Импульсное суммирование мощности и многофазные выходные каскады передатчиков

НЕМНОГО ТЕОРИИ, НАДЕЮСЬ, ИНТЕРЕСНОЙ

Сергей Комаров (UA3ALW)
г. Москва

Решение задачи получения большого уровня полезной мощности в выходных каскадах радиопередатчиков пошло одновременно по четырём путям:

- создание мощных радиоламп (на этом пути транзисторы нервно курят в сторонке);
- параллельная работа нескольких радиоламп (здесь транзисторы тоже отдыхают);
- схемотехническое суммирование мощности нескольких выходных каскадов;
- сложение мощности передатчиков в эфире с помощью Фазированных антенных решёток.

Поясним.

1. **Мощные радиолампы.** Это первое, что приходит в голову. Нужна большая мощность – берём большую кувалду, большой экскаватор, большой самосвал, большой корабль, большой самолёт, большую бомбу… Перечисленные примеры всем знакомы. И большая радиолампа тоже существует, ну, например, ГУ-99А. Один мегаватт в непрерывном режиме.

И, вроде, всё прекрасно. Вот только при напряжениях анода выше 12 киловольт начинается рентгеновское излучение при торможении электронного потока на аноде. И весьма мощное. А при 10 киловольтах (при КПД около 70%) высокочастотный ток анода должен быть 1500 000 / 10 000 = 150 ампер. И для этого уже нужны не провода, и даже не шины. Это медные трубы вовсе не круглого сечения, а такого, чтобы при внутренней пустоте поверхность была бы максимальной (продольно-ребристые профили), потому, что ВЧ ток течёт не по телу проводника, а по его очень тонкой поверхности. К примеру, на частоте 1750 кГц толщина скин-слоя 50 микрон[1]. И даже при плотности тока 10 А/мм² (медь греется) потребуется сечение 15 мм². При толщине проводящего слоя 0,05 мм ширина поверхности должна быть 300 мм. Для трубы круглой формы её диаметр должен быть 95 мм. Для квадратной – 75х75. И внутри этих труб должна протекать охлаждающая жидкость. Когда вместо проводов – профилированные трубы, монтаж мощного передатчика по-простому, не получается. А если ещё вспомнить, что от радиолампы, размером с армейскую табуретку, надо отвести 500 киловатт тепла только от анода и ещё 30 кВт от цепи накала…

Проблема такого способа получения большой мощности – это сосредоточение тепла в одном месте – в радиолампе, и необходимость отвода этого тепла. Передатчик с большой выходной мощностью – это вовсе не блок или шкаф, – это, как правило, двух-, а то и трёхэтажное отдельно стоящее здание, к которому подходит ЛЭП и рядом расположена своя электроподстанция. На верхнем этаже здания расположены антенные переключатели и колебательные системы согласования фидеров, на втором этаже – собственно передатчик, мастерская и комнаты обслуживающего персонала, на первом этаже – первый контур охлаждения. Ко второму контуру охлаждения, помимо охлаждающих бассейнов или градирен, могут быть подключены системы отопления нескольких домов сотрудников, детский садик и поликлиника. Ну, что б зимой тепло не пропадало. Помимо этого, в отдельном звукоизолированном изнутри ангаре с толстыми кирпичными стенами располагаются модуляционный дроссель и трансформатор. И если ворота этого ангара открыть, то пение обмоток и сердечников слышно за несколько километров.

Ну, это так… краткий экскурс на передающий вещательный радиоцентр.

Инженеры, эксплуатирующие такой передатчик, имеют квалификацию, достаточную для его планового и аварийного ремонта, а также для модернизации. В СССР таких инженеров готовили. Сейчас, увы, их не стало, впрочем, как не стало и мощных передающих радиоцентров.

