драйверов ЭСЛ-КМОП и МДП транзисторов соответствующего быстродействия, можно подняться до частот 80-120 МГц.

Использование новейших мощных импульсных СВЧ транзисторов на основе GaAs может расширить частотный диапазон применения метода до единиц гигагерц.

Схемотехника формирователей импульсов оптимальной скважности на традиционной элементной базе рассмотрена в статье автора [3].

Многофазный выходной каскад работает в ключевом режиме и выходная колебательная система должна в большей степени подавлять высшие гармоники, чем если бы активные элементы работали с косинусоидальным импульсом тока. Поэтому при проектировании мощных передатчиков на данном принципе, необходимо выходную колебательную систему строить в виде двух колебательных контуров с критической связью [4].

Области применения многофазных выходных каскадов

- радиопередатчики с амплитудной и частотной модуляцией и манипуляцией, в том числе связные, навигационные и радиовещательные диапазонов НЧ, СЧ, ВЧ и нижней части ОВЧ;
- телеметрические передатчики и радиомаяки с частотной и фазовой манипуляцией;
- передатчики ОФДМ сигналов, формируемых по методу Кана;
- высоконадежные радиопередатчики оперативных, экспедиционных, аварийных радиостанций;
- необслуживаемые ретрансляторы и автоответчики;
- радиопередатчики, работающие при воздействии мощного электромагнитного импульса;
- радиопередатчики, практически не требующие регулировки в процессе производства;
- радиопередатчики, предельно простые в эксплуатации;
- другие применения, где важно совместить простоту эксплуатации, плотную компоновку высокую выходную мощность и надежность работы передатчика (N-кратное резервирование).

Многофазные выходные каскады передатчиков на биполярных и МДП транзисторах

Структурная схема однократно-многофазного выходного каскада на мощных МДП транзисторах (рис. 3):



Рис. 3

Отличие от схемы на рис. 1 заключается лишь в том, что здесь управление активными элементами в виде МДП транзисторов происходит непосредственно от дешифратора. При использовании микросхем серии 1554 (74АСхх) и транзисторов серий IRF6хх и аналогичных дополнительные мощные драйверы можно не ставить.

Данная схема реализована в синтезаторе С9-1449-1800 [5], разработки автора, при $N = 2$, на базе которого построена серия маломощных средневолновых АМ радиопередатчиков для индивидуального радиовещания [6, 7], предназначенных, в том числе, и для непрофессионального повторения (студенты, радиолюбители). В [6] приведено подробное практическое описание радиопередатчика мощностью 1 Вт, выполненного без дополнительного выходного каскада, в качестве которого используются непосредственно выходные ключевые транзисторы двухфазного синтезатора. В [7] приведено описание схемы и конструкции двухфазного радиопередатчика мощностью 10 Вт, с выходным каскадом на

импульсных лучевых тетрадах 6П43П. Обе разработки предназначены для лабораторной иллюстрации метода многофазного суммирования мощности и изучения его схемотехники.

Практический расчет выходной колебательной системы однократно-многофазного выходного каскада передатчика приведен в [8].

Структурная схема двухтактно-многофазного выходного каскада на мощных МДП транзисторах (рис. 4):



Рис. 4

Отличие от схемы на рис. 3 заключается в том, что здесь управление активными элементами в виде МДП транзисторов происходит в два раза чаще (на положительной и отрицательной полуволнах ВЧ напряжения) и требуется симметричная колебательная система.

Такая схема реализована в синтезаторе С9-1449-1800-4, разработки автора, с числом $N = 4$, на базе которого построена серия маломощных средневолновых АМ радиопередатчиков для индивидуального радиовещания. Построение передающего тракта и пример расчета выходной колебательной системы для этой схемы приведены в [9].

