Импульсное суммирование мощности и многофазные выходные каскады передатчиков. Часть 2

НЕМНОГО ТЕОРИИ, НАДЕЮСЬ, ИНТЕРЕСНОЙ

Сергей Комаров (UA3ALW)
г. Москва

Продолжаем.

Я не случайно начал рассказ о качелях с любимой девушкой. Ведь молодые девчонки тоже бывают озорницы. Да, крутить “солнышко” на качелях едва ли хоть одна согласится. Страшно. А вот раскачаться “до железки”, и позлить этим свою маму, глядящую из окна – это, пожалуйста!

Так вот и посмотрим, как можно раскачать девушку на качелях “до железки”.

Исходим из того, что её молодой парень вовсе не Геракл, и вопросы КПД – эффективности использования имеющейся силы, весьма важны. Полагаю, что те, кто всё своё свободное время проводят в качалках или в спортзалах, журнал “Радиолюбитель” точно не читают. Не те интересы, не та социальная группа. “Сила есть – ума не надо” – древняя народная мудрость.

Так вот, подумаем, как используя небольшую силу, можно раскачать девушку “до железки”, и чтобы это было озорно и не в тягость. Вспоминаем физику. Кинетическая энергия равна – Эм Вэ квадрат, пополам. И, полагаю, что резвясь с ребятами во дворе, вы замечали, что толкнуть соперника своим телом (масса большая, скорость маленькая) менее эффективно, чем ударить кулаком (масса не велика, зато большая скорость). При этом время воздействия при ударе кулаком весьма мало. А эффект значительный. Это – наглядно и мальчишкам понятно. Конечно, никто не собирается раскачивать девушку на качелях кулачными ударами. Но должно быть очевидно, что раскачивать надо короткими импульсами большой амплитуды. При этом, для эффективности раскачивания форма импульса не важна. Вспоминаем: “Эм Вэ квадрат, пополам” – там нет ни слова про форму импульса. Поэтому, форму импульса, как дополнительную степень свободы, приберёжём про запас. Однако, припомним, что в радиотехнике проще всего формировать с высоким КПД именно прямоугольные импульсы.

На **рис. 2** я показал два способа раскачивания – в однотактной и в двухтактной схемах. Полагаю, ребята прекрасно знают, что девушки ходят гулять либо стайкой (но тогда им не светит ни с кем познакомиться), либо вдвоём с подружкой. Поэтому ребятам надо предусмотреть не только однотактный, но и двухтактный варианты. Ну, и, согласитесь, что на начальном этапе знакомства резвиться вчетвером гораздо веселее. Если, вдруг тормознул – друг придёт на помощь. И раскачивать девушек на качелях можно резкими толчками под попку. Желание долететь на качелях “до железки” подавляет нарочитое возмущение, что ребята их по попкам шлёпают.

Если сиденье у качелей широкое, и девушки могут сесть на него вдвоём, то для удобства раскачивания они могут сесть лицами в разные стороны (классическая двухтактная схема). Тогда каждый парень со своей стороны будет толкать попку своей девушки! Море веселья и озорства!

А теперь вернёмся к колебательной системе. Как видно, форма напряжения при таком способе возбуждения не очень синусоидальная. Поэтому для передатчиков с импульсным возбуждением колебательной системы необходима вторая ступень фильтрации. Либо классические связанные контура, либо двойной П-контур, либо, для двухтактной схемы, комбинация симметричного параллельного контура и П-контура, связанных индуктивно. Все три схемы – легко реализуемы.

Теперь порассуждаем про длительность импульса возбуждения. Из рисунков видно, что он не равен половине

