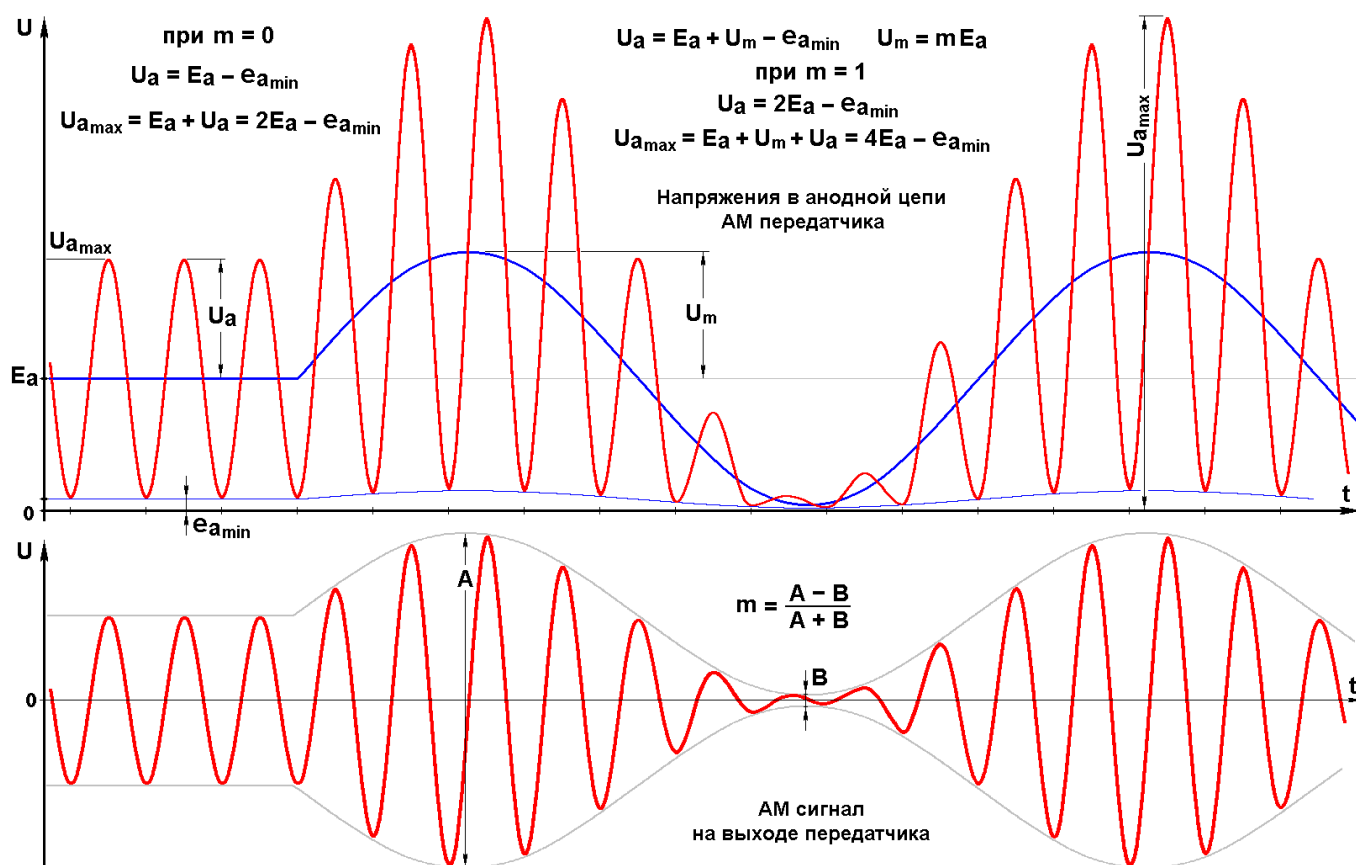


# Ключевой тракт формирования несущей АМ передатчика

Сергей Комаров (UA3ALW)

*Индивидуальные радиовещательные станции работают в диапазонах частот, где действуют жесткие, профессиональные нормы на качество вещательного сигнала. Обеспечить профессиональное качество сигнала при непрофессиональном изготовлении передатчиков студентами, членами радиокружков и любителями, помогают цифровые технологии и новый подход в проектировании тракта формирования несущей.*

Поскольку с начала 60-х годов прошлого века почти все КВ радилюбительское сообщество, включая инженеров-разработчиков связной радиоаппаратуры, бредило однополосной модуляцией и старательно забывало старую и добрую АМ, используемую во всем мире в КСДВ радиовещании, то при проектировании передатчиков для Индивидуального радиовещания необходимо вспомнить основные принципы АМ и как ее правильно получать (Рис. 1).