Если МДП транзисторы будут выполнять не функцию выходных активных элементов, а лишь ключей, а в качестве активных элементов использовать металлокерамические тетроды, то выходная мощность такого передатчика может быть весьма значительной (десятки и первые сотни киловатт в необслуживаемом режиме) благодаря многократному горячему резервированию и жестко схемно-фиксированным режимам активных элементов, работающих с высоким значением скважности. В такой схеме даже при работе на частично неисправную (расстроенную) антенну, за время N/f_p активный элемент успеет «отдохнуть» от перегрузки, и сигнал в эфире все равно будет присутствовать.

Пример реализации: двухтактно-двухфазный выходной каскад на мощных нувисторах

По схеме (рис. 5) выполнены выходные каскады маломощных передатчиков ПСМ-0,1 и ПСМ-0,5, построенных на базе синтезатора С9-1449-1800-4 и формирователя импульсов МФИ-4, работающие со скважностью 5,333, близкой к оптимальной по чистоте спектра [3].

Энергетический расчет и практическая методика проектирования и расчета выходной колебательной системы для этой схемы приведена в [9].

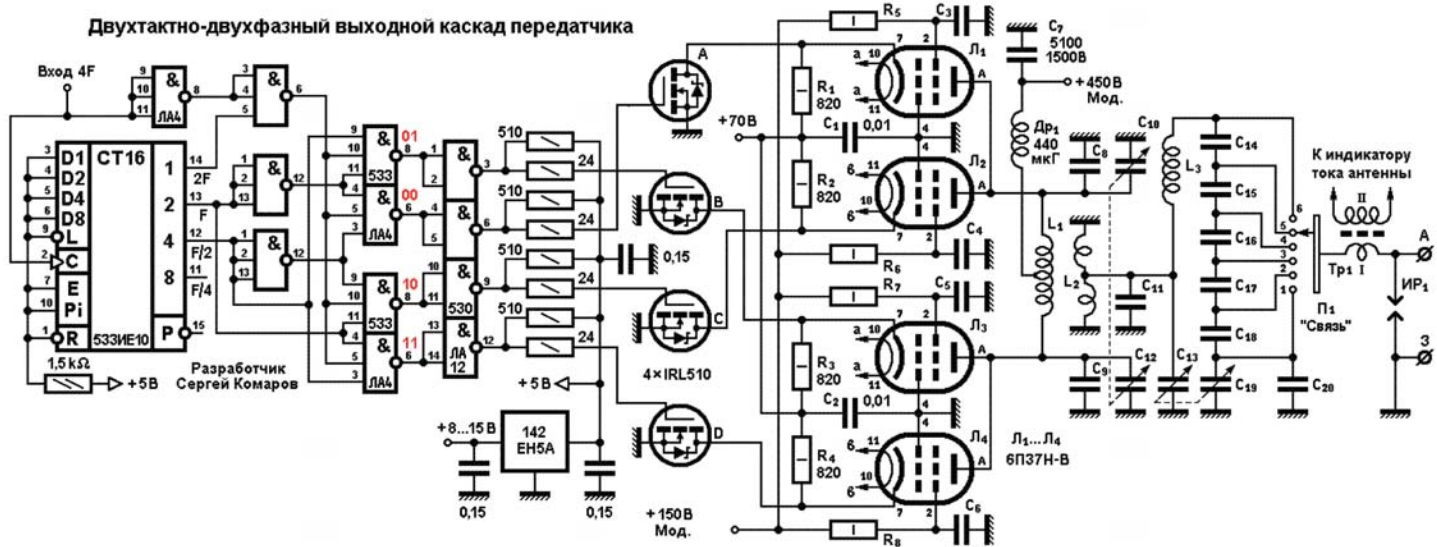


Рис. 5

Литература

1. Комаров С.Н., Тertyshnikova А.В. Разработка и исследование многофазных синтезаторов радиочастот с мощным выходом // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. № 9. 2013. С. 97-99. <http://www.cqf.su/technics/Komarov-Tertyshnikova-2013.pdf> (12.04.2017).
2. Комаров С.Н. Морозова А.П. Исследование усилителя мощности радиочастотных колебаний с многофазным возбуждением // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. Т. 8. № 10. 2014. С. 33-38. http://www.cqf.su/technics/Nom-10-2014_33-38.pdf (12.04.2017).
3. Комаров С.Н. Формирование импульсов оптимальной скважности для возбуждения многофазных выходных каскадов передатчиков // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. № 11. 2016. С. 29-33. http://www.cqf.su/technics/Nom-11-2016_29-33.pdf (12.04.2017).
4. Комаров С.Н. Ключевой тракт формирования несущей АМ передатчика // Радиолобитель. 2017. № 1. С. 17-21. <http://www.cqf.su/technics/Trakt-AM.html> (12.04.2017).
5. Комаров С.Н. Средневолновый радиовещательный синтезатор частоты // Радио. 2012. № 9. С. 19-23; № 10. С. 21-23. <http://www.cqf.su/technics4-1a.html> (12.04.2017).
6. Комаров С.Н. Средневолновый радиовещательный АМ радиопередатчик мощностью 1 Вт. <http://www.cqf.su/technics/transmitter-1W.shtml> (12.04.2017).