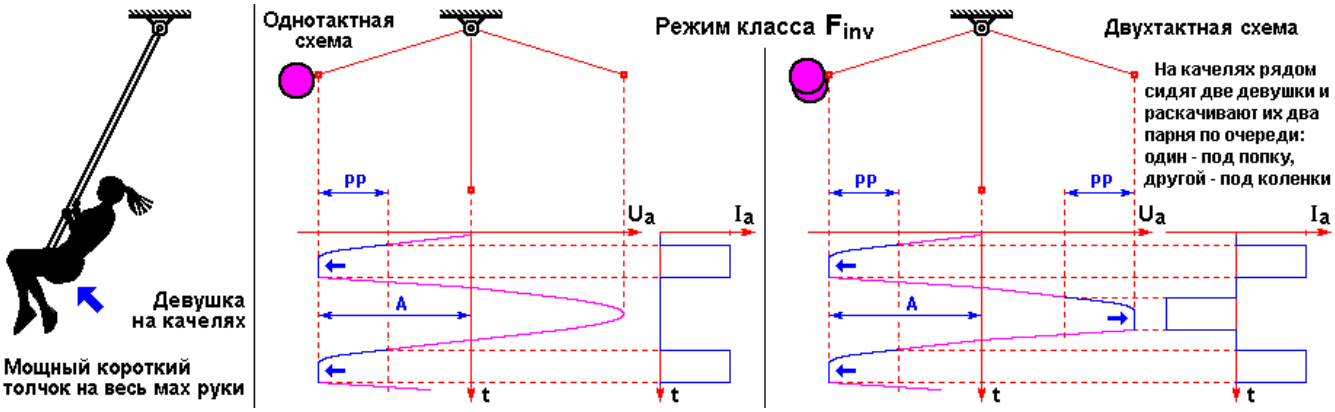


Рис. 2

длительности периода. То есть, меандр для раскачки такого выходного каскада не годится. Оптимальная скважность возбуждающих импульсов по двум параметрам оптимизации [1]: КПД и минимум энергии гармоник (чистота спектра), составляет 2,745. При этом вершина оптимума в сторону увеличения скважности весьма пологая. Вспоминая теорию, что КПД в режиме класса С (а этот режим к нему близок) растёт с уменьшением длительности раскачивающего импульса, представляется заманчивым увеличить скважность до трёх. И формировать проще, и КПД выше. А немного большую энергию гармоник подавим двойным П-контуром или иной системой связанных контуров.

И это не единственный способ импульсного раскачивания качелей.

Полагаю, Вы замечали (если, конечно, наблюдали за маятником или сами раскачивали качели), что когда вы стоите сбоку от качелей, то слега пролетает мимо вас с относительно постоянной скоростью, и лишь при подлёте качелей к верхним точкам скорость движения меняется сильно. Это видно и на графике синусоиды. При переходе через ноль, синусоида не сильно отличается от наклонной прямой линии. И коли так, то приходит в голову мысль разгонять качели не ударом в попку, а прикладывая постоянное усилие на участке с постоянной скоростью. Однако, хитро!

Потребуется сдвиг фазы возбуждения на 90 градусов и некий преобразователь прямоугольного импульса – в треугольный. И желательно без потери мощности. Опять-таки, вспоминаем физику. В частности уравнение индуктивности: ЭДС самоиндукции равно минус Эль Дэ И по Дэ Тэ. Переосмыслив уравнение для приращений, можно легко обнаружить, что если к индуктивности приложить постоянное напряжение, то ток через неё станет увеличиваться по линейному закону тем быстрее, чем меньше значение индуктивности. И выбирая значение этой дополнительной индуктивности, можно совместить скорость нарастания тока со скоростью синусоидального процесса в колебательной системе при переходе колебаний через ноль. Иными словами, разгонять слегу качелей, когда она пролетает мимо. Однако, если мы будем это делать рукой, то получим Режим класса А. Поэтому рукой мы будем двигать резко влево-вправо, а необходимую скорость разгона качелей нам обеспечит резинка, через которую мы будем разгонять качели (**рис. 3**). Ну, например, широкая резиновая полоса, вырезанная из старой велосипедной камеры – сильная резинка. Это и есть та самая дополнительная индуктивность.

И вот тут уже вполне возможно раскачать качели “до железки” относительно небольшим усилием. Активный элемент здесь работает в ключевом режиме класса D, а линейная форма нарастания напряжения на контуре обеспечивается за счёт дополнительной индуктивности (резинки). Причём, стоит обратить внимание, что форма напряжения на контуре очень близка к синусоиде. Гораздо ближе, чем в предыдущем случае. Это, конечно, не снимает необходимость двойной фильтрации (всё-таки импульсное возбуждение выходной колебательной системы), но делает радиопередатчик гораздо более спектрально-чистым.

Теперь про длительность возбуждающего импульса. Здесь он короче, чем в предыдущем случае. Стало быть, КПД в схеме “с резинкой” должен быть выше. Для грубой прикидки порядка величины, посчитаем по рисунку (он же не просто так рисовался), скважность получается 5,14. Если сделать ровно 5, то активная область раскачки качелей немного расширится и амплитуда колебаний чуть-чуть уменьшится. При скважности 6 эффект будет обратным, но в обоих случаях различия от приведённых на рисунке графиков будут незначительные. И, что интересно, в этом случае, сокращение длительности импульса раскачки (увеличение скважности) не будет входить в противоречие с чистотой спектра (чем на меньшей длительности синусоиды мы представляем её прямой линией, тем меньше искажения). Оптимизацию здесь стоит проводить, используя другие параметры. Например, импульсные свойства активных элементов (во сколько раз допустимый ток в импульсе превосходит ток в непрерывном режиме) или падение напряжения на длине вывода общего электрода активного элемента, которое линейно возрастает