2. **Параллельная работа нескольких радиоламп**. Этот метод прост и хорошо знаком даже радиолюбителям, например, три ГУ-50 в параллель. Или 5 штук ГУ-81 (видел, смотрится жутковато, но выполнено красиво и работает хорошо!). Как известно из курса электротехники (теория электрических цепей), параллельно можно соединять источники тока с высоким внутренним сопротивлением и, соответственно, высоковольтным питанием. Для радиоламп – то, что доктор прописал! Именно поэтому такой способ плохо реализуется с транзисторами (они относительно низковольтны, внутреннее сопротивление у них невелико, по эквивалентной схеме они ближе к источнику напряжения, а их параллельно соединять не следует, выгорают).

При параллельном соединении нескольких радиоламп вопросы отвода тепла уже решаются проще. Здесь нет сосредоточения энергии в одной точке. Соответственно, меньше токи в проводниках у каждой радиолампы. Самый первый вариант суммирования мощности двух радиоламп был реализован на заре

[1] Для частоты 28 МГц толщина скин слоя – 12,5 микрона. Поэтому выше 30 МГц ВЧ проводники серебрят.

развития радиотехники, в виде двухтактного выходного каскада. Схема классическая и известна всем радиолюбителям. Однако у двухтактной схемы есть недостаток – необходим подбор двух радиоламп по близким не только параметрам, но и по характеристикам[2]. Мало того, необходимо выполнить монтаж двухтактного каскада строго симметрично. Симметричной должна быть и выходная колебательная система. В каждом плече двухтактного выходного каскада можно применить параллельное соединение нескольких радиоламп.

3. **Суммирование мощности нескольких выходных каскадов.** Вот это уже полностью транзисторная епархия! Синфазные и квадратурные мосты сложения на LC элементах, на коаксиальных кабелях, на микрополосках… Практически все современные мощные УКВ и СВЧ радиопередатчики строятся так. Если применять транзисторы мощностью по 300 Вт, то для киловаттного передатчика потребуется 4 штуки. Для 10 киловаттного – 64 штуки. Не забываем про КПД мостов сложения и про неизбежные потери мощности при разбалансе мостов (в них даже балластный резистор предусмотрен в схеме).

Специально для схем суммирования мощности производители выпускают двойные транзисторы на едином основании (одинаковые, выполненные на одном кристалле). Конструкция такого транзисторного передатчика получается очень дорогая и довольно сложная в регулировке при производстве и ремонте. Как правило, силами работников радиоцентра ремонт блоков транзисторного усилителя мощности невозможен, и в случае выхода из строя их отправляют на завод. С одной стороны – передатчик, вроде бы, долговечнее (у транзисторов ресурс выше, чем у радиоламп), с другой, из-за большого числа радиоэлементов надёжность снижается, снижается и время наработки на отказ. Вроде, при переходе на транзисторы, должно быть лучше, но, к сожалению, так бывает не всегда. **Транзисторы хороши там, где не очень мощно и не очень высокочастотно**. Как только мы выходим за эти границы, то вспоминается пословица: **Меняем старое, но хорошее, на новое, но плохое.** Транзисторы при больших мощностях и при очень высоких частотах – плохое решение. Полагаю, радиолампы еще поживут в передатчиках очень долго. И нашим детям, внукам и правнукам радиолампы будут служить верой и правдой.

То же самое актуально и в космосе. Спутниковые передатчики с выходным каскадом на ЛБВ[3] имеют гарантийных ресурс беспрерывной работы 15 лет (это больше 130 000 часов). Мощные СВЧ транзисторы в условиях космической радиации, подобраться к такому ресурсу не могут даже на порядок. А каждый лишний запуск спутника ретранслятора стоит очень дорого.

4. **Сложение мощности передатчиков в эфире**. Ставим несколько радиопередатчиков, работающих на одно антенное поле, состоящее из однотипных антенн. Запитываем передатчики от одного опорного генератора или от одного возбудителя. Между возбудителем и передатчиками ставим фазовращатели. Каждый передатчик нагружен на свою антенну. Антенны, в свою очередь, могут быть разнесены на несколько длин волн. Выбирая сдвиг фаз в каждом фазовращателе, можно сформировать сложную диаграмму направленности результирующей антенной системы. Мало того, можно оперативно менять направление главного максимума излучения в пространстве, не производя при этом никаких механических передвижений антенн. Вот в двух словах описан принцип работы ФАР[4].