7. Комаров С.Н. Средневолновый радиовещательный АМ радиопередатчик мощностью 10 Вт. <http://www.cqf.su/technics/transmitter-10W-p1.shtml> (12.04.2017).
8. Комаров С.Н. Проектирование и расчет ВКС двухфазного выходного каскада передатчика диапазона 200 м (1449-1620 кГц)

для мощности 50 Вт // Радиолобитель. 2017. № 2. С. 14-17 и № 3. С. 20-23. <http://www.cqf.su/technics/WKS-2f-50.html> (12.04.2017).

9. Комаров С.Н. Расчет выходной колебательной системы средневолнового радиопередатчика с двухтактным выходным каскадом на лучевых тетрадах (пример для мощности 100 Вт). <http://www.cqf.su/technics/WKS-2t-2-50.html> (12.04.2017).

Комментарий автора.

Идея многофазного выходного каскада передатчика пришла мне в голову летом 2009 г. В 2010 году я показал прообраз этой статьи с изложением принципа многофазного импульсного суммирования мощности с временной развязкой активных элементов и многократным горячим резервированием своему научному руководителю, заведующему кафедрой Радиопередающих устройств МТУСИ, д.т.н., профессору, члену корреспонденту РАН Шахгильдянну Вагану Вагановичу. Прочитав статью, он посоветовал мне оформить патент. Но, ознакомившись с действующим законодательством в области патентного права, я решил отказаться от патентования, поскольку это противоречит моим жизненным принципам. Все свои разработки я делаю для развития радиотехники, а не для того, чтобы ставить финансовый или правовой барьер на пути их внедрения. Мои разработки могут использовать в своих конструкциях, инженеры, техники и радиолюбители совершенно свободно и бесплатно. Я люблю радиотехнику и работаю ради красоты и вдохновения. Если понравилось – внедряйте и пользуйтесь. Мне это будет греть душу.

PULSED POWER SUMMATION OF ACTIVE ELEMENTS IN THE MULTIPHASE OUTPUT STAGES OF TRANSMITTERS

Sergey N. Komarov, LLC "Broadcasting Technologies", Moscow, Russia, komarov@radiostation.ru

Abstract

When constructing highly reliable, non-serviced radio transmitters of small, medium and high power, it is proposed to use the method of multiphase pulse summation of the power of active elements of the output stage with their time isolation and multiple hot backup. The essence of the method is that several active elements operate alternately in the output stage, but simultaneously with the oscillating system only one works, giving it its impulse power, to a duty cycle times greater than the continuous one. Thus, the power given by the output stage to the oscillating system is equal to the impulse power of one active element.

