

Виктор Беседин (UA9LAQ)

г. Тюмень

E-mail: ua9laq@mail.ru

## Просто о П-контуре

П-контур получил своё название из-за похожего на русскую букву П (или греческую  $\pi$ ) изображения на принципиальных схемах (рис. 1).

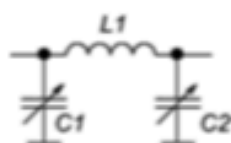


Рис. 1. П-контур. Графическое изображение на принципиальных схемах

Являясь, по сути дела, фильтром нижних частот (ФНЧ), П-контур, будучи оптимально настроенным, обеспечивает фильтрацию проходящего через него переменного тока от гармонических, т.е., кратных по частоте в целое число раз основному, колебаний. Физически П-контур состоит из двух Г-образных цепей, представляющих собой единое целое (рис. 2).

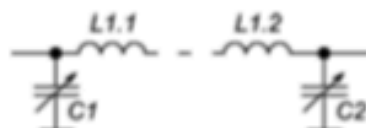


Рис. 2. П-контур состоит из двух Г-образных цепей

С одной стороны, Г-образные цепи, уже сами, будучи включенными между входом в средней части и нагрузкой одной Г-образной цепи и входом и нагрузкой в средней части другой Г-образной цепи, представляют собой ФНЧ, с другой стороны, относительно нагрузок,

Г-образные LC-цепи являются ещё и последовательными резонансными контурами относительно общего провода (шасси). Для получения П-контура, сводим обе Г-образные цепи в единую и получаем общую индуктивность  $L1$  и ёмкости  $C1$  и  $C2$  (рис. 1). Эквивалентная схема для идеального П-контура будет выглядеть так (см. рис. 3).

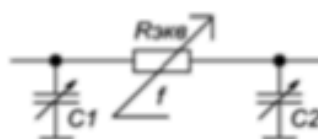


Рис. 3. Эквивалентная схема для идеального П-контура

Отметим сразу, что замещающий индуктивность резистор  $R_{экв}$  является частотозависимым, т.е., его сопротивление зависит от частоты тока действующего в П-контуре: чем частота выше, тем сопротивление  $R_{экв}$  больше. Входной высокочастотный ток первой гармоники (полезной частоты) проходит через  $R_{экв}$  (в идеале) без ослабления, т.е.,  $R_{экв}$  для первой гармоники в идеале равно нулю, тогда как для гармонических составляющих это сопротивление имеет достаточно большую величину и тем большую, чем выше номер гармоники. С другой стороны: гармонические составляющие тока, "ударившись" в сопротивление  $R_{экв}$ , начнут "искать" более короткий путь на общий провод и пойдут через  $C1$ , эквивалентное

сопротивление которого для токов ВЧ также частотозависимо и будет, в противоположность к  $R_{экв}$ , тем меньше, чем выше частота. Остатки неотфильтрованных гармонических составляющих, прошедших через  $R_{экв}$ , уходят по такому же правилу на общий провод через  $C2$ . Из-за такой двойной фильтрующей способности П-контур эффективнее одиночного Г-образного. Однако, это ещё не все положительные качества П-контура. Другими замечательными свойствами являются также возможность резонансного выделения тока нужной частоты и согласование двух компонентов аппаратуры, генератора и нагрузки, например: передатчика и антенны. Как же действует П-контур в этом случае? Для большей наглядности, преобразуем чертёж П-контура сначала в один вид (рис. 4), а затем – в другой (рис. 5).

На рис. 4 приведена схема параллельного резонансного контура с возможностью согласования с ним нагрузки (антенны) с помощью изменения ёмкостей конденсаторов  $C1$  и  $C2$ . Причём, эти конденсаторы переменной ёмкости выполняют несколько функций: так,  $C2$  определяет выходное сопротивление контура (импеданс) к нагрузке и одновременно является вместе с  $C1$  и  $L1$  частотоопределяющим ( $C1$  и  $C2$  включены последовательно относительно друг друга и, в совокупности, оба параллельно катушке  $L1$ ). Поскольку сопротивление нагрузки (антенны), как правило,

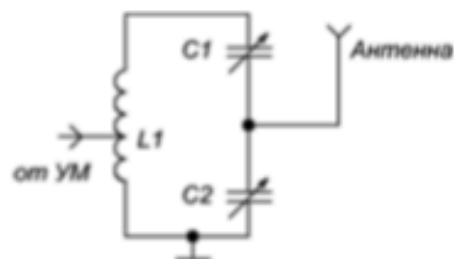


Рис. 4. Вид преобразованного П-контура (вариант 1)

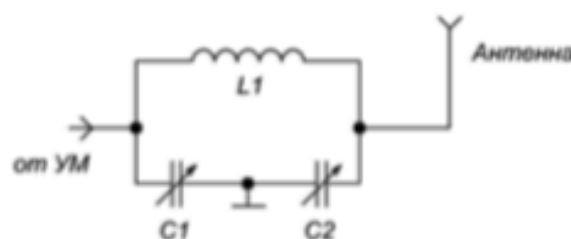


Рис. 5. Вид преобразованного П-контура (вариант 2)

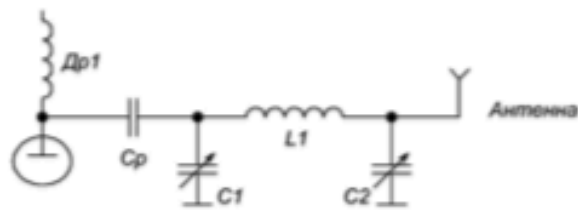


Рис. 6. Практическая схема П-контура

ниже сопротивления настроенного резонансного контура, то ёмкость  $C2$  в ёмкостном делителе будет больше, чем  $C1$  и изменение ёмкостей, например, увеличение  $C2$  и уменьшение  $C1$  (при сохранении настройки контура) будут эквивалентны перемещению отвода от катушки  $L1$  сверху вниз (рис. 4), при автотрансформаторном методе согласования нагрузки с резонансным контуром (в данном случае, автотрансформаторно с контуром согласуется выход передатчика или усилителя мощности).

Видоизменим подключение выхода передатчика и антенны, преобразуя резонансный контур с рис. 4 в собственно П-контур (рис. 5). Заземлим (соединим с общим проводом) точку соединения конденсаторов  $C1$  и  $C2$ . Подключим генератор (передатчик) и нагрузку (антенну) непосредственно к концам катушки  $L1$ . Как и на рис. 4, настройка контура в резонанс будет производиться совместно  $C1$  и  $C2$ , а разница их ёмкостей, при этом, будет отвечать за согласование передатчика с антенной.

Такая реализация П-контура удобнее в конструктивном отношении: со стороны передатчика не нужно делать отводы, и роторы обоих КПЕ могут быть заземлены. При подобранной индуктивности

катушки  $L1$ , настройка П-контура производится только вращением роторов КПЕ.

Перейдём к практической схеме П-контура и привычному его

графическому изображению, например, в доселе актуальной, ламповой "параллельной" схеме усилителя мощности (рис. 6).

Здесь следует иметь в виду, что лампы – класс электронных приборов, обладающих весьма высоким (до нескольких кОм) выходным сопротивлением (импедансом), поэтому-то и нужен (для передачи с минимальными потерями) согласователь с низким входным сопротивлением коаксиальных антенных фидеров (обычно 50-75 Ом), каким и является П-контур, к тому же, он одновременно и эффективно подавляет гармонические составляющие сигналов передатчиков, всегда присутствующие в выходных сигналах из-за той или иной степени нелинейности их каскадов.

Разобравшись с сущностью разновидности ФНЧ, коим является П-контур, перейдём к обеспечению эффективности его работы. В идеале, недостижимом на практике, но к которому нужно стремиться, П-контур должен представлять собой, примерно, следующее – рис. 7: катушка  $L1$  представляет собой толстый посеребрённый провод, вытянутый в струну, конденсаторы  $C1$  и  $C2$  являются проходными конденсаторами с переменной ёмкостью, размещёнными в стенках экрана (из посеребрённой стали –

электрический и магнитный экран одновременно). При такой конструкции получается максимальное подавление гармонических составляющих, при настройке П-контура на рабочую частоту и идеальном согласовании генератора (УМ) с нагрузкой (антенной), также минимальное проникновение РЧ напряжения со входа на выход (без фильтрации) из-за практически полного отсутствия паразитных ёмкостей и излучения РЧ, из-за полной экранировки, в пространстве.