По определению: если модуляция амплитудная, значит, в такт со звуковым модулирующим сигналом изменяется амплитуда ВЧ колебаний на выходе передатчика. И еще. Поскольку при вещании передатчик работает в эфире непрерывно, часами, то актуален его тепловой режим, КПД и ресурс; он должен быть надежен, повторяем в домашних условиях, и радиолампы в выходном каскаде должны работать в щадящих режимах. Форсирование радиоламп, как это почти повсеместно принято в любительской радиосвязи, здесь недопустимо. Иначе их не напасетесь.

Ну, то, что в выходном каскаде АМ передатчика должны быть радиолампы, – сомнения не вызывает: мощность – десятки, сотни ватт, вещательная АМ должна быть линейной, схема – простой, конструкция – повторяемой и бюджетной, передатчик – надежным и работающим, даже когда на антенне (протяженностью в десятки метров) наводится статическое электричество и импульсные разряды в сотни киловольт. Расклад далеко не в пользу транзисторов. Сделать-то, на транзисторах АМ передатчик, конечно, можно, но получится сложнее, дороже и, ой, как не факт, что надежней, и что получим хороший КПД. И потом, в транзисторных схемах, как правило, очень сложная регулировка. А где взять приборы? И с повторяемостью, - тоже не однозначно...

Подробное описание всевозможных способов реализации АМ рассмотрено в замечательной книге [1], а мы для Индивидуального радиовещания будем использовать на выходе передатчика тетроды или пентоды и исключительно анодно-экранную модуляцию.

Остальные способы АМ либо не обеспечивают «музыкальную» линейность модуляционной характеристики, либо не дают приемлемый КПД. Однако стоит заметить, что в маломощных АМ передатчиках (единицы и первые десятки ватт), если не учитывать КПД, то наимузыкальнейшее звучание обеспечивает модуляция по защитной сетке с одновременной автоэкранный модуляцией (Г-411, ГУ-50) [17].

В радиовещательных АМ передатчиках тракт формирования несущей делается нелинейным, с высоким КПД, в режимах классов В, С, или даже, в ключевых режимах, а затем, в выходном каскаде, с помощью мощного модулятора, производится анодно-экранный модуляция (АЭМ).

Напряжение питания на аноде лампы на пике модуляции  $E_m = E_a + U_m$  может достигать почти двойного значения источника анодного напряжения, а высокочастотный пик – почти до  $4E_a$ . Как наиболее оптимально и с наименьшими затратами спроектировать мощный источник питания, напряжение которого изменяется по закону модуляции, было подробно описано в [4] а ТЗ на разработку импульсного АМ модулятора с ШИМ – в [5]. Требования к вещательному сигналу такие же, как и в профессиональном радиовещании (мощности, только меньше), нормы ГКРЧ - закон, и слушатель не должен замечать разницы в качестве сигнала на профессиональных и самодельных радиостанциях: сигнал в эфире и там, и там одинаковый: 16K0A3EGN. Делать лучше, линейней и музыкальней, в той же полосе частот – можно. Хуже и широкополосней – нельзя. Поэтому многому придется учиться сызнова.

*При проектировании АМ вещательных передатчиков принцип построения связных SSB передатчиков, в которых сигнал формируется на малом уровне, а затем линейно усиливается до нужной выходной мощности, не приемлем (требует стабилизации режима, тонкой регулировки, имеет сложную схему, и низкий КПД). Усилить АМ сигнал – это технически безграмотное решение, имеющее КПД на уровне 15 ... 20 %. По этой же причине с АМ передатчиками не используют усилители мощности, а делают выходной каскад с модулятором и источником питания сразу на нужную мощность. Нужен передатчик мощнее – делают новый, а старый оставляют в качестве экспедиционного или дачного.*

Теперь про выходную мощность радиопередатчика. В режиме несущей – все понятно. Делим квадрат амплитуды выходного напряжения  $U_a$  на удвоенное сопротивление нагрузки пересчитанное в анодную цепь, – получаем выходную мощность. А вот при модуляции нас ждет сюрприз: на пике модуляции выходное напряжение-то удвоилось! Стало быть,  $U_a^2 / 2R_a$  стало в 4 раза больше! Запомним, что АМ передатчик с АЭМ и мощностью несущей 25 Вт имеет мгновенную мощность на пике 100% синусоидальной модуляции - 100 Вт, а среднюю, так называемую, «телефонную» – 37,5 Вт. Добавку мощности к источнику питания выходного каскада дает мощный модулятор – его энергия не пропадает попусту. И это нужно учитывать при проектировании, то есть, считать режимы ламп не только на несущей, но и на пике модуляции. Каскады предварительного усиления должны обеспечить для выходного каскада возбуждение, достаточное, чтобы он смог выдать в нагрузку четырехкратную мощность. И сделать это надо грамотно, надежно и с высоким КПД.