The idea of the method is "peeped" in the work of the cylinders of a four-stroke internal combustion engine, when the piston's working stroke occurs in different cylinders in turn, and the remaining three bars of the spent cylinder "rest." So it happens in each cylinder. The same principle works when feeding cartridges in the revolver drum, when changing tools in revolving machines, in automatic guns with a rotating block of barrels.

Structural diagrams of the output stages of multiphase transmitters are presented in the versions, both on high-power MOS transistors and with the use of metal-ceramic tetrodes as active elements; Also variants of construction of single-cycle and two-stroke multiphase cascades are considered; Time diagrams of their work are considered. A method for determining the frequency limitations to the use of the method is proposed. Enumerated advantages and disadvantages. Recommendations for application are formulated and areas of possible application of multiphase transmitters are indicated.

In conclusion, a practical diagram of a two-cycle two-phase output stage of a low-power transmitter (100 W) on four metal-ceramic tetrodes (high-power nuovistors) of transistors controlled by the cathode circuit of MDP transistors is given. The author's site is described in detail. Practical methods for calculating the output oscillation systems for And two-stroke circuits for constructing multiphase output stages.

Keywords: pulse power summation, multiphase synthesizers, multi-phase output stages of transmitters, key power amplifiers, pulses of optimum duty cycle, multiple hot backups.

References

1. Komarov S.N., Tertyshnikova A.V. (2013). Development and investigation of multiphase radio frequency synthesizers with a powerful output. *T-Comm*, no.9, pp. 97-99. <http://www.cqf.su/technics/Komarov-Tertyshnikova-2013.pdf> (12/04/2017). (in Russian)
2. Komarov S.N. Morozova A.P. (2014). Investigation of the power amplifier of radio-frequency oscillations with multiphase excitation. *T-Comm*, vol. 8, no. 10, pp. 33-38. http://www.cqf.su/technics/Nom-10-2014_33-38.pdf (12/04/2017). (in Russian)
3. Komarov S.N. (2016). Formation of pulses of optimum duty cycle for excitation of multiphase output stages of transmitters. *T-Comm*, no.11, pp. 29-33. http://www.cqf.su/technics/Nom-11-2016_29-33.pdf (12/04/2017). (in Russian)
4. Komarov S.N. (2017). The key path for the formation of an AM transmitter carrier. *Radiolyubitel'*, no.1, pp. 17-21. <http://www.cqf.su/technics/Trakt-AM.html> (12/04/2017). (in Russian)
5. Komarov S.N. (2012). Mid-wave broadcasting frequency synthesizer. *Radio*, no.9, pp. 19-23; No.10, pp. 21-23. <http://www.cqf.su/technics4-1a.html> (12/04/2017). (in Russian)
6. Komarov S.N. (2017). Medium-wave broadcasting AM radio transmitter with a power of 1W. <http://www.cqf.su/technics/transmitter-1W.shtml> (12/04/2017). (in Russian)
7. Komarov S.N. (2017). Medium-wave broadcasting AM radio transmitter with a power of 10 watts. <http://www.cqf.su/technics/transmitter-10W-p1.shtml> (12/04/2017). (in Russian)
8. Komarov S.N. (2017). Design and calculation of two-phase output stage cascade of the transmitter of the range 200 m (1449-1620 kHz) for a power of 50 W. *Radiolyubitel'*, no.2, pp. 14-17 and no.3, paras. 20-23. <http://www.cqf.su/technics/WKS-2f-50.html> (12/04/2017). (in Russian)
9. Komarov S.N. (2017). Calculation of the output oscillating system of a medium-wave radio transmitter with a two-cycle output stage on beam tetrodes (example for a power of 100 W). <http://www.cqf.su/technics/WKS-2t-2-50.html> (12/04/2017). (in Russian)

Information about author:

Sergey N. Komarov, radioengineer, General Director of Limited Liability Company "Broadcasting Technologies" (LLC "RWT"), Senior Lecturer of the Department of Radio Equipment and Circuit Engineering of the Moscow Technical University of Communications and Informatics (MTUCI), Moscow, Russia