Теперь построим наклонную панель, размером, к примеру, 100х100 метров. Или две таких панели в виде шалаша (вспомнили?). И расположим на её поверхности, обращённой наклонно к небу, 20 х 20 = 400 широкополосных объёмных диполей. Каждый диполь подключим к блоку, содержащему в своём составе радиопередатчик, мощностью всего лишь в пару десятков ватт и управляемый от компьютера фазовращатель. Если все передатчики заработают синфазно, и панель, как зеркало, отправляет излучение в одну сторону, то в направлении нормали к наклонной поверхности сформируется луч с подводимой мощностью 20 х 400 = 8 кВт при усилении антенны в 26 + 3 = 29 дБд. Или 31,15 дБи. Соответственно, ЭИИМ = 10,425 мегаватта. О-как!

Полагаю, в Интернете вы встречали фотографии таких антенных систем.

Теперь всё то же самое перенесём в диапазон СВЧ. Панель сделаем круглую, диаметром немного более полуметра. Уменьшим мощность каждого блока, к примеру, до одного ватта. Помимо передатчика добавим в блок радиоприёмник и будем быстро переключать антенну с приёма на передачу, ну, например, p-i-n диодами. Естественно, управлять блоками будет компьютер. В зависимости от программы, работающей на компьютере, такая ФАР может формировать один тонкий луч большой интенсивности или несколько пропорционально более толстых лучей меньшей интенсивности. И произвольно крутить каждый луч в полусфере. То есть, если это радиолокатор, то видеть далеко и зорко, или близко, но с такой же зоркостью, поскольку при приближении пятно от луча уменьшается пропорционально приближению.

Полагаю, фотографии таких антенн вы также находили в Интернете. В СССР они появились в середине

[2] Вопросы терминологии: Параметры – это числа. Характеристики – это графики зависимостей.

[3] ЛБВ – лампа бегущей волны. Электровакуумное устройство СВЧ диапазона – ламповый усилитель мощности.

[4] ФАР – фазированная антенная решётка.

60-х, начале 70-х, когда наши НИИ разработали, а заводы освоили серийный выпуск кремниевых СВЧ транзисторов. Естественно, не для ширпотреба.

Это кратенький обзор. Думаю, было интересно. А теперь перейдём к тому, ради чего этот обзор затеян. Я расскажу по-простому, буквально на пальцах, про **пятый путь суммирования мощности**, который придумал сам и который описан в моих научных статьях в серьёзных журналах, с ВАК-овской аккредитацией [1, 2, 3, 4].

Итак, поехали: **Импульсное суммирование мощности активных элементов и многофазные синтезаторы и радиопередатчики.**

Идея такого суммирования мощности не нова. Возьмём 4-цилинровый ДВС. Цилиндры работают по очереди, каждый отдавая на вал двигателя с маховиком энергию сгорания топлива в его камере сгорания. Если двигатель 4-тактный, то при четырёх цилиндрах можно каждый такт сделать рабочим. Фазовая диаграмма работы большинства 4-цилинровых двигателей – 1, 3, 4, 2.

А можно ли вместо 4-х цилиндров поставить 8, 12, 16, 24, 32 или даже 48? Можно. Есть 8-и и 12-и цилиндровые автомобильные двигатели, есть и 24-х и 48-и цилиндровые корабельные.

Поставим вместо цилиндров ДВС четыре электромагнита с многовитковыми катушками, втягивающих в себя стальные сердечники, и с тем же самым, что и у ДВС коленчатым валом. Получим весьма мощный электромагнитный двигатель с рабочим углом каждого “цилиндра” 90 градусов. Были такие двигатели, но недолго. Предвестники шаговых двигателей. Достоинство – огромный пусковой момент и большое усилие на валу даже при малых оборотах. Электромагнит с рычагом – ого-го как тянет! Недостаток – относительно низкий КПД из-за наличия кривошипно-шатунного механизма.