Поскольку к тракту формирования несущей АМ передатчика нет требования линейности (мы ничего линейно не усиливаем), сделать его можно полностью в ключевых режимах (Рис. 2). Это позволит обеспечить простоту регулировки (ее вообще нет) и идеальную повторяемость.



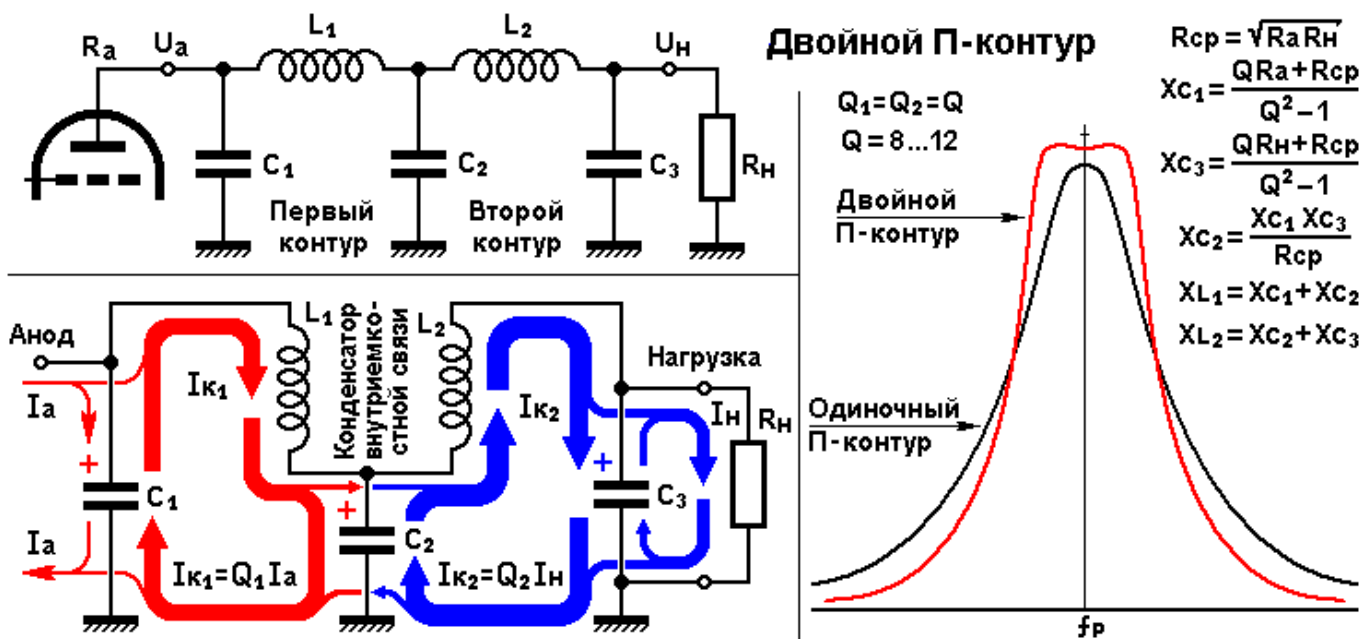
Этой статьей я представляю новую идеологию построения передатчиков как вещательных, так и связных. Это многофазные ключевые передатчики<sup>1</sup>. На существующей элементной базе такие передатчики могут быть реализованы без лишних сложностей до частот 20 ... 25 МГц.

<sup>1</sup> Это мое летнее изобретение 2009 года. В 2010 году, когда 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 Шахгильдян Вагану Вагановичу, он, прочитав статью, сказал мне: «Бери патент!» Однако, ознакомившись с действующим законодательством в области патентного права, я решил отказаться от патентования, поскольку это противоречит моим жизненным принципам. Все свои разработки, статьи и изобретения я делаю во благо развития радиотехники, а не для того, чтобы грабить тех, кто будет применять их и внедрять. Мои разработки могут использовать в своих конструкциях Индивидуальные вещатели, радиолюбители, инженеры и техники совершенно бесплатно. Я люблю радиотехнику и изобретаю новые идеи не ради узурпации прав на них и не ради денег, а ради вдохновения. Если понравилось – внедряйте и пользуйтесь. Мне это будет греть душу.