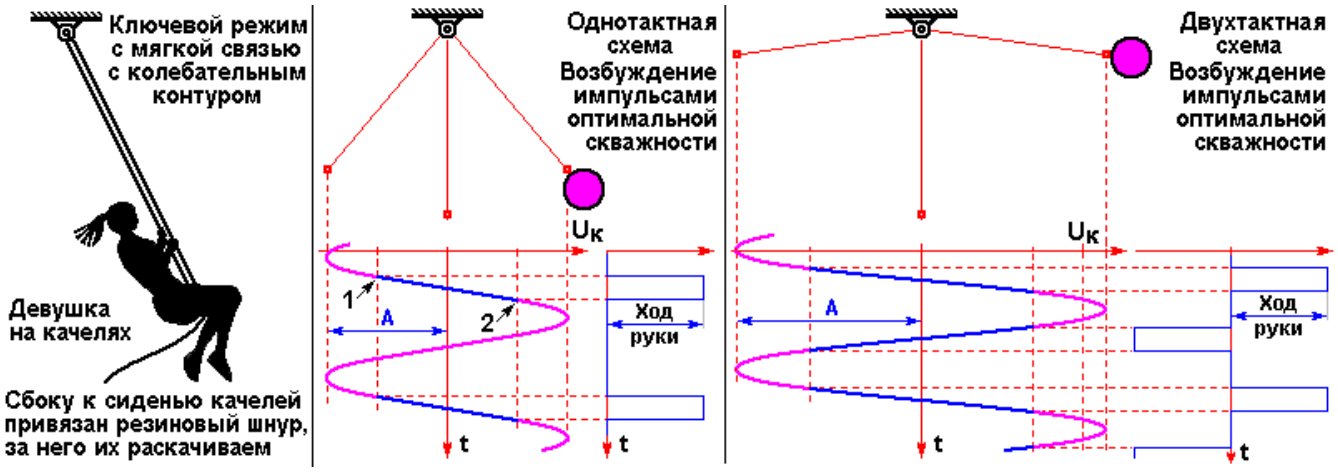


Рис. 3

при увеличении импульсного тока и может вообще свести усиление к единице.

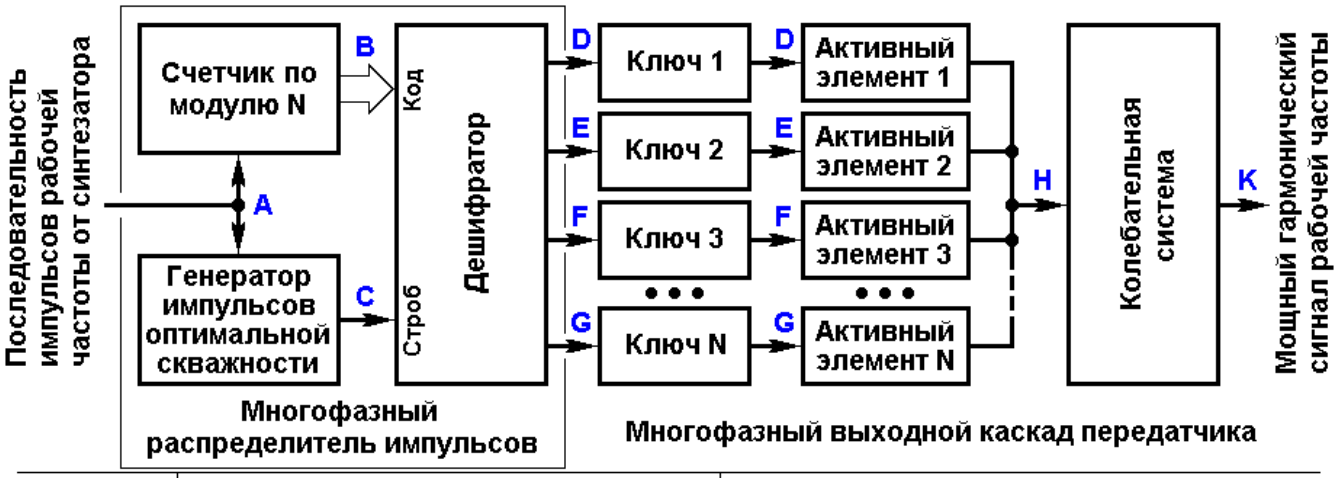
Рассматривая конструкцию и параметры транзисторов и импульсных вакуумных тетродов, вывод можно сделать в пользу радиоламп. Транзисторы здесь годятся только на раскачку. Причём, исключительно как ключ. Коммутируя катод выходной радиолампы на землю.

