

Развязывающий трансформатор для питания передатчиков индивидуального радиовещания и аппаратуры эфирных студий.

Сергей Комаров

Необходимость заземления корпуса радиопередатчика непосредственно в землю при работе на несимметричную антенну обусловлена не только защитой от статического электричества и импульсных перенапряжений при грозовых разрядах, но и необходимостью замыкания ВЧ токов при возбуждении электромагнитного поля между антенной и землей. Однако, из-за напряжения между «несвязанными землями» возникает опасность выхода из строя аппаратуры и поражения людей электрическим током. Иными словами, провод «нуля» и «защитного заземления» в электрической розетке почти всегда имеет довольно большой переменный потенциал относительно реального заземления – то есть, относительно электрода, вкопанного в землю у точки питания антенны. Из-за разности потенциалов «несвязанных земель» возникает фон переменного тока в эфирных студиях, «фонят» в эфире и радиовещательные передатчики. Попытка «несвязанные земли» связать, в ряде случаев приводит к срабатыванию УЗО (устройства защитного отключения), а в некоторых, - к разогреванию и даже перегоранию замыкающей перемычки, поскольку через нее начинает течь разностный ток асимметрии нагрузок фаз всего дома. Верное решение известно давно – развязывающий трансформатор.

Мощность такого трансформатора должна быть достаточной для питания аппаратуры студии и радиопередатчика [2]. При бюджетной студии и выходной мощности передатчика 100 – 150 Вт (потребляемая мощность около 200 – 300 Вт), вполне достаточно мощности развязывающего трансформатора 500 Вт. Ток холостого хода такого трансформатора должен быть минимален, а КПД надо сделать как можно ближе к 100%, поскольку трансформатор будет работать, не выключаясь, продолжительное время. Реально достижимое значение КПД для 500-ваттного тороидального трансформатора - 97%. Эти требования можно соблюсти, используя кольцевой магнитопровод из холоднокатаной трансформаторной стали, работающий при магнитной индукции не более 1,2 Тесла¹ и при плотности тока в обмотках j не более 2,8 А/мм². В этом случае трансформатор получается «жесткий», с почти нулевой просадкой напряжения под нагрузкой.

Расчетные формулы для диаметра провода при разных плотностях тока:

$$\begin{array}{l} j = 2,5 \text{ А/мм}^2; \quad d_{[\text{мм}]} = 0,0226 \times \sqrt{I_{[\text{мА}]}} \\ j = 2,8 \text{ А/мм}^2; \quad d_{[\text{мм}]} = 0,0213 \times \sqrt{I_{[\text{мА}]}} \end{array} \quad \left| \quad \begin{array}{l} j = 3,0 \text{ А/мм}^2; \quad d_{[\text{мм}]} = 0,0206 \times \sqrt{I_{[\text{мА}]}} \\ j = 3,2 \text{ А/мм}^2; \quad d_{[\text{мм}]} = 0,0199 \times \sqrt{I_{[\text{мА}]}} \end{array} \right.$$

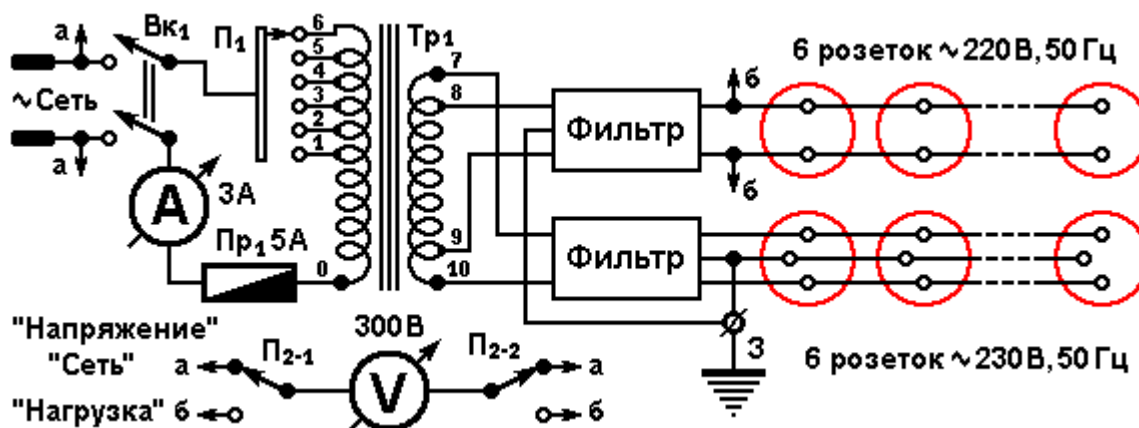
Поскольку минимальное нормируемое напряжение электросети может быть 220 - 10% = 198 вольт (соответствующее максимальному потребляемому току при номинальной мощности), то при мощности трансформатора 500 Вт, ток обмотки составит 500 / 198 = 2,53 А. Соответственно, диаметр провода: $d = 0,0213 \sqrt{2530} = 1,056$ мм. Выбираем стандартный провод ПЭТВ-2-1,06 [3].

В идеале, развязывающий трансформатор должен содержать две обмотки с одинаковым числом витков. Но здесь есть нюанс. Дело в том, что с 1992 года, когда в России был взят курс на евроинтеграцию, появились ГОСТ-ы, предписывающие перевести наши электросети с родных 220 вольт, на западные 230. Вроде бы, ерунда, подумаешь, 5%, однако, велико число потребителей, использующих для питания трансформаторы ТАН, ТА, ТН, ТПП [7] и другие, рассчитанные на напряжение 220 вольт. Посчитанные под магнитную индукцию 1,6 Тесла (впритык, почти под намагничивание) при напряжении 220 + 10% = 242 вольта, они не вынесут напряжения 230 + 10% = 253 вольта (не допустимое по ТУ), намагнитятся, и устроят короткое замыкание и пожар. Можно, конечно, перепаять входные обмотки трансформаторов ТАНхх-127/220-50 с 220-и вольт: (110 + 110 = 220) на 237 вольт: (110+127 = 237). Это спасет положение. Но будет ли кто это делать? А что делать с трансформаторами, у которых одна обмотка только на 220 вольт?

Давайте такой трансформатор спроектируем и самостоятельно намотаем. Трансформатор должен обеспечить нормальную работу нагрузки вторичной цепи при напряжении питающей сети начиная от 198 вольт (220 – 10% = 198) и до 253-х (230 + 10% = 253).

¹ К примеру, трансформаторы ТА, ТАН, ТН, ТПП рассчитаны работать при индукции 1,6 Тесла. Потому и греются.

С учетом вышесказанного, расчетные значения напряжений первичной обмотки: 200; 210; 220; 230; 240; 250 вольт. Вторичную обмотку «попросим» обеспечить нам родные «русские» 220 вольт и, ихние, европейские, 230, чтобы импортная аппаратура также питалась бы своим родным напряжением. Схема блока развязывающего трансформатора будет такой (Рис. 1):



Амперметр переменного тока электромагнитной системы показывает, насколько сильно нагружен трансформатор. Номинальная нагрузка 2,5 ампера, максимальная – 2,8 ампера. Вольтметр электромагнитной системы может быть подключен либо ко входу питающего напряжения до выключателя, либо к выходу уже отфильтрованного напряжения 220 вольт.

При выключенном трансформаторе подключил вольтметр к сети, посмотрел, сколько там вольт, установил переключатель на нужное напряжение, включил трансформатор, переключил вольтметр на выход и, если надо, подстроил напряжение, переключив отвод первичной обмотки.

В индивидуальном радиовещании передатчики и модуляторы принципиально самодельные, как правило, используют в своих блоках питания стандартные трансформаторы на 220 вольт, и наши двухполюсные розетки на 220 вольт – как раз для них. Студийная аппаратура, как правило, европейская, поэтому евророзетки с земляным выводом и напряжением 230 вольт – для нее. Вторичная обмотка трансформатора сделана симметричной, чтобы средний потенциал обмотки для каждого напряжения совпадал бы с нулевым потенциалом.

Расчет трансформатора начнем с определения размеров сердечника. Понятно, что он должен быть ленточным, тороидальным (максимальный КПД и минимальный ток холостого хода), из электротехнической холоднокатаной стали, например, марки Э3406, с толщиной ленты 0,27...0,3 мм, стандартной для силовых трансформаторов на частоту 50 Гц. Главный параметр сердечника это произведение площади окна под обмотку на рабочее сечение магнитопровода. Считаем [1]:

$$S_c \cdot S_o = \frac{P \cdot (1 + \eta) \cdot 100}{\eta \cdot 4,44 \cdot f \cdot B \cdot j \cdot K_m \cdot K_c} = \frac{500 \cdot (1 + 0,97) \cdot 100}{0,97 \cdot 4,44 \cdot 50 \cdot 1,2 \cdot 2,8 \cdot 0,3 \cdot 0,96} = 472,7 \text{ см}^4$$

Где:

$P = 500$ - мощность трансформатора [Вт]; $\eta = 0,97$ - КПД трансформатора;

S_c и S_o - площади поперечного сечения сердечника и окна, соответственно [см²];

$f = 50$ - нижняя рабочая частота трансформатора [Гц];

$B = 1,2$ - магнитная индукция [Т]; $j = 2,8$ - плотность тока в проводах обмоток [А/мм²];

$K_m = 0,3$ (для тороидов) коэффициент заполнения окна сердечника медью;

$K_c = 0,96$ - коэффициент заполнения сечения сердечника сталью;

При выборе конкретного типоразмера можно варьировать сечение сердечника S_c и площадь его окна под намотку S_o . Чем меньше сечение S_c , тем больше витков придется намотать. Чем больше S_c , тем тяжелее сердечник, меньше отверстие окна (при том же $S_c \times S_o$) и труднее укладывать провод. Изготовители сердечников для трансформаторов давно провели оптимизацию и предлагают ряд типоразмеров магнитопроводов, с «правильными» соотношениями S_c и S_o . В соответствии с номенклатурой производимых сердечников [6] выбираем магнитопровод ОЛ80/130-40. Для него: $S_c \times S_o = 471 \text{ см}^4$; $S_c = 10 \text{ см}^2$; $S_o = 47,1 \text{ см}^2$.

Число витков в обмотках не трудно посчитать:

$$n = \frac{U \cdot 10^4}{4,44 \cdot f \cdot B \cdot S_c \cdot K_c}; n_{220} = \frac{220 \cdot 10000}{4,44 \cdot 50 \cdot 1,2 \cdot 10 \cdot 0,96} = 860 \text{ вит.}$$

Подставив остальные значения напряжений, получим число витков во всех обмотках (Таблица 1). Число витков вторичных обмоток увеличено в $1/\sqrt{\eta}$ раз для компенсации потерь.

Первичная обмотка				Вторичные обмотки			
Выводы	U, В	n (вит.)	d (мм)	Выводы	U, В	n (вит.)	d (мм)
0 - 1	200	782	1,06	7 - 8	5	20	1,06
1 - 2	10	39		8 - 9	220	873	
2 - 3	10	39		9 - 10	5	20	
3 - 4	10	39		11 - 12	36	143	0,75
4 - 5	10	39		12 - 13	6	24	
5 - 6	10	39		14 - 15	127	504	0,56

И уж, коли, на рабочем месте появляется мощный трансформатор, велик соблазн намотать на нем дополнительно 50 ваттную обмотку на 42 вольта с отводом на 36 вольт, и 100 ваттную, на 127 вольт, - для питания паяльников. Но это по желанию. Чтобы не перепутать в какую розетку какой паяльник включать, на каждое напряжение надо установить розетки разных типов и снабдить паяльники соответствующими вилками.

Трансформатор начинаем мотать со вторичной обмотки (выводы 7-8-9-10), поскольку у неё меньше выводов и поверх неё проще будет укладывать витки первичной обмотки. При этом, уложив витки первого слоя обмотки плотно, виток к витку, по внутренней длине окружности магнитопровода (в первый слой должно поместиться около 210 витков), необходимо уложить межслойную изоляцию (слой кабельной бумаги) и продолжить мотать второй слой витков, не пересекая витка начала обмотки (вывод 0), а укладывая витки над уже намотанными в первом слое (как бы, отступая назад от первого витка). То же самое надо сделать во всех следующих слоях обмоток: при намотке первый виток не пересекаем ни с одной, ни с другой стороны. Такой укладкой провода мы устраним паразитные продольные витки в каждом слое обмотки, энергия с которых будет наводить ток в сердечнике, нагревать его, и снижать КПД трансформатора.

Для ориентировки следует перед первым витком надеть на сердечник картонку с разрезом снаружи, и в каждом слое обмотки доматывать витки до неё. Заодно она обеспечит изоляцию между витками в торцах слоёв.

Изоляция между слоями обмотки – слой кабельной бумаги². Изоляция между первичной и вторичной обмотками трёхслойная: слой лакоткани³, слой кабельной бумаги (с перехлестом на половину ширины ленты (с внешней стороны кольца), и снова слой лакоткани. Межобмоточная изоляция должна выдерживать в рабочем режиме (при длительной эксплуатации) напряжение не менее 1500 вольт. Использование в качестве изоляции лент из термопластичных (пластмассы, синтетика) или мягких (фторопласт) материалов недопустимо, поскольку толстый провод обмотки со временем продавит изоляцию, и трансформатор выйдет из строя.

Поверх вторичной обмотки, с соблюдением той же технологии, мотаем первичную обмотку (выводы 0-1-2-3-4-5-6). Затем снова выполняем межобмоточную изоляцию, такую же, как после вторичной обмотки. Поверх основных обмоток, мотаем дополнительные обмотки (для включения паяльников) 11-12-13 и 14-15.

Выводы обмоток трансформатора следует выполнить проводом обмотки одетым в лакированный плетёный х/б кембрик. Использование ПВХ или фторопластовых трубок не желательно. Длина изолированной части выводов обмоток должна быть не менее 160 мм.

Снаружи трансформатор следует обмотать слоем кабельной бумаги и двумя слоями лакоткани. Изоляционные материалы для трансформатора необходимо нарезать лентами, шириной 15-20 мм, и наматывать с половинным перехлестом предыдущего витка на внешней стороне кольца трансформатора.

² Бумага кабельная К-080, ГОСТ 23436-83.

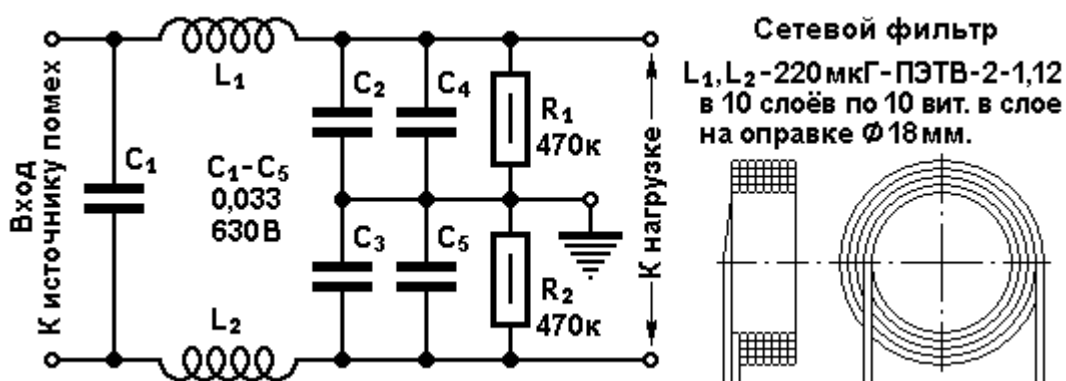
³ Лакоткань ЛШМ-105 (тип 121) или ЛКМ-105 (тип 133) толщиной 0,1 мм, ГОСТ 28034-89.

Проверить нарушение технологии укладки витков обмоток просто. Снаружи, на работающий трансформатор, поперек витков его обмотки (параллельно кольцу магнитопровода оденьте КЗ виток из медного провода. Если ток холостого хода трансформатора увеличится, значит технология была нарушена и в обмотках трансформатора есть продольные паразитные витки.

Если будете заказывать трансформатор на фирмах их мотающих, обязательно обговорите в технологии такую укладку провода. Иначе получите трансформатор с паразитными продольными витками по числу слоев обмотки. Намотчице проще установить на счетчике станка нужное число витков и пойти болтать с подружками, а станок мотает по кругу в одну сторону. Намотал, сколько указано – остановился. Могут даже межслойную изоляцию не проложить. Это ж не отойти, и с подружками не обсудить новую кофточку начальницы цеха! – Поэтому такие трансформаторы лучше мотать самому. Дома, вручную, челноком, аккуратно и честно укладывая каждый виток.

Фильтры. К вторичной цепи трансформатора подключены заграждающие ВЧ фильтры для подавления прохождения импульсных помех из сети к студийной аппаратуре, и ВЧ помех от передатчика в сеть. Поскольку передатчик не должен наводить через питающую сеть ВЧ помехи на аппаратуру студии, то в нашей схеме эти цепи развязаны аж двумя фильтрами включенными последовательно. Обратите внимание, что на схеме (Рис. 1) верхний фильтр включен входом вправо, а нижний, - входом влево. Источником помех в верхней группе розеток, 220 В, является радиопередатчик, а для студийной аппаратуры, 230 В, – электросеть. Потому и фильтры включены по-разному. При этом, «земля» у студийной и передающей аппаратуры, «связанная», общая.

В схеме можно использовать стандартные фильтры, но лучше изготовить их самому. Схема правильного сетевого фильтра показана на рисунке 2.



Резонансная частота цепочек L_1, C_2+C_4 и L_2, C_3+C_5 , определяющая помехоподавление фильтра – 42 кГц. Этого достаточно не только для подавления ВЧ наводок от передатчика, но и от импульсных преобразователей многочисленных компьютеров. Резисторы R_1 и R_2 обеспечивают нулевой потенциал вторичной обмотки трансформатора в случае наведения на нее статического электричества.

Электробезопасность. Развязывающий трансформатор, благодаря тому, что ни один из выводов его вторичной обмотки не заземлен, обеспечивает безопасность при прикосновении к любой фазе вторичной цепи. Они имеют потенциал 115 вольт относительно земли. При контакте с телом в цепь протекания поражающего тока, с фазы на землю, включена RC цепочка с модулем комплексного сопротивления около 48 кΩ. Поскольку фильтров во вторичной цепи включено два, и они по питающему току включены параллельно, то ограничивающее сопротивление будет 24 кΩ. Максимальный ток поражения составит: $I_{пор} = 115 / 24 = 4,8$ мА. Поражающий ток вторичной обмотки трансформатора почти в полтора раза меньше «отпускающего тока» ($I = 6$ мА). Действие тока величиной до 6 мА на организм человека допустимо без каких-либо последствий, если длительность его протекания не превышает 30 секунд. Если прикоснуться к выводам вторичной цепи трансформатора, стоя босиком на мокром полу или держась второй рукой за заземленный предмет, то после удара током человек сможет сам освободиться от поражающего электрического воздействия (ток его отпустит). «Дернет», но не убьет, если, конечно, сердце у Вас здоровое. А вот двумя руками хвататься за обе фазы вторичной обмотки не следует. В такой цепи ограничивающих сопротивлений нет.

Перегрузочная способность. Иногда это бывает важно. Мы посчитали трансформатор на плотность тока $2,8$ А/мм² для сокращения падения напряжения на обмотке и увеличения КПД. Однако, рабочим значением плотности тока для него является и $3,2$ А/мм², на которую посчитано

большинство трансформаторов [7]. При такой плотности тока в проводе Ø 1,06 мм рабочий ток составит 2,8 ампера. При номинальном напряжении в сети 220 вольт, мощность трансформатора составит 616 Вт, а при напряжении сети 230 вольт, соответственно, 644 Вт. Взяв среднее значение 630 Вт, в расчете на равномерное распределение нагрузки между выходными напряжениями, будем иметь ввиду, что наш 500-ваттный трансформатор в экстренном случае потянет на 130 Ватт больше, однако будет немного греться. А уж подключить к нему, полностью нагруженному на 500 Вт, еще осциллограф и паяльник на время настройки аппаратуры – нет никакой проблемы!

Работаем!

Литература.

1. **Комаров С.** Правильный расчет силового трансформатора.

<http://www.radiostation.ru/home/expexch1.html>

2. **Комаров С.** Передающий комплекс Индивидуального радиовещания. Радио, 2015, № 9.

3. **ТУ 16.705.110-79**, Провода круглые с эмалевой изоляцией на основе полиэфиров.

4. **ГОСТ 23436-83**, Бумага кабельная. Технические условия.

5. **ГОСТ 28034-89**, Лакоткани электроизоляционные. Общие технические требования.

6. **ГОСТ 24011-80**. Магнитопроводы ленточные кольцевые. Конструкция и размеры.

7. Трансформаторы ТА, ТН, ТАН, ТПП на частоту 50 Гц по **ОЮ0.471.001 ТУ**.