Как видим, аналоговые гармонические колебания присутствуют только после выходной фильтрующей системы. А это означает, что передатчик прост в настройке, легко повторяем, надежен и стабилен по параметрам. Мало того, во всех предварительных каскадах ему не нужны встроенные измерительные приборы: цифра – мерить-то нечего. Даже в выходном каскаде режим ламп жестко задан длительностью возбуждающего импульса, и настройка требуется лишь в выходной колебательной системе – на рабочую частоту и параметры антенны, где она ведется «на максимум», и вполне достаточно индикатора типа «больше-меньше». С такой задачей прекрасно справляется простейший вакуумный электронно-световой индикатор «зеленый глаз» [5]. Красиво и наглядно. В передатчиках мощностью более 100 Вт можно использовать лампочку накаливания на трансформаторе тока антенны и неоновую лампочку в горячей точке контура. Светодиоды, увы, там менее наглядны - по светодиоду не увидишь самовозбуждения, а неонка на разных частотах горит разными оттенками, и ВЧ самовозбуждение сразу видно по синеватому свечению. Во всем передающем тракте (не считая синтезатора) лишь один колебательный контур – на выходе. Правда, двойной. И нет ни одного контура в предварительных каскадах. И это еще одна прелесть ключевого (нелинейного) тракта формирования несущей АМ передатчика.

### Двойной П-контур.

Поскольку выходной каскад работает в ключевом режиме, необходима лучшая фильтрация, чем если бы он работал с отсечкой анодного тока в режимах класса В или С. Поэтому на выходе передатчика применен двойной П-контур. У него и КПД выше, чем у одиночного. Двойной П-контур представляет собой два параллельных контура, с критической внутриемкостной связью. Благодаря внутриемкостной связи (большая емкость конденсатора связи  $C_2$ ) у контура очень хорошая фильтрация высших гармоник, в  $Q$  раз большая по сравнению с одиночным П-контуром, а благодаря критическому уровню связи, широкая полоса пропускания и повышенное подавление внеполосных излучений (скаты АЧХ более крутые)[13].



Разберем принцип работы. Будем считать, что оба контура настроены в резонанс на рабочей частоте. Анодный ток  $I_a$  возбуждает в первом контуре колебания. При этом контурный ток первого контура будет в  $Q_n$  раз больше, чем ток анода ( $Q_n$  - добротность контура с учетом влияния подключенной нагрузки).  $Q_n$  обычно выбирают в пределах  $8 \dots 12$ . Чем ниже нагруженная добротность, тем выше КПД, но хуже фильтрация. Для одиночного П-контура этот компромисс находится при  $Q_n = \sqrt{Q_{xx}}$ , где  $Q_{xx}$  – добротность катушки контура на рабочей частоте, которая обычно лежит в пределах  $200 \dots 250$ . Для двойного П-контура значение  $Q_n$  можно выбирать ниже. С увеличением  $Q_n$  значительно растут контурные токи. К примеру, если амплитуда переменной составляющей тока анода 250 мА (мощность передатчика 50 Вт), то амплитуда тока первого контура составит от 2 до 3 ампер (при напряжении в сотни вольт). Этот же ток течет через конденсатор  $C_1$ , и через катушку  $L_1$ . Поэтому конденсаторы нужно выбирать на большую реактивную мощность, а катушки мотать проводом большого сечения. В диапазонах длинных и

средних волн (приблизительно до 2,7 – 3-х МГц) мотать их, однозначно, литцентратом; в диапазонах коротких волн – тонкостенной медной трубкой (с толщиной стенки 0,3 – 0,5 мм).

Далее. Ток первого контура, проходя через конденсатор внутриемкостной связи  $C_2$  создает на нем падение напряжения  $U_2 = I_a Q_1 X_{C_2}$  (закон Ома). Поскольку емкость  $C_2$  больше емкости  $C_1$  приблизительно в 12 - 15 раз, на  $C_2$  будет создано падение напряжения во столько же раз меньшее, чем напряжение на аноде лампы, ориентировочно 20...30 вольт. Именно это напряжение и является источником возбуждения второго контура. Второй контур работает при более низких напряжениях, чем первый, а это означает, что при той же мощности, токи в нем гораздо больше. К примеру, при мощности передатчика 50 Вт на нагрузке 75  $\Omega$  ток второго контура составит 9,2...14 ампер. Таким образом, катушка второго контура, хоть и имеет небольшую индуктивность, но должна быть намотана, литцентратом двойного плетения, например, свитым в семеро: 7 x ЛЭШО-49x0,1. В нагрузку же ответвится ток, в  $Q_2$  раз меньший, чем контурный ток второго контура. На рисунке 2 показаны значения токов в схеме с помощью толщины цветных линий.