Экран для П-контура – отдельный, лампа УМ находится в своём экране. Поскольку такую конструкцию осуществить в диапазоне КВ и ниже по частотам просто невозможно из-за занимаемого объёма (десятки и сотни куб.м, но возможно в верхней части УКВ-диапазона и на СВЧ), применяют различные способы "сворачивания" компонентов П-контура, но идеал всегда нужно иметь в уме при конструировании: катушки П-контуров нужно изготавливать с разумно максимальным диаметром и минимальным количеством витков (меньше междувитковая ёмкость – выше добротность – больше подавление гармоник) толстого медного посеребрённого провода (меньше сопротивление провода – скин-эффект – выше добротность), намотанного с максимальным шагом (меньше междувитковая ёмкость – больше добротность – выше подавление гармоник – меньше прямое прохождение со входа ФНЧ на выход). Конденсаторы (КПЕ) должны иметь большой зазор между пластинами, причём анодный – примерно в 3...5 и более раз больший, чем антенный, – поскольку анодный КПЕ ( $C1$ ) установлен с высокоимпедансной стороны П-контура, то здесь мы имеем дело с высоким напряжением и малым током, для высокого напряжения пробой достаточно больших промежутков между пластинами анодного КПЕ – святое дело, поэтому, во избежание создания помех и расплавления КПЕ, необходимо выбирать их с большими зазорами между пластинами (в зависимости от разрешенной



Рис. 7. Схема реализации идеального П-контура

мощности радилюбительских УМ – от 1 до 5-7 мм) при небольшой максимальной ёмкости между пластинами (до 200 пФ на КВ, чем выше выходной импеданс лампы УМ и выше рабочая частота, тем меньше может быть максимальная ёмкость С1). Если расстояние (зазор) между пластинами анодного КПЕ **немного** меньше требуемого, то можно соединить с ним последовательно высоковольтный конденсатор постоянной ёмкости ёмкостью в несколько тысяч пФ, – это, с одной стороны, не уменьшит существенно максимальную ёмкость КПЕ, с другой стороны, увеличит его пробивное между пластинами РЧ напряжение. КПЕ с катушкой П-контура нужно соединять проводами минимальной длины или непосредственно, исключения составляют антипаразитные фильтры (см. ниже). Трансформированная с помощью П-контура РЧ мощность на его выходе в антенну будет уже низкоимпедансной и КПЕ, в силу действующего на нём низкого РЧ напряжения и большого тока в антенну, может иметь небольшой зазор (до 1...1,5 мм). Ёмкость антенного КПЕ П-контура может быть до 2000 пФ и более (чем ниже сопротивление (импеданс) нагрузки и ниже рабочая частота). Понятно, что при реализации П-контуров возникает проблема с подбором КПЕ. Уменьшить максимальную ёмкость КПЕ позволяет подключение постоянного (возможно, проходного на выходе и входе П-контура, монтируемого прямо на экране П-контура) конденсатора ему параллельно за счёт разумного сужения диапазона настройки, применение переключателя (совместного с КПЕ или отдельно) с набором конденсаторов тоже позволяет решить проблему с выбором КПЕ. Экранирование П-контура нужно производить полностью – экран располагать на расстоянии в два диаметра катушки L1 от неё, особое внимание нужно уделить входной (анодной) части, так как высокое РЧ напряжение, богатое гармониками, наиболее способно к распространению

напрямую, созданию неустранимых помех радиотелеприёму. Отсюда: необходимо П-контур помещать в экранированный отсек (в дополнение к металлическому экранирующему заземлённому корпусу УМ в целом) и всю (в отдельный экран) лампу оконечного каскада. Переходные высоковольтные конденсаторы с анодов оконечных ламп (Ср) на П-контур должны иметь максимально возможные из конструктивных и прочностных соображений ёмкости, которые не оказывали бы заметного ёмкостного сопротивления на минимальной рабочей частоте УМ, в противном случае, часть выходной мощности УМ будет рассеиваться на анодах ламп, приводя к их перегреву, выходу из строя, ограничениям, созданию дополнительных составляющих в сигнале и возбуждениям УМ. Рабочие напряжения по постоянному току переходных на П-контур конденсаторов должны быть минимум в три раза выше максимального анодного, а пропускаемая мощность – в 7...10 раз больше действующей (например, для УМ с выходной мощностью в 750 Вт пропускаемая паспортная мощность переходного конденсатора должна быть в 6 кВАр).

Выше было упомянуто о параллельном к КПЕ включении дополнительных конденсаторов. Эту возможность можно использовать и в деле подавления гармоник, особенно – второй и третьей, так как они находятся ближе по оси частот к основной частоте рабочего сигнала и менее подавляются П-контуром, чем гармоники с более высокими номерами, т.е., для мощных УМ уровень гармоник может оказаться достаточным для создания помех окружающей радиоэлектронной аппаратуре. Параллельно КПЕ С2 с центрального контакта коаксиальной антенной розетки УМ на корпус устанавливаем

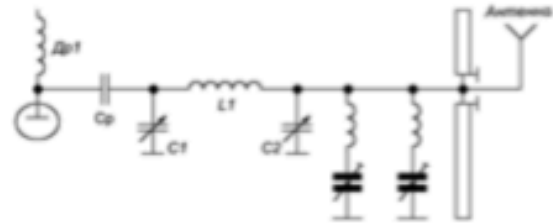


Рис. 8. Подключение к П-контурю помехоподавляющих последовательных контуров и четверть-волновых отрезков коаксиального кабеля, настроенных на частоты гармоник основного сигнала, выделяемого П-контуром

последовательные LC-контур, настроенные на вторую и третью гармоники сигнала, например, для диапазона 28 МГц – это 56 и 84 МГц или включаем четвертьволновые (разомкнутые на конце) отрезки коаксиального кабеля, соответствующей длины, настроенные (подбором длины) на частоты гармоник, для основной (рабочей) частоты эти дополнительные включения контуров будут значить только эквивалентное подключение дополнительных небольших емкостей параллельно С2 (конденсаторы в последовательных LC-контурх и ёмкости между оплёткой и центральной жилой в отрезках коаксиального кабеля) – рис. 8.

Чем выше импеданс на входе и выходе П-контура, тем меньшей ёмкостью КПЕ можно обойтись. Тетроды и пентоды обладают, как правило, бóльшим характеристическим выходным сопротивлением, чем триоды, поэтому, например, анодный КПЕ С1 может иметь меньшую максимальную ёмкость, чем при использовании триодов. Выходное сопротивление одной и той же лампы тоже непостоянно и зависит от приложенного анодного напряжения: чем оно ниже, тем ниже и выходное сопротивление (и больше необходимая максимальная ёмкость С1). Напряжение на аноде лампы УМ повышают, обычно, для получения максимальных неискажённых амплитуд выходного сигнала – максимальной выходной мощности.

Чем выше добротность катушки П-контура, тем сильнее подавляются гармонические составляющие проходящего через него РЧ тока, однако, как выход передатчика,

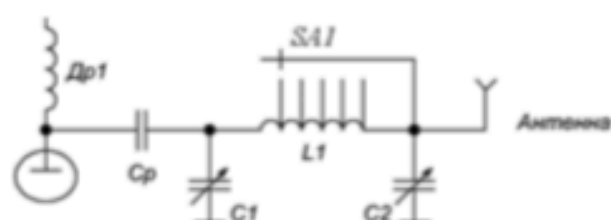


Рис. 9. Многодиапазонный вариант П-контура

так и антенна нагружают резонансный контур, и нагруженная добротность П-контурa (как параллельного контурa) оказывается ниже ненагруженной, и здесь нужен разумный компромисс, который наступает при уменьшении анодного тока лампы оконечного каскада передатчика, УМ, при оптимальной настройке П-контурa в пределах 13...15% по отношению к расстроенному П-контуру. В этом положении обеспечивается максимальный КПД при передаче мощности от оконечного каскада УМ в антенну. Тем не менее, повышенная параметрическая добротность самой катушки П-контурa положительно

обычно её изготавливают с отводами, которые выбираются переключателем, а неиспользуемые витки замыкаются накоротко (рис. 9).

Это уменьшает добротность катушки, причём, тем больше, чем большее количество витков в катушке замкнуто и чем сильнее связаны короткозамыкаемые витки с рабочей незамкнутой частью катушки через паразитные ёмкость и взаимоиндукцию. Самым лучшим вариантом является однодиапазонный П-контур, в котором катушка не имеет короткозамкнутых витков, а требование многодиапазонности решается другими, чем вышеупомянутый, способами: например,

сказывается как на КПД П-контурa, так и на крутизну АЧХ за частотой среза его АЧХ.

Несколько слов о многодиапазонности катушки П-контурa:

применением отдельных УМ на каждый диапазон, сменой катушек П-контурa при переходе на другой диапазон (ручной или с помощью барабанного переключателя). Немного похуже будет вариант с отводами, но с секционированием L1, причём, каждая переключаемая секция катушки располагается под углом 90 градусов и на некотором расстоянии от соседних. Лучше работают катушки П-контурa, рассчитанные на два-три прилегающих диапазона, например, 21-24-28 МГц, 10-14-18 МГц, 14-21-28 МГц, чем на все девять с 1,8 по 29,7 МГц. Очень плохо ведёт себя П-контур, несекционированную катушку которого, рассчитанную на диапазон 1,8 МГц, заставляют работать в диапазоне 28 МГц, замыкая накоротко почти всю катушку – добротность очень низкая, подавление гармоник – тоже, проблемы с согласованием и наличие большого уровня помех окружающей электроники – налицо.