Особенно хороши для таких схем импульсные (токовые) радиолампы (гляньте, какой у них катод!), которые разрабатывались для схем выходных каскадов кадровой и строчной развёртки ламповых кинескопных телевизоров: 6П18П, 6П36С, 6П37Н-В, 6П41С, 6П42С, 6П43П, 6П44С, 6П45С. Эти лампы оптимизированы для работы в импульсном режиме со скважностью 64 / 14 = 4,57. Разумеется, при скважностях 5 или 6 им будет работать легче, и они смогут отдать в нагрузку больший ток. Мало того, у этих радиоламп малое остаточное напряжение на аноде при полностью открытой радиолампе. А это значительно повышает КПД по сравнению с другими типами радиоламп. Ну, и потом, они относительно низковольтны (Еа не более 450 вольт). Неплохо в таком режиме будут работать и металло-керамические тетроды ГУ-70Б, ГС-36Б и ГУ-74Б, правда, при значительно большем Еа. У них от катода выводятся четыре вывода, а по сему, стоит ставить 4 ключевых полевых транзистора, например, IRL510, возбуждаемых параллельно от 4-х мощных логических элементов 530ЛА12.

Ну, а теперь, собственно, про давно обещанное импульсное суммирование мощности [2].

Суть метода заключается в том, что в выходном каскаде поочерёдно 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



Точка схемы	Характеристика сигнала	Временная диаграмма при N = 4
A	Входной сигнал	
B	Диаграммы работы счетчика	
C	Импульсы оптимальной скважности	
D E F G	Диаграмма работы ключей управляемых дешифратором	
H	Суммарный ток активных элементов на входе колебательной системы	
K	Мощный гармонический сигнал рабочей частоты на выходе колебательной системы	

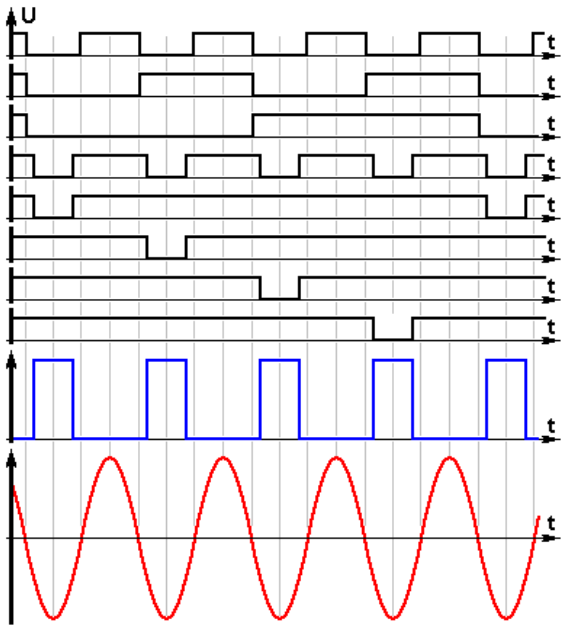


Рис. 4

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, в автоматических пушках с вращающимся блоком стволов, … По такому же принципу, вероятно, меняются любимые жены в гареме.

Предлагаемый способ суммирования мощности отличается от известных тем, что во время каждого рабочего полупериода 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. 4**).

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 (**рис. 1**, **рис. 2**) меньше половины периода рабочей частоты и определяется Формирователем (генератором) импульсов оптимальной скважности [3], который, в свою очередь, управляет Дешифратором по входу стробирования (**рис. 4**). 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.

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 сказывается 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 [4]. 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 fp/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**ф** ≤ 7 нс.

При использовании цифровых ИС с f**max** = 70 МГц (ТТЛШ 530 серии, 74Sxx) и драйверов с t**ф** ≤ 6 нс, максимальная рабочая частота передатчика составит 24 МГц.

Для ИС с f**max** = 150 МГц (КМДП 1554 серии или 74ACxx) и драйверов с t**ф** ≤ 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.

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

Комментарий автора

Идея многофазного выходного каскада передатчика пришла мне в голову летом 2009 г. В 2010 г. 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 Шахгильдяну Вагану Вагановичу. Прочитав статью, он сказал: "Бери 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 опубликованы в научных журналах, и их могут использовать в 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.

Я не жадный, и инженерной пенсии мне одному вполне хватает.

Литература

1. Комаров С.Н. Морозова А.П. Исследование усилителя мощности радиочастотных колебаний с многофазным возбуждением. - "T-Comm – Телекоммуникации и транспорт", Том 8, 2014, №10, стр. 33-38.

2. Комаров С.Н. Импульсное суммирование мощности активных элементов в многофазных выходных каскадах радиопередатчиков. - "T-Comm – Телекоммуникации и транспорт", Том 11, 2017, №5, стр. 9-14.

3. Комаров С.Н. Формирование импульсов оптимальной скважности для возбуждения многофазных выходных каскадов передатчиков. - "T-Comm – Телекоммуникации и транспорт", 2016, №11, стр. 29-33.

4. Комаров С.Н. Тертышникова А.В. Разработка и исследование многофазных синтезаторов радиочастот с мощным выходом. - "T-Comm – Телекоммуникации и транспорт", 2013, №9, стр. 97-99.

Индивидуальное (любительское) радиовещание:
http://www.cqf.su/