### Двухфазный передатчик.

Синтезатор частот [7], внешний опорный генератор [8], модулятор [4] и к нему УМЗЧ [14], индикатор настройки [5] и источник питания [15] для этого передатчика уже опубликованы. Осталось лишь все собрать вместе! Да и самому разработать синтезатор на жесткой логике на базе ФАПЧ с мощным выходом, большого труда не составляет [16]. Правда, для таких синтезаторов лучше использовать логические ИС ТТЛШ 533 и 530 серий. Они более устойчиво работают в мощных ВЧ полях, чем К-МОП-ы. Микропроцессоры и контроллеры в синтезаторе вещательного АМ передатчика применять не надо: мощности большие, напряжения высокие, токи, и наводки в схеме огромные... , вероятность сбоя процессора в непрофессиональной самодельной конструкции велика, а это в радиовещании недопустимо. За работу не на разрешенной частоте или за помехи другим станциям в вещательном диапазоне Роскомнадзор штрафует, а может и вообще лишит права работы в эфире. В эфирном публичном радиовещании законодательство соблюдается гораздо строже, чем в любительской радиосвязи, закрытой от массовой аудитории слушателей.

В схеме синтезатора С9-1449-1800 на выходе установлен двухфазный формирователь импульсов и два ключевых выходных каскада на транзисторах КТ608Б с открытым коллектором. Такой выход предназначен для управления по цепи катода двумя импульсными «строчными» радиолампами 6П37Н-В или 6П44С, впрочем, «кадровые» 6П43П тоже прекрасно здесь работают. В качестве опции (Рис 22 в [7]) приведена схема включения на его выходе двух мощных полевых транзисторов IRL510. Благодаря этому синтезатор может управлять по цепи катода двумя более мощными ключевыми радиолампами 6П36С и 6П45С. Лампы работают по очереди, через такт, каждая со скважностью 5. – По аналогии: как будто, два юноши раскачивают девушку на качелях, по очереди, через период, сначала один, потом – другой. Налицо бережное отношение к эмиссии катода каждой лампы и, как следствие, к их ресурсу (пока второй юноша раскачивает, первому можно отдохнуть), что актуально для вещательных передатчиков, работающих длительное время. Радиолампы в выходном каскаде работают в режиме класса  $F_{inv}$  на половинной частоте. То есть, когда анодный ток имеет форму прямоугольного импульса оптимальной длительности (лампа управляется по катоду ключевым транзистором), а напряжение на аноде близко к синусоиде (в нагрузке – колебательный контур) – и качели с девушкой, несмотря на импульсные искажающие усилия, все-таки качаются почти синусоидально (Рис. 4, график  $U_a$ ).

Использование в выходных каскадах АМ передатчиков токовых телевизионных «строчных» и «кадровых» радиоламп обусловлено их предназначением работать в импульсных режимах и большим нормируемым ресурсом. Немаловажно и то, что в СССР их произвели огромное количество, и они до сих пор сохранились на складах. Совпадает и скважность их типового импульсного режима [9] с оптимальной скважностью для режима  $F_{inv}$  при возбуждении контура прямоугольными импульсами тока. Это совпадение и требование повторяемости и стабильности параметров навело на мысль [11] разработать для Индивидуального радиовещания полностью ключевой тракт формирования несущей.

Синтезатор С9-1449-1800 [7] включает в себя все три первых каскада (Рис. 2), имеет на каждом своем выходе открытый коллектор (или открытый сток) и подключается к выходному каскаду передатчика следующим образом (Рис. 4):





Поскольку выходной каскад передатчика работает в ключевом режиме, то на выходе схемы применен двойной П-контур, обеспечивающий по сравнению с одиночным (используемым в аппаратуре радиосвязи) лучший КПД, лучшую фильтрацию гармоник и в  $\sqrt{2}$  раз более широкую полосу пропускания. Инженерный расчет выходной колебательной системы приведен в [12].

На выходе передатчика установлен трансформатор тока [5], как датчик для индикатора его уровня при настройке, и за ним защитный разрядник с большим числом искровых промежутков – Ир<sub>1</sub>, предохраняющий передатчик от статического напряжения и импульсных наводок на антенну [18]. В простейшем варианте в качестве такого разрядника можно использовать автомобильную свечу зажигания, установив ей зазор между электродами в 0,3 мм.

## Литература.

1. **Агафонов Б. С.** Теория и расчёт радиотелефонных режимов генераторных ламп. - М.: Советское радио, 1955.
2. Решение Государственной комиссии по радиочастотам при Минкомсвязи России от 24 мая 2013 г. № 13-18-03 "Об утверждении Норм 17-13, Норм 18-13, Норм 19-13, Норм 24-13".
3. Регламент радиосвязи. Русское издание. Международный союз электросвязи, 2004 г.: <http://www.cqf.su/regulation/RR2004-Vol1-r.pdf> ; <http://www.cqf.su/regulation/RR2004-Vol2-r.pdf>
4. **Комаров С.** Параллельный анодно-экранный модулятор. Радио, 2015, № 4, с. 30...33. Оригинал статьи: <http://www.cqf.su/technics/technics3-1.html>
5. **Комаров С.** Индикатор настройки передатчика на основе "зелёного глаза". Радио, 2015, № 7, с. 30, 31, 3-я стр. обложки. Оригинал: <http://www.cqf.su/technics/technics51-indikator-toka.php>
6. **Комаров С.** Передающий тракт Индивидуального радиовещания. Радио, 2015, № 9, с. 30...33. Оригинал статьи: <http://www.cqf.su/technics/technics0.shtml>
7. **Комаров С.** Средневолновый радиовещательный синтезатор частоты. Радио, 2012, № 9, с. 19-23; № 10, с. 21-23. Это и есть Синтезатор С9-1449-1800: <http://www.cqf.su/technics4-1a.html>
8. **Комаров С.** Опорный генератор для СЧ и ВЧ синтезаторов частот. Радио, 2014, № 6, с. 23-25. Это ОГ2-1024. Оригинал статьи: <http://www.cqf.su/technics/technics4-2.html>
9. **Кацнельсон Б. В. и Ларионов А. С.** Отечественные приемно-усилительные лампы и их зарубежные аналоги. Справочник. Изд. 2-е. Москва, «Энергия», 1974.
10. **Комаров С.** Средневолновый радиовещательный АМ радиопередатчик малой мощности (школьный): <http://www.cqf.su/technics/transmitter-10W-p1.shtml>
11. **Комаров С.Н., Морозова А.П.** Исследование усилителя радиочастотных колебаний с многофазным возбуждением. Т-Comm, Телекоммуникации и транспорт № 10-2014 (Том 8), стр. 33...38. Текст статьи: [http://www.cqf.su/technics/Nom-10-2014\\_33-38.pdf](http://www.cqf.su/technics/Nom-10-2014_33-38.pdf)
12. **Комаров С.** Расчет выходной колебательной системы для средневолнового передатчика с одноконтурным выходным каскадом на лучевых тетрадах (пример для мощности 50 Вт). Оригинал статьи: <http://www.cqf.su/technics/WKS-2f-50.html>
13. Проектирование радиопередатчиков устройств. под ред. д.т.н. В. В. Шахгильдяна, М. «Радио и связь», 1984.
14. **Комаров С.** Ламповый оконечный двухтактный усилитель на 6Н23П и 6П43П. - Радио, 2008, № 8, с. 49, 50; № 9, с. 45-48; № 10, с. 47, 48. Оригинал статьи на сайте автора: <http://www.radiostation.ru/home/usilitel-stud.html>
15. **Комаров С.** Источник питания для экспериментов с ламповыми схемами. Радиолобитель 2016, № 11, стр. 24 – 27. Оригинал статьи: <http://www.cqf.su/technics/PS-Sint-Udv.html>
16. **Е. Голомазов, М. Доугалиев, Б. Канаев.** Простой средневолновый синтезатор частоты. Радио, 2014, № 2, стр. 19 – 22.
17. **Шадский А.** Оконечный каскад и модулятор любительского передатчика. Радио, 1963, № 3, стр. 30, 31.
18. **Комаров С.** Защитный разрядник на выходе маломощного, средневолнового радиовещательного АМ передатчика. Радиолобитель, 2016, № 12, стр. 19 – 21. Оригинал статьи: <http://www.cqf.su/technics/Razryadnik.html>