Вспомнив, что максимальное усилие к проводнику с током в магнитном поле прикладывается при пересечении им магнитных силовых линий под углом 90 градусов, сообразим, что число таких проводников должно быть как можно больше, а рабочий угол – как можно меньше, чтобы минимально отходить от положения с максимальным усилием. И вынув и внимательно рассмотрев ротор из любого двигателя постоянного тока (ДПТ), увидим именно такую конструкцию. Мало того, современные ДПТ сразу передают вращение на вал, минуя кривошипно-шатунный механизм, что сильно увеличивает не только КПД, но и срок службы – меньше движущихся и трущихся деталей.

А теперь переложим эти принципы на выходной каскад передатчика.

Вал двигателя с маховиком – это выходная колебательная система. Цилиндры, или катушки ротора – это активные элементы – радиолампы или транзисторы. Далее следует выбрать фазовую диаграмму и соединить активные элементы так, чтобы они могли по очереди отдавать энергию в колебательную систему не за один период колебаний, а за несколько. Вот, собственно, и всё, что я придумал. Как видите – просто и, в общем-то, лежало на поверхности.

Далее возникают несколько вопросов, на которые я тоже нашёл ответы:

- Раскачивать колебательную систему будем не косинусоидальными импульсами, как принято в классической теории радиопередатчиков, а прямоугольными. Их удобнее формировать с использованием цифровых интегральных микросхем. Да и КПД можно получить выше.

- Длительность воздействия прямоугольного импульса активного элемента на колебательную систему определим, не поделив 360 градусов оборота вала на число активных элементов (в ДВС это цилиндры), а исходя из оптимального соотношения длительности ударного возбуждения к постоянной времени колебательного контура. Это исследование я провёл в уме ещё в 2010 году, а математически, на бумаге, оно было представлено аналитическим моделированием в магистерских диссертациях моих дипломниц в 2012-м, и опубликовано в научном журнале в 2013-14 годах [1, 2].

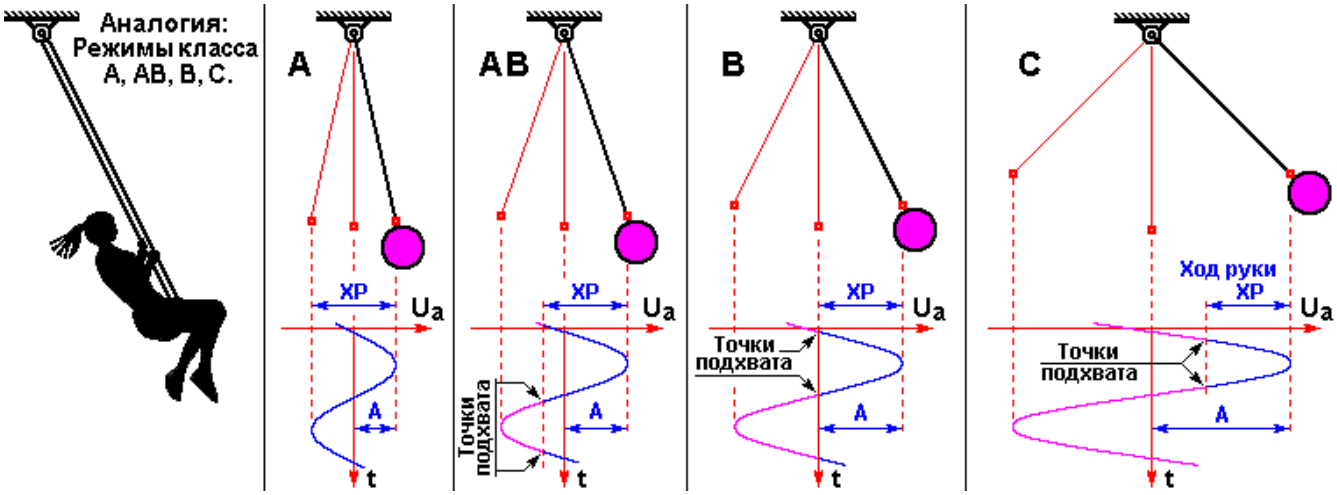


Рис. 1. Девушка на качелях или маятник – полный аналог колебательного контура

Более наглядно оптимальную длительность воздействия возбуждающего импульса на колебательный контур можно наблюдать на примере маятника или обычных дворовых качелей. Начнём с аналоговых и интуитивно-понятных методов. Представьте себе, что вы усадили на качели свою любимую девушку и, встав сбоку и взявшись рукой за слегу качелей, стали их раскачивать. А вот это можно делать по-разному. Для начала разберёмся с красивой аналогией (**рис. 1**).

1. Можно взять рукой за слегу и водить её туда-сюда. Само-собой, получится – по синусоиде. Так делают бабушки, качая на качелях маленьких детей. Однако рука у бабушки при таком качании быстро устаёт. Но бабушка, вцепившись в качели, ни на мгновение не даст им свободно качаться – а, вдруг, её малыш упадёт? Это полная аналогия Режима класса А. Низкий КПД и размах сигнала не превышает хода бабушкиной руки (амплитуда – половины напряжения питания).

2. Мамы качают своих детей немного по-другому. Держат слегу качелей, отводя руку назад, а когда малыш проходит нижнюю точку и устремляется вперёд, на некоторое время отпускают руку (что б не тянуться за улетающими вперёд качелями), и на небольшую часть периода колебаний качелям предоставляется свободное движение. Поскольку это происходит в поле зрения мамочки, это ей кажется вполне безопасным, и она отпускает руку. Это – Режим класса АВ.

3. Если мамочка не полностью поглощена своими материнскими инстинктами, а способна к обучению (редко, но бывает), интуитивно анализируя собственный опыт, то довольно быстро она придёт к Режиму класса В, когда держится за качели и раскачивает их только, когда они улетают назад и мылыш не находится в поле её зрения. Когда же качели проходят нижнюю точку, она спокойно отпускает руку, давая качелям свободу на вторую половину периода колебаний. Так раскачивать качели гораздо легче (КПД выше), а у мамочки и без этого есть от чего уставать.

4. Молодые отцы качают своих детей иначе. Ну, ведь каждый мужчина в душе мальчишка вне зависимости от возраста (ботаники не в счёт – они по натуре ближе к бабушкам). А в своём детстве, будучи озорным мальчишкой, он всегда мечтал не только раскачаться “до железки”, но и найти в соседних дворах качели, на которых можно прокрутить “солнышко”. В конце 40-х и начале 50-х годов прошлого века фронтовики, бывало, делали такие качели в своих дворах, чтобы сыновья росли смелыми. Одевали на верхнюю стальную перекладину подшипники от ходовой танка и приваривали к внешним ободам подшипников стальные прутки или полудюймовые трубы, на которых крепили сиденье качелей из широкой доски на двух стальных уголках. В те годы качели в каждом дворе жители делали сами. Централизованно никто детских площадок не строил. Надо было после войны страну восстанавливать, а не ерундой заниматься и, зачастую, мальчишки играли на стройках. Сам помню, как в конце 50-х, начале 60-х по бетонным плитам бегали и прыгали, играя в салочки! И никто не травмировался! Нынешние мамашки бы со страху попадали.

Так, вот, про способ качания у папаш. Они встают не сбоку от качелей, а немного сзади и раскачивают качели на небольшой части периода их колебаний, когда рука со слегой уходит назад. Большую же часть периода колебаний, находясь в поле зрения, качели предоставлены свободному полёту. Наглядная иллюстрация Режима класса С.

Ну, вроде, всё. Разве существуют ещё какие-то способы?

Для синусоидального раскачивания иных способов нет. Но кто вам сказал, что импульс раскачивания должен обязательно быть синусоидальным? Да, качели, как колебательная система, качаются по синусоиде. А вот раскачивать их, как и LC контур, можно очень по-разному!

Но об этом – в следующем номере.

Литература

1. 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.

2. 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.

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. Импульсное суммирование мощности активных элементов в многофазных выходных каскадах радиопередатчиков”. “T-Comm – Телекоммуникации и транспорт” Том 11, 2017, №5, стр. 9-14.


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