

# Широкополосные трансформаторы

50-омные блоки имеют внутри себя цепи с сопротивлением, часто значительно отличающимся от 50 Ом и лежащим в пределах 1-500 Ом. К тому же необходимо, чтобы вход/выход 50-омного звена был симметричным или несимметричным. В этом смысле согласование должно выполняться относительно входов/выходов сигнала.

Для взаимного соединения ВЧ-блоков целесообразно использовать различные пассивные устройства, обладающие широкой полосой пропускания, свободной от резонансов, а именно аperiodические трансформаторы, выполненные в виде традиционных согласующих трансформаторов (с магнитной связью) или трансформаторов на линии<sup>11</sup>. Для оптимального использования полоса их рабочих частот должна быть выбрана несколько больше ширины спектра сигнала.

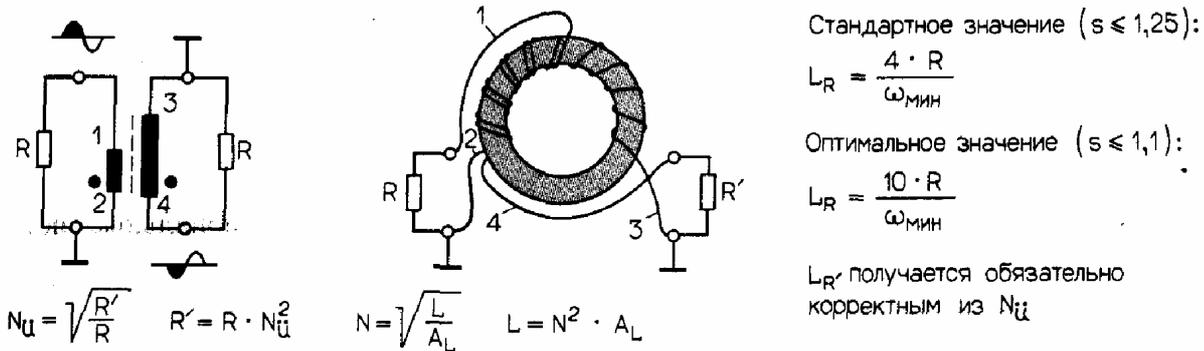


Рис. 1.2. Схема трансформатора и расположение обмоток на тороидальном сердечнике при произвольном значении коэффициента трансформации  $s$ . Приведенные здесь расчетные формулы находят широкое применение.

Обмотки трансформатора размещаются чаще всего на тороидальном или трубчатом сