

Глава XVI

ЭКРАНИРОВАНИЕ И ЗАЩИТА ТРАНСФОРМАТОРА

§ XVI.1. Электростатическое экранирование

Входные и промежуточные трансформаторы, работающие при малых напряжениях сигнала, должны быть хорошо защищены от внешних электростатических и магнитных полей. Особенно важна защита от внешних полей в установках, работающих от сети переменного тока.

Защита от напряжения помех, наводимого через ёмкостные связи между источниками помех и цепями обмоток трансформатора, или защита от внешних электростатических полей не представляет особых трудностей; для защиты от электростатических полей достаточно трансформатор и идущие от него проводники окружить металлической оболочкой любой толщины из любого металла, соединённой с точкой нулевого потенциала (основанием усилителя или „землёй“). Наводимое через ёмкостные связи напряжение помех при правильном монтаже и расположении деталей усилителя невелико и заботиться об электростатическом экранировании трансформатора и его цепей обычно приходится лишь в тех случаях, когда напряжение сигнала в цепи меньше десятых долей вольта. Электростатическим экраном для трансформатора обычно является металлический кожух, в который он устанавливается для защиты от механических повреждений, климатических воздействий и магнитных полей. Экранирование проводников, идущих от обмоток трансформатора, достигается применением для монтажа цепей изолированного проводника с металлической оболочкой (так называемый экранированный провод). Металлическая оболочка проводника надёжно соединяется с точкой нулевого потенциала; если оболочку не заземлить, то помехи будут выше, чем при отсутствии экрана. Если оба проводника, идущие от обмотки трансформатора, являются потенциальными, т. е. несут потенциал сигнала относительно земли, что имеет место при симмет-

ричной схеме цепи, то оба они должны быть экранированы. При несимметричной схеме, когда один из концов обмотки заземлён, экранируют лишь потенциальный проводник.

Когда наибольшее напряжение сигнала в цепи измеряется микровольтами, электростатическое экранирование и заземление экрана должны выполняться особо тщательно. Проводник, идущий от трансформатора к управляющей сетке лампы, должен быть экранирован вплоть до сеточной ножки лампы или колпачка сетки; неэкранированный отрезок в несколько сантиметров вызывает сильное увеличение уровня помех. Первичную цепь в этих случаях экранируют до самых входных зажимов, если они имеются на усилителе.

Чем больше сопротивление цепи, тем чувствительнее она к электростатическим помехам. Это объясняется тем, что вследствие высокого сопротивления ёмкостной связи цепи с источником помех (ёмкость связи ничтожно мала), падение напряжения помехи между проводниками цепи будет практически пропорционально сопротивлению цепи. Поэтому цепь вторичной обмотки входного трансформатора, имеющая более высокое сопротивление, чем цепь первичной, чувствительнее к электростатическим наводкам.

Электростатическое экранирование сильно увеличивает ёмкость монтажа; это нужно принимать во внимание при расчёте нагружающей трансформатор ёмкости. Ёмкость экранированного провода зависит от его диаметра, толщины и рода изоляции; у обычных экранированных проводников малого наружного диаметра она составляет $100 \div 200$ мкмкф на метр длины провода. Специальные высокочастотные экранированные проводники с пониженной ёмкостью имеют ёмкость $15 \div 25$ мкмкф на метр длины провода, но имеют большой диаметр и малую гибкость.

§ XVI.2. Магнитное экранирование

Внешние магнитные поля, излучаемые трансформаторами соседней аппаратуры, электродвигателями, силовыми трансформаторами (трансформаторами питания), наводят эдс помех в обмотках трансформатора низкой частоты.

Электродвижущая сила помех, наводимая внешними магнитными полями в обмотках входного трансформатора усилителя с малым входным уровнем (микрофонный усилитель, усилитель магнитной звукозаписи), обычно во много раз превышает допустимую величину, если не приняты специальные меры для уменьшения наводимых помех.

Защита трансформатора от внешних магнитных полей значительно сложнее электростатической защиты. Для уменьшения эдс, наводимой в трансформаторе внешним магнитным полем, следует:

а) уменьшать размеры трансформатора и число витков обмоток, что достигается применением для сердечника магнитных сплавов с возможно более высокой начальной проницаемостью;

б) располагать трансформатор в аппаратуре так, чтобы ось катушки была перпендикулярна направлению силовых линий магнитного поля помех.

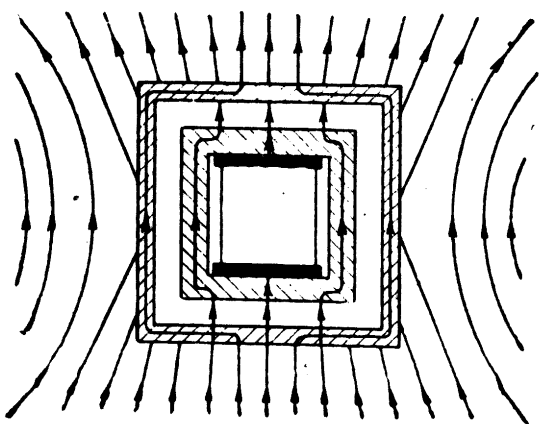


Рис. XVI.1. Защита трансформатора от внешнего магнитного поля экраном с высокой магнитной проницаемостью

Такое расположение можно найти опытным путём на работающей макете прибора, изменяя положение трансформатора до получения наименьшего уровня помех на выходе.

Также уменьшает наводимые магнитным полем помехи применение стержневой конструкции трансформатора с двумя катушками.

Однако перечисленные меры не обеспечивают необходимого снижения уровня помех, наводимых внешними магнит-

ными полями. Поэтому входные трансформаторы усилителей с малым входным уровнем защищают от внешних магнитных полей, окружая трансформаторы экраном из материала с высокой магнитной проницаемостью (рис. XVI.1). Такой экран уменьшает количество магнитных силовых линий поля помех, попадающих в сердечник трансформатора, по двум причинам:

а) вследствие малого магнитного сопротивления экрана по сравнению с сопротивлением промежутка между экраном и трансформатором большинство силовых линий поля помех проходят по экрану, не попадая в сердечник трансформатора;

б) переменное поле помех, проходящее через экран в сердечник трансформатора, вызывает появление в металле экрана вихревых токов, создающих встречно-направленное поле, частично нейтрализующее первичное поле помех.

В области низких частот (десятки и сотни герц) вихревые токи мало влияют на экранирование, и защита от внешнего поля, даваемая экраном, определяется в основном первой причиной.

В результате уменьшения количества силовых линий поля помех, попадающих в сердечник трансформатора, уменьшаются наводимые в его обмотках помехи. Отношение эдс помехи $E_{\text{п}}$, наводимой в неэкранированном трансформа-

торе, к эдс $E_{Пэ}$, наводимой в трансформаторе с экраном при той же напряжённости поля помех, назовём коэффициентом экранирования и обозначим через β :

$$\beta = \frac{E_{П}}{E_{Пэ}}; \beta_{об} = 20 \lg \frac{E_{П}}{E_{Пэ}}. \quad (\text{XVI.1})$$

Коэффициент экранирования выражается как в отвлечённых единицах, так и в децибелах.

Из сказанного нетрудно видеть, что коэффициент экранирования должен быть тем больше, чем меньше магнитное сопротивление экрана по сравнению с магнитным сопротивлением промежутка между экраном и сердечником трансформатора. Отсюда можно сделать следующие выводы:

а) начальная магнитная проницаемость материала экрана должна быть возможно более высокой. Коэффициент экранирования определяется именно начальной магнитной проницаемостью, так как индукция, вызываемая полем помех в экране, ничтожно мала. Поэтому экран из пермаллоя при равной толщине даёт во много раз большее экранирование, чем экран из обычной листовой стали;

б) увеличение толщины экрана увеличивает коэффициент экранирования почти пропорционально толщине, так как магнитное сопротивление экрана обратно пропорционально его толщине;

в) расстояние между сердечником трансформатора и экраном должно быть достаточно велико, чтобы обеспечить большое магнитное сопротивление промежутка. Однако слишком большие расстояния сильно увеличивают наружные размеры и вес конструкции и дают небольшой прирост коэффициента экранирования; поэтому расстояние между сердечником и экраном на практике берут порядка $0,05 \div 0,1$ от наружных размеров сердечника трансформатора;

г) недопустимо крепление трансформатора внутри экрана стальными деталями, так как они образуют проводящий мостик между сердечником и экраном, увеличивая тем самым уровень наводимых в трансформаторе помех;

д) конструкция экрана должна быть такой, чтобы на пути магнитных силовых линий, проходящих по экрану, отсутствовали стыки и швы с большим магнитным сопротивлением, иначе коэффициент экранирования сильно уменьшится. Поэтому при наличии соединений отдельных частей экрана на протяжении пути магнитных силовых линий соединения должны выполняться с достаточно малым магнитным сопротивлением, что может быть достигнуто, если их делать не встык, а внахлёстку.

При повышении частоты экранирующее действие металлических экранов падает вследствие уменьшения магнитной проницаемости материала экрана на высоких частотах, вы-

зывается вытеснением магнитного потока на поверхность листа (см. § XIII.2). Это явление начинает проявляться тем раньше, чем выше магнитная проницаемость материала, чем ниже его удельное электросопротивление и чем больше толщина листа. При конструировании экрана из листового пермаллоя с высокой магнитной проницаемостью для уменьшения падения экранирующего действия с частотой экран следует делать из листов не толще $0,3 \div 0,4$ мм, применяя несколько слоёв, если необходим экран большей толщины. Экран из немагнитического магнитного материала (например, феррита) даёт снижение коэффициента экранирования лишь на очень высоких частотах, там, где магнитная проницаемость материала падает.

Экраны из мягкой, а также из трансформаторной стали вследствие малой начальной проницаемости дают слабое экранирование, и их можно применять для экрана, если требуемый коэффициент экранирования не превышает нескольких единиц. Экраны из этих материалов дают почти неизменное экранирование до частот в несколько тысяч и даже десятков тысяч герц; на более высоких частотах коэффициент экранирования падает.

При коэффициенте экранирования порядка $10 \div 20$ и выше экран из мягкой или трансформаторной стали получается слишком громоздким, тяжёлым и дорогим в изготовлении. В этих случаях экономически выгоднее применение пермаллоя; экран из пермаллоя при небольшой толщине и размерах позволяет получить коэффициент экранирования порядка 100 и выше (см. пример расчёта в конце настоящей главы).

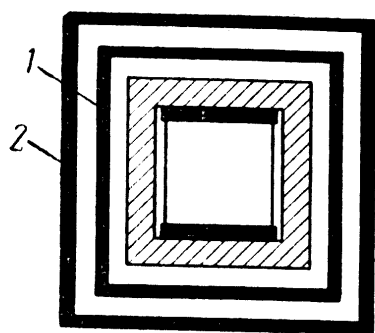


Рис. XVI.2. Двойное экранирование: 1—внутренний экран. 2—наружный экран

При необходимом коэффициенте экранирования порядка десятков и небольших размерах экранируемого трансформатора экран может быть отпрессован из немагнитического магнитного материала с высокой магнитной проницаемостью, например, из феррита (оксифера) с начальной проницаемостью 400 или 2000 гс/э. При использовании феррита не следует забывать, что его магнитная проницаемость, а следовательно, и экранирующее действие резко падают при повышении температуры выше определённого предела.

При более высоких коэффициентах экранирования вместо увеличения толщины экрана или увеличения расстояния между сердечником и экраном выгоднее экранированный трансформатор окружить ещё одним экраном, расположенным на некотором расстоянии от первого (рис. XVI.2). Коэффициент экранирования такого двойного экрана равен произве-

дению коэффициентов экранирования внутреннего и наружного экранов, тогда как при простом удвоении толщины одного экрана коэффициент экранирования только удваивается. Двойной экран из пермаллоя с начальной проницаемостью в несколько тысяч гаусс на эрстед при небольшой толщине позволяет получить уменьшение уровня наводимых на трансформатор помех в несколько тысяч раз. В редких случаях, когда требуется ещё более высокая защита от помех, применяют тройные экраны.

Теоретический анализ явления экранирования показывает, что при заданной общей толщине двойного или тройного экрана (включая промежутки между экранами) общий коэффициент экранирования достигает наибольшей величины, когда толщина отдельных экранов и промежутков между ними растёт пропорционально расстоянию от центра, и толщина промежутка является средней геометрической между толщинами примыкающих к нему экранов.

В статье В. Г. Густавсона [Л28] рассматривается именно такая конструкция экрана. Читатель может подумать, что эта конструкция является наилучшей и должна применяться на практике. Однако следует указать, что рассматриваемая в упомянутой статье конструкция не пригодна для практического использования и ведёт к перерасходу ценных материалов.

Применение экранов, построенных по принципу геометрической прогрессии, на практике невозможно и невыгодно потому, что, во-первых, это требует для каждой оболочки экрана материал разной толщины, а, во-вторых, даёт низкий коэффициент экранирования при данной затрате материала на экран. При увеличении расстояния между экранами коэффициент экранирования редко возрастает практически при том же расходе материала на экраны и незначительном увеличении наружных размеров. Поэтому на практике расстояние между отдельными оболочками многократных экранов следует делать примерно таким же, как между сердечником и внутренним экраном, а толщину оболочки брать не больше $0,5 \div 1$ мм, делая все оболочки одинаковой толщины. При такой конструкции использование дорогого пермаллоя получается гораздо более высоким.

Экранирующее действие экранов, выполненных из пермаллоя толщиной $0,3 \div 0,5$ мм, начинает падать на частотах выше нескольких сотен или тысяч герц в зависимости от начальной проницаемости пермаллоя.

Для экранирования трансформаторов от полей помех с частотой выше сотен и тысяч герц следует либо применять магнитный материал, проницаемость которого не падает на частоте помехи, либо добавить к экрану из пермаллоя экран из металла с высокой электропроводностью (красной

меди или алюминия). Физическая природа экранирования трансформатора от переменного магнитного поля высокой частоты экраном из немагнитного материала заключается в том, что вследствие высокой электропроводности экрана в нём от воздействия поля помехи возникают сильные вихревые токи. Эти токи вызывают появление встречно-направленного магнитного поля, сильно ослабляющего поле помехи. При равной толщине экран из красной меди даёт значительно лучшее высокочастотное экранирование, чем алюминий, так как электропроводность красной меди выше. Экранирующее действие экрана из немагнитного материала растёт с частотой и достигает очень высоких значений на радиочастотах. При понижении частоты до нескольких десятков герц экранирование практически исчезает и на этих частотах такой экран не даёт уменьшения помех.

Толщина экранов из красной меди, применяемых на практике, колеблется от нескольких десятых миллиметра до нескольких миллиметров. Чем толще экран, тем с более низких частот начинается его экранирующее действие. Экраны красной меди обычно применяют в сочетании с экранами из магнитного материала; экранирование, даваемое таким комбинированным экраном, не падает даже на радиочастотах.

§ XVI.3. Конструкции магнитных экранов

Конструкции применяемых магнитных экранов очень разнообразны. Простейшая конструкция экрана состоит из закрытой со всех сторон прямоугольной или цилиндрической коробки из магнитного материала (рис. XVI.3), имеющей съёмную крышку или дно, на котором крепится экранируемый трансформатор. Одновременно с защитой от магнитного поля такой экран также защищает трансформатор от механических повреждений, а при герметической конструкции экрана и от климатических воздействий. Крепление трансформатора производится при помощи уголков, прокладок или ножек из немагнитного материала. Конструкция экрана должна обеспечивать низкое магнитное сопротивление на пути силовых линий, проходящих вдоль оси катушки трансформатора. На этом пути желательно не иметь соединений; если же они есть, их следует выполнять внахлёстку.

Экран может быть сделан из двух одинаковых штампованных половинок, собираемых встык (рис. XVI.4); при этом плоскость стыка должна лежать вдоль осевой линии катушки экранируемого трансформатора.

Простая конструкция экрана изображена на рис. XVI.5 и XVI.6; экран сделан из двух прямоугольников, согнутых или свитых из нескольких оборотов стальной или пермаллоевой

ленты. Трансформатор закрепляется во внутреннем прямоугольнике, на который вплотную надвигается наружный, так что его боковые стороны закрывают открытые стороны внут-

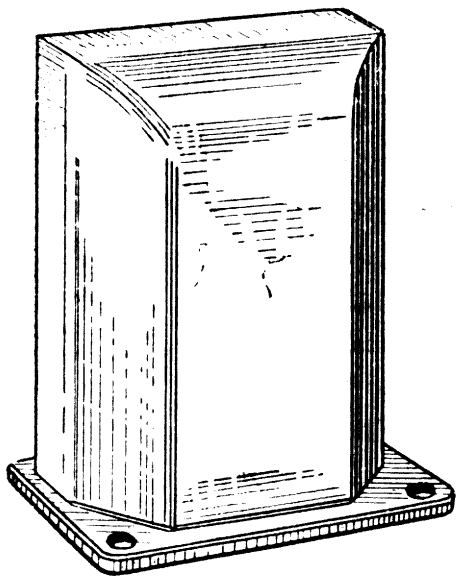


Рис. XVI.3. Магнитный экран в виде кожуха

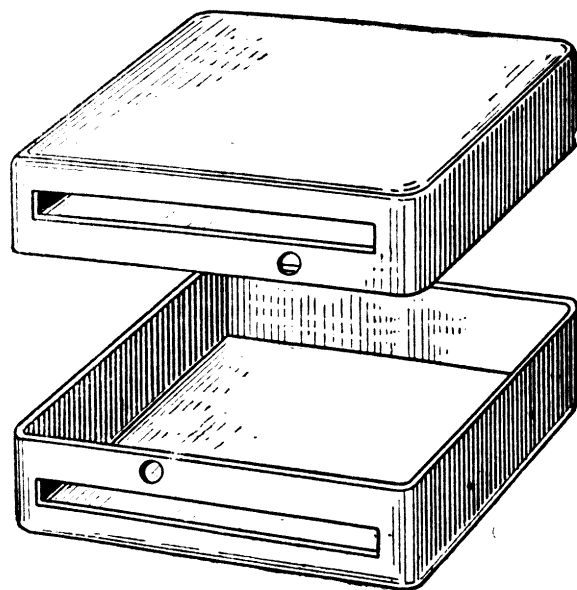


Рис. XVI.4. Экран, штампованный из двух половинок

реннего прямоугольника, образуя закрытую со всех сторон коробку. Трансформатор в таком экране должен крепиться

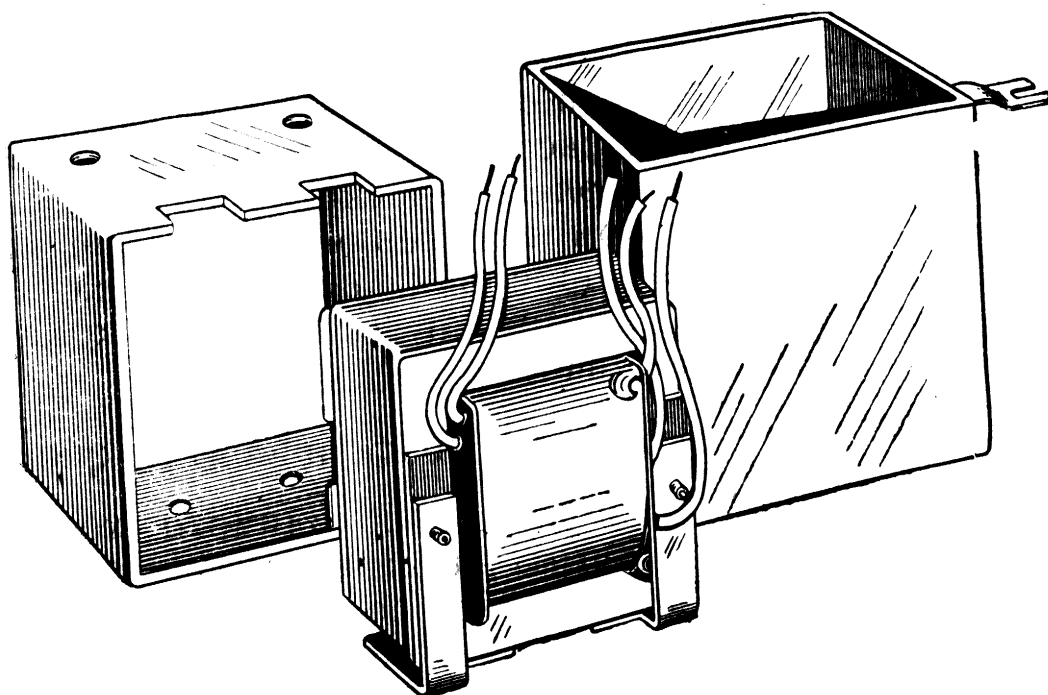


Рис. XVI.5. Экран из двух прямоугольных частей, вдвигаемых одна в другую

так, чтобы ось его катушки проходила через стороны экрана, имеющие двойную толщину.

Двойные и тройные экраны делают тех же конструкций, что и одиночные; для упрощения конструкции внутренний экран иногда делают в виде прямоугольника или цилиндра

без крышек; при экране из магнитного материала этого рекомендовать нельзя, так как отсутствие крышек может уменьшить коэффициент экранирования в несколько раз.

При необходимости экранирования трансформатора в широком спектре частот применяют комбинированный экран из магнитного материала и красной меди. При одной оболочке

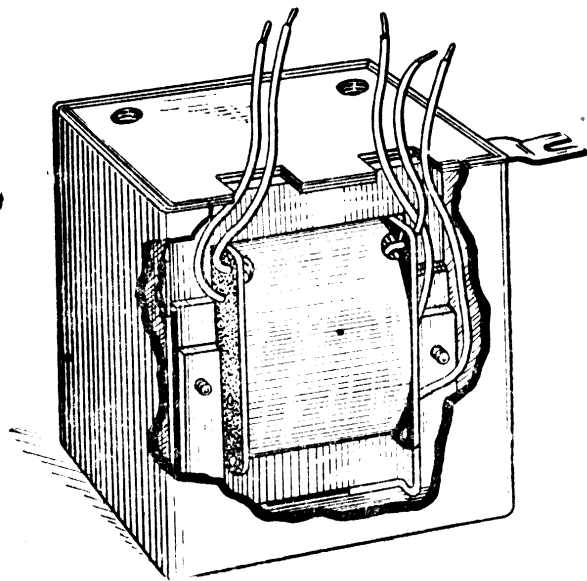


Рис. XVI.6. Трансформатор в собранном экране

из магнитного материала экран из красной меди помещают внутри, и делают его без крышек из согнутой полоски красной меди с хорошо пропаянным швом. Хорошие результаты также даёт простое вкладывание пластинок красной меди толщиной в $1 \div 2$ мм между сторонами сердечника, перпендикулярными оси катушки трансформатора, и экраном. При двух оболочках из магнитного материала такие пластинки или экран из красной меди помещают между экранами из магнитного материала.

Если панель, на которую крепится экранированный трансформатор, сделана из стали, то экран следует крепить на панель немагнитными крепёжными деталями не вплотную к панели, а на некотором расстоянии от неё, не забывая соединить экран с панелью электрически во избежание электростатической наводки. При креплении экрана на стальную панель без немагнитной прослойки наводимые на трансформатор помехи сильно возрастают вследствие концентрации магнитного поля помех (панелью).

§ XVI.4. Расчёт необходимого коэффициента экранирования

Для определения величины необходимого коэффициента экранирования по известным электрическим данным трансформатора и схемы достаточно поделить напряжение U_{Π} , наводимое полем помех на обмотке неэкранированного трансформатора на допустимую величину напряжения помех $U_{\Pi\partial}$ на той же обмотке:

$$\beta_{\text{необх}} = \frac{U_{\Pi}}{U_{\Pi\partial}}; \beta_{\text{необх об}} = 20 \lg \frac{U_{\Pi}}{U_{\Pi\partial}}. \quad \text{(XVI.2)}$$

Допустимая величина напряжения помехи, наводимой на обмотке трансформатора, определяется наименьшей рабочей амплитудой полезного сигнала на данной обмотке. В боль-

шинстве случаев практики необходимо, чтобы амплитуда напряжения наводимой помехи была в несколько раз меньше наименьшей рабочей амплитуды сигнала.

Амплитуду эдс помехи, наводимой на обмотке неэкранированного трансформатора броневоего типа, можно найти по общеизвестному выражению, определяющему эдс, наводимую в обмотке синусоидальным магнитным полем:

$$E_{\Pi} = \omega_{\Pi} \varpi \Phi_{\Pi} \cdot 10^{-8} \text{ в}, \quad (\text{XVI.3})$$

где ω_{Π} — угловая частота поля помехи,

ϖ — число витков обмотки,

Φ_{Π} — полный магнитный поток поля помехи, проходящий через витки обмотки.

Так как магнитная проницаемость материала сердечника высока, почти все силовые линии поля помех, наводящие эдс в обмотках, проходят по сердечнику; заменяя полный поток помехи в стержне Φ_{Π} через индукцию помехи B_{Π} и чистое сечение стержня q_c , получим:

$$E_{\Pi} = \omega_{\Pi} \varpi B_{\Pi} q_c \cdot 10^{-8} \text{ в}. \quad (\text{XVI.4})$$

Если бы силовые линии поля помех не собирались сердечником трансформатора, то индукция в стержне B_{Π} была бы численно равна напряжённости поля помехи H_{Π} ; в действительности сердечник стягивает к себе силовые линии, искажая поле, вследствие чего индукция, вызванная полем помехи в стержне трансформатора, превышает напряжённость поля:

$$B_{\Pi} = \kappa_{\Pi} H_{\Pi}, \quad (\text{XVI.5})$$

где κ_{Π} — коэффициент, учитывающий концентрацию линий поля сердечником; его значение зависит от формы сердечника, его размеров и расстояния трансформатора от источника поля помехи. Измерения показали, что в обычных случаях величина этого коэффициента лежит в пределах от 3 до 5. Подставляя значение B_{Π} в (XVI.4), найдём

$$E_{\Pi} = \omega_{\Pi} \varpi \kappa_{\Pi} H_{\Pi} q_c \cdot 10^{-8} \text{ в}. \quad (\text{XVI.6})$$

При включении трансформатора в схему его первичная обмотка замыкается на сопротивление источника сигнала R_i , а вторичная обмотка нередко нагружается шунтом. Пренебрегая для упрощения расчётов активным сопротивлением обмоток, получим эквивалентную схему входного трансформатора для частот помех, лежащих в области низших и средних рабочих частот в виде, изображённом на рис. XVI.7.

Из этой схемы нетрудно найти, что напряжение помех на концах первичной обмотки будет

$$U_{\Pi} = E_{\Pi} \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (\omega_{\Pi} L_1)^2}} = \frac{E_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_{\Pi} L_1}{R_2}\right)^2}}, \quad (\text{XVI.7})$$

где

$$R_2 = \frac{R_1 R_2'}{R_1 + R_2'} = R_1 \frac{\alpha}{1 + \alpha}. \quad (\text{XVI.8})$$

Заменяя E_{Π} на его значение и деля результат на $U_{\Pi\partial}$, получим расчётную формулу для определения необходимого коэффициента экранирования:

$$\beta_{\text{необх}} = \frac{6,28 \cdot 10^{-8} \kappa_{\Pi} \omega f_{\Pi} H_{\Pi} q_c}{U_{\Pi\partial} \sqrt{1 + \left[\frac{6,28 f_{\Pi} L_1 (1 + \alpha)}{\alpha R_1} \right]^2}}, \quad (\text{XVI.9})$$

$$\beta_{\text{необх дб}} = 20 \lg \frac{6,28 \cdot 10^{-8} \kappa_{\Pi} \omega f_{\Pi} H_{\Pi} q_c}{U_{\Pi\partial} \sqrt{1 + \left[\frac{6,28 f_{\Pi} L_1 (1 + \alpha)}{\alpha R_1} \right]^2}},$$

где f_{Π} — частота поля помехи в герцах.

Напряжённость магнитного поля помех, излучаемого трансформаторами накала, трансформаторами питания анодных выпрямителей, электродвигателями, быстро падает с увеличением расстояния от источника помех.

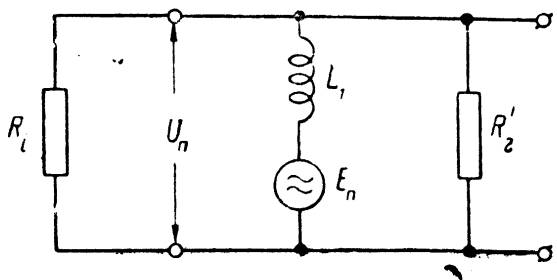


Рис. XVI.7. Эквивалентная схема для определения напряжения помех на первичной обмотке трансформатора

Полярная диаграмма излучения помехи зависит от формы источника помех, его конструкции, режима работы, частоты и бывает чрезвычайно разнообразной. В большинстве случаев источник помех не является простым излучателем, а представляет собой систему излучателей

с диаграммами излучения различной формы, напряжённости и направления. Поэтому в пространстве вокруг источника помех существуют зоны и направления, где напряжённость поля наименьшая, но отсутствуют места, где напряжённость поля помехи равна нулю. Кроме того, в проектируемом приборе, а также недалеко от него нередко имеется несколько трансформаторов или электродвигателей, излучающих помехи.

Поэтому полностью защитить от помех входной трансформатор выбором его положения относительно источников помех не удаётся, хотя эта мера позволяет сильно уменьшить помехи, и всегда должна использоваться.

Примерами сложных источников помех являются трансформатор двухполупериодного анодного выпрямителя и асинхронный электродвигатель переменного тока. Трансформатор выпрямителя излучает внешнее магнитное поле частоты питания (обычно 50 гц) вследствие наличия разности магнитного потенциала между концами ярма; кроме того, он излучает с другой полярной диаграммой поле удвоенной и кратных ей высших частот (100, 200 гц и т. д.) из-за магнитного рассеяния между первичной и вторичной обмотками. Асинхронный электродвигатель переменного тока излучает после частоты питания вследствие магнитного рассеяния статора и поле частоты зубцов якоря, вызываемое изменением магнитного сопротивления между полюсами статора при прохождении якорных зубцов.

Снижение напряжённости поля помех может быть достигнуто, кроме экранирования входного трансформатора, ещё двумя способами: экранированием самого источника помех и уменьшением в нём магнитной индукции. Первый способ приводит к ухудшению теплоотдачи, и заставляет уменьшать плотность тока и индукцию, что ведёт к увеличению расхода материалов; второй способ непосредственно увеличивает размеры и расход материалов на трансформатор или электродвигатель. Поэтому на практике не следует применять указанных способов без необходимости.

Измерения магнитного поля помех, проведённые в аппаратуре, питаемой от сети переменного тока, показали, что на расстоянии $10 \div 30$ см от трансформатора питания или небольшого электродвигателя напряжённость поля помех достигает $0,025 \div 0,1$ э. Полагая, что наводимая на экранируемый трансформатор эдс помехи может быть снижена в два-три раза правильным расположением его относительно источника помех, получим, что осевая составляющая поля помех, наводящая эдс в обмотках экранируемого трансформатора, может достигать $10 \div 50$ миллиэрстед. Поэтому, если напряжённость поля помех в проектируемом приборе неизвестна, что обычно и бывает на практике, то ориентировочный расчёт необходимого экранирования производят по ф-ле (XVI. 9), считая напряжённость поля помех указанною выше порядка.

В аппаратуре, питаемой от постоянного тока и не содержащей трансформатора анодного питания, дросселей фильтра, электродвигателей, вибропреобразователей, напряжённость магнитного поля помех обычно значительно ниже, и в основном определяется соседней аппаратурой и выходными трансформаторами самого прибора; указать хотя бы ориентировочно,

какие-либо цифры в этом случае не представляется возможным.

Если трансформатор, к которому нужно рассчитать экран, стержневого типа, то расчёт экранирования производят так же, как для броневых трансформаторов, но полученный коэффициент экранирования $\beta_{\text{необх}}$ уменьшают в 5–7 раз, учитывая взаимное уничтожение эдс помехи двумя катушками трансформатора. Следует отметить, что стержневой трансформатор требует симметричной установки в экране и симметрии самого экрана для получения хорошей компенсации помех; броневой трансформатор в этом отношении нетребователен.

§ XVI.5. Расчёт коэффициента экранирования магнитного экрана по его конструктивным данным

Для того, чтобы убедиться, что сконструированный для трансформатора экран даёт достаточное экранирование, необходимо рассчитать коэффициент экранирования по конструктивным данным экрана. Точный расчёт экранирующего действия ферромагнитного экрана представляет значительные математические трудности и в большинстве случаев практики не имеет смысла, так как поле помех не бывает точно известным. Поэтому для практических целей вполне достаточен приближённый расчёт, позволяющий без сложных вычислений ориентировочно определить коэффициент экранирования β_k по конструктивным данным экрана, сердечника трансформатора и начальной проницаемости материала экрана. Пренебрегая эффектом экранирования, вызываемым вихревыми токами, и введя некоторые допущения, нетрудно получить расчётные формулы, дающие достаточную для практики точность.

Предположим для упрощения, что картина поля при окружении трансформатора экраном остаётся той же, какой она была при трансформаторе без экрана, и что полный магнитный поток поля помехи $\Phi_{\text{П}}$, проходящий через сердечник неэкранированного трансформатора, равен потоку, входящему в экран на поверхности, расположенной против поверхности ярма сердечника. При наличии экрана этот магнитный поток разделится на две части: одна пойдёт по толще экрана, а другая через немагнитный промежуток попадёт в сердечник трансформатора. Часть $\Phi_{\text{Пэ}}$, попадающая в сердечник, будет во столько раз меньше части, проходящей по толще экрана, во сколько раз магнитное сопротивление экрана R_s меньше магнитного сопротивления немагнитного промежутка R_n . Нетрудно видеть, что при экране магнитный поток, попадающий в сердечник, уменьшится в отношении

$$\frac{\Phi_{\text{П}}}{\Phi_{\text{Пэ}}} = 1 + \frac{R_n}{R_s}. \quad (\text{XVI.10})$$

Магнитное сопротивление экрана можно приближённо считать равным

$$R_{\varepsilon} \approx \frac{l_{\varepsilon}}{\delta_{\varepsilon} \rho_{\varepsilon} \mu_{\kappa}}, \quad (\text{XVI.11})$$

где l_{ε} — меньший полупериметр прямоугольного экрана в плоскости, параллельной оси катушки (рис. XVI. 8),

ρ_{ε} — периметр экрана в плоскости, перпендикулярной оси катушки,

δ_{ε} — толщина экрана,

μ_{κ} — начальная магнитная проницаемость материала экрана.

Магнитное сопротивление второго пути через сердечник можно приближённо определить, как

$$R_{\kappa} \approx \frac{2 \delta_{\kappa}}{l y_2}, \quad (\text{XVI.12})$$

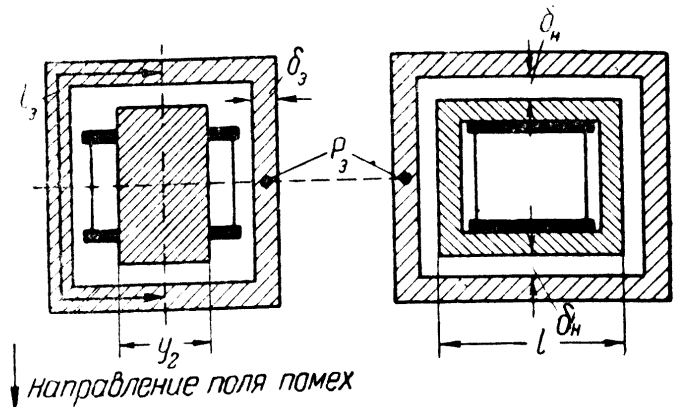


Рис. XVI.8. К расчёту коэффициента экранирования экрана из магнитного материала

где δ_{κ} — расстояние между сердечником и экраном в направлении оси катушки (с одной стороны),

y_2 — толщина набора сердечника,

l — длина яра сердечника в направлении, перпендикулярном оси катушки (равная сумме $y_1 + 2b + 2y_3$).

Знаменатель выражения (XVI.12) представляет собой площадь стороны сердечника, перпендикулярной оси катушки; магнитным сопротивлением самого сердечника ввиду его малости по сравнению с сопротивлением немагнитных промежутков пренебрегаем.

Подставив значения R_{ε} и R_{κ} в (XVI.10) и полагая, что отношение Φ_{Π} к $\Phi_{\Pi\varepsilon}$ равно коэффициенту экранирования, получим

$$\beta_{\kappa} = \frac{E_{\Pi}}{E_{\Pi\varepsilon}} = \frac{\Phi_{\Pi}}{\Phi_{\Pi\varepsilon}} = 1 + \frac{2 \delta_{\kappa} \rho_{\varepsilon} \delta_{\varepsilon} \mu_{\kappa}}{l y_2 l_{\varepsilon}}. \quad (\text{XVI.13})$$

При больших значениях коэффициента экранирования единицей по сравнению с правым слагаемым можно пренебречь, и формула примет более простой вид.

Измерения показали, что ф-ла (XVI.13) даёт хорошее совпадение расчёта с измерением, если расстояние между сердечником и экраном не превышает 0,05÷0,1 наружного размера сердечника, а экран представляет собой закрытую со всех сторон прямоугольную конструкцию одной и той же толщины. Открытые с двух сторон прямоугольные экраны дают значительно меньшее экранирование, а поэтому их применение на практике нерационально.

Коэффициент экранирования, получаемый при применении двойного экрана (рис. XVI.2), можно приближённо найти как произведение коэффициента экранирования трансформатора внутренним экраном на коэффициент экранирования внутреннего экрана наружным. Расчёт коэффициента экранирования трансформатора внутренним экраном производят по ф-ле (XVI.13), подставляя в неё размеры и данные внутреннего экрана и сердечника трансформатора. Расчёт коэффициента экранирования внутреннего экрана наружным можно производить по той же ф-ле (XVI.13), подставив в неё в качестве δ_n расстояние между внутренним и наружным экранами со стороны ярма трансформатора, в качестве площади ярма ly_2 — площадь стороны внутреннего экрана, находящейся рядом с ярмом (площадь верхней или нижней стороны внутреннего экрана на рис. XVI.2); остальные размеры и данные, входящие в формулу, берут для наружного экрана.

Для иллюстрации порядка величины коэффициента экранирования различных экранов и влияния размеров трансформатора на экранирование в табл. XVI.1 приведены данные изме-

Т а б л и ц а XVI.1

Размер сердечника трансформатора	Данные экрана	Коэффициент экранирования β
Ш-12 × 12 „безотходной“ штамповки	Экран из листовой стали толщиной 0,5 мм с начальной проницаемостью около 100, расстояние от сердечника 3 мм	2,5
То же	Экран из листовой стали толщиной 3 мм с начальной проницаемостью около 100, расстояние от сердечника 3 мм	10
„	Экран из пермаллоя толщиной 0,35 мм с начальной проницаемостью около 5000, расстояние от сердечника 1 мм	20
„	Экран такой же, как в предыдущем случае, но расстояние от сердечника 3 мм	50
Ш-20 × 30 промежуточно- го типа	Экран из листовой стали толщиной 0,5 мм с начальной проницаемостью около 100, расстояние экрана от сердечника 5 мм	1,5
То же	Экран из листовой стали толщиной 3 мм с начальной проницаемостью около 100, расстояние экрана от сердечника 5 мм	4
„	Экран из пермаллоя толщиной 0,35 мм с начальной проницаемостью около 5000, расстояние от сердечника 3 мм	11
„	Экран такой же, как и в предыдущем случае, расстояние от сердечника 5 мм	17

рений, полученные для трансформаторов различных размеров и с разными экранами.

§ XVI.6. Защита трансформатора от внешних воздействий

В условиях эксплуатации трансформатор подвергается различным внешним воздействиям: механическим сотрясениям и ударам, изменению температуры, воздействию влаги, различных газов, паров, изменению атмосферного давления. Для того, чтобы трансформатор не мог выйти из строя от воздействия этих факторов, он должен быть достаточно хорошо защищён.

Наиболее опасным для трансформатора, если не считать механических повреждений, является воздействие на него газов и паров, химически действующих на обмотки или сердечник, а также действие влаги. Попадание влаги в катушку трансформатора резко снижает сопротивление изоляции трансформатора и его электрическую прочность, результатом чего обычно является пробой изоляции между обмотками и выход трансформатора из строя. Кроме того, длительное воздействие влаги на обмотки трансформатора в присутствии углекислоты воздуха и органических материалов вызывает коррозию провода, что при небольших диаметрах провода приводит к его разрушению (появлению обрывов в обмотках).

Для защиты трансформатора от внешних воздействий применяют ряд способов, основными из которых являются:

- 1) пропитка лаком,
- 2) проварка в парафине, церезине или специальном составе (компаунде),
- 3) обливка готового трансформатора специальным составом,
- 4) помещение трансформатора в закрытый кожух,
- 5) герметизация трансформатора.

Пропитка лаком является наиболее простой мерой защиты трансформатора от действия влаги, и пригодна только для трансформаторов стационарной аппаратуры, работающей в студиях, аппаратных и т. д.; для трансформаторов, работающих в тяжёлых условиях, такая защита недостаточна.

Кроме защиты от внешних воздействий, пропитка и проварка повышают теплопроводность катушки трансформатора, что приводит к снижению перепада температуры в обмотке, а следовательно, к понижению температуры нагрева внутренних слоёв. Как указывалось в § XIII.5, пропитка лаком повышает температуростойкость проводов с органической волокнистой изоляцией с 90° до 105°C .

Перед пропиткой трансформаторы или их катушки просушивают в течение $5 \div 10$ часов в сушильной печи при температуре $100 \div 110^{\circ}\text{C}$, после чего погружают в подогретый и разбавленный до надлежащей густоты пропиточный электроизоляционный лак, где держат до прекращения выделения

пузырьков. После этого трансформаторы вынимают, дают излишку лака стечь и снова сушат при том режиме, который рекомендуется для применённого сорта лака.

Значительно сильнее повышает стойкость и электрическую прочность трансформатора вакуумная сушка и пропитка в автоклавах. При этом сушку ведут в автоклаве под вакуумом с остаточным давлением не выше ста миллиметров ртутного столба, а затем в автоклав вводят подогретый пропиточный лак или компаунд и, не выключая подогрева, дают повышенное давление. Такой процесс сильно ускоряет пропитку, не снижая её качества.

При пропитке трансформаторов, намотанных из провода с эмалевой изоляцией, пропитку следует производить быстро, чтобы уменьшить вредное влияние горячего лака на эмаль; при этом следует применять пропиточные лаки, не содержащие ароматических растворителей.

Проварка катушки в парафине, церезине или специальных составах так же, как и пропитка лаком, защищает катушку трансформатора от действия влаги, но не является температуростойкой и поэтому применяется для трансформаторов, работающих при невысокой температуре. Для полного удаления влаги из трансформатора и повышения его электрической прочности проварку следует производить при пониженном давлении. Проварка в парафине производится при температуре $90 \div 100^\circ\text{C}$, в церезине — при $100 \div 110^\circ\text{C}$; проварку ведут до прекращения пенообразования. Применяемый для проварки состав не должен содержать свободных кислот и щелочей, так как иначе он будет вызывать разрушение провода обмотки. Проваренные трансформаторы вынимают из проварочного бака тогда, когда бак остынет настолько, что температура состава будет лишь немного выше точки его плавления.

Обливка трансформаторов с поверхности специальным составом применяется в качестве дополнительной защитной меры от действия влажности и механических повреждений для трансформаторов, работающих в тяжёлых эксплуатационных условиях. Перед обливкой трансформатор или хотя бы его катушку следует пропитать лаком или проварить. Для обливки холодный трансформатор на короткое время погружается в расплавленный обливочный состав, после чего трансформатор оказывается покрытым ровным слоем этого состава толщиной в несколько миллиметров (рис. XVI.9). Обливочный состав должен иметь высокую температуру плавления, быть механически прочным, не должен отставать от трансформатора и не должен трескаться при резких изменениях температуры.

Помещение трансформатора в закрытый негерметизированный кожух без заливки защищает его от механических повреждений и внешних полей, но не от действия влаги. Поэтому

для получения хорошей влагостойкости пропитанные или проваренные трансформаторы помещают в кожух и заливают расплавленной заливочной массой. Для заливки применяют вязкие смеси с высокой температурой плавления или битумы.

Герметизация применяется для трансформаторов, работающих в особо тяжёлых условиях. К таким условиям относятся

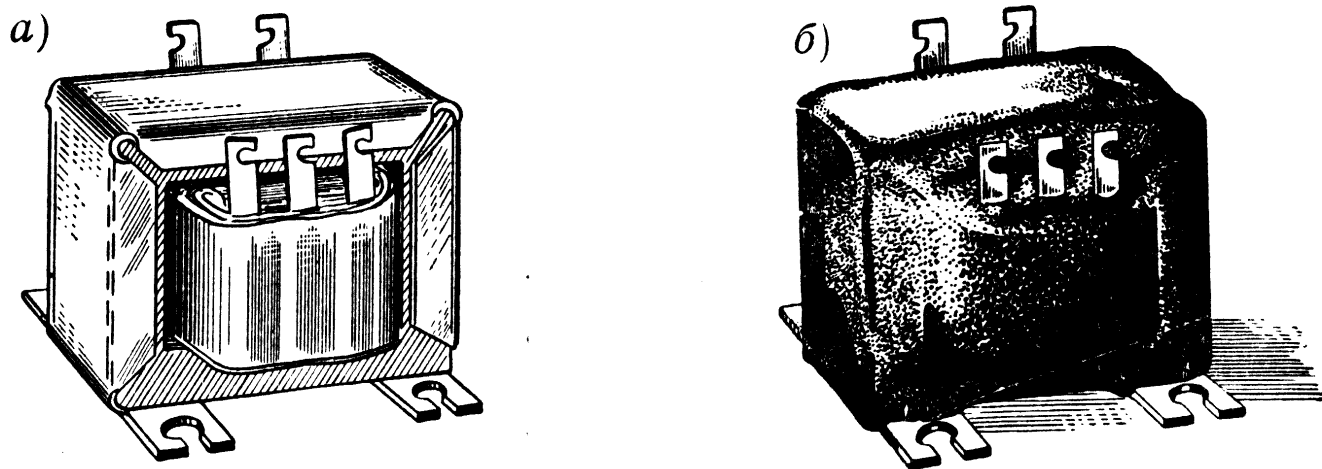


Рис. XVI.9. Трансформатор до обливки защитным составом (а) и после обливки (б)

резкие изменения температуры и давления, возможность непосредственного попадания влаги, работа в атмосфере паров

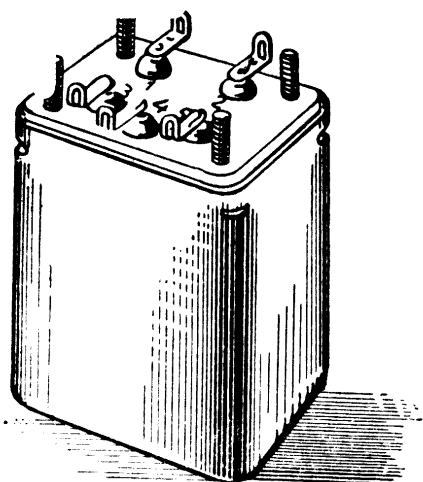


Рис. XVI.10. Герметизированный трансформатор с выводом через стеклянные глазки

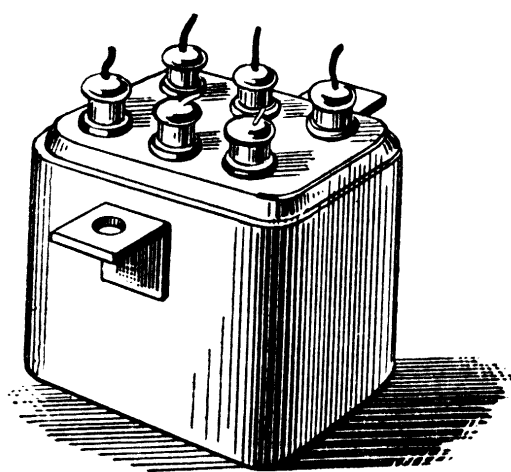


Рис. XVI.11. Герметизированный трансформатор с выводами через фарфоровые проходные изоляторы

или газов, химически воздействующих на трансформатор. Герметизируемый трансформатор предварительно пропитывают лаком и просушивают или проваривают в изоляционном составе, а затем помещают в металлический кожух с крышкой, на которой впаяны герметизированные выводы — стеклянные „глазки“ (рис. XVI.10) или фарфоровые герметизированные изоляторы проходного типа (рис. XVI.11). Закрепив трансформатор на крышке, последнюю припаивают к кожуху; вся

конструкция должна быть герметичной. В некоторых случаях вместо крепления к крышке трансформатор заливают в кожухе заливочной массой.

Более подробные сведения о сушке, пропитке, проверке и герметизации трансформаторов можно найти в специальной литературе по технологии производства [Л26].

§ XVI.7. Примеры расчёта

Пример 1. Рассчитаем необходимый коэффициент экранирования для входного трансформатора с сердечником броневое типа при следующих данных:

Наименьшая рабочая амплитуда сигнала на первичной обмотке	$U_{1 \text{ мин}} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ в}$
Допустимая амплитуда наводимого напряжения помехи	$U_{\text{Пд}} = 3 \cdot 10^{-7} \text{ в}$
Основная частота поля помехи	$f_{\text{П}} = 100 \text{ гц}$
Число витков первичной обмотки	$w_1 = 100$
Чистое сечение сердечника	$q_c = 0,475 \text{ см}^2$
Индуктивность первичной обмотки	$L_1 = 0,1 \text{ гн}$
Сопротивление источника эдс	$R_i = 20 \text{ ом}$
Приведённое сопротивление шунта	$R'_2 = 100 \text{ ом.}$

Найдя, что $\alpha = \frac{R'_2}{R_i} = 5$, полагая осевую напряжённость поля помехи $H_{\text{П}}$ равной 0,05 э и беря среднее значение $\kappa_{\text{П}} = 4$, получим

$$\begin{aligned} \beta_{\text{необх}} &= \frac{6,28 \cdot 10^{-8} \kappa_{\text{П}} w_1 f_{\text{П}} H_{\text{П}} q_c}{U_{\text{Пд}} \sqrt{1 + \left[\frac{6,28 f_{\text{П}} L_1 (1 + \alpha)}{\alpha R_i} \right]^2}} = \\ &= \frac{6,28 \cdot 10^{-8} \cdot 4 \cdot 100 \cdot 100 \cdot 5 \cdot 10^{-2} \cdot 0,475}{3 \cdot 10^{-7} \sqrt{1 + \left[\frac{6,28 \cdot 100 \cdot 0,1 (1 + 5)}{5 \cdot 20} \right]^2}} = 51. \end{aligned}$$

Приведённый пример относится к трансформатору с сердечником из пермаллоя; при использовании для сердечника трансформаторной стали сечение сердечника возрастает в несколько раз, а также увеличивается число витков первичной обмотки. В результате необходимый коэффициент экранирования сильно растёт, и вся конструкция получается гораздо больших размеров и веса, чем при сердечнике из пермаллоя, а иногда даже оказывается конструктивно невыполнимой. Поэтому для входных трансформаторов, работающих с очень малой амплитудой сигнала, применение пермаллоя для сердечника и для экрана приводит не только к уменьшению размеров экранированного трансформатора, но и снижает его стоимость.

Пример 2. Рассчитаем коэффициент экранирования экрана, изображённого на рис. XVI.5. Экран сделан из двухдвигающихся друг в друга прямоугольников, свёрнутых в 3 слоя из пермаллоевой ленты толщиной в 0,4 мм (общая толщина $\delta_э = 0,12$ см); вдвинутые друг в друга прямоугольники образуют закрытый со всех сторон одинарный экран. Начальная проницаемость применённого пермаллоя на низких частотах равна 5000 гс/э. Размеры сердечника трансформатора следующие: $y_2 = 1,5$ см; $l = 4$ см; расстояние между сердечником и экраном в направлении оси катушки $\delta_к = 0,25$ см, периметр экрана $p_э$, перпендикулярный оси катушки, равен 18 см; полупериметр его $l_э$, параллельный оси катушки, равен 9 см. Подставив эти данные в (XVI.13), получим

$$\beta_k = 1 + \frac{2\delta_k p_э \delta_э \mu_k}{ly_2 l_э} = 1 + \frac{0,5 \cdot 18 \cdot 0,12 \cdot 5000}{4 \cdot 1,5 \cdot 9} \approx 100, \text{ т. е. } 40 \text{ дб.}$$

Измерения, произведённые с экраном и трансформатором, имеющими приведённые в этом примере данные, дали значение коэффициента экранирования на частоте 100 гц, равное 39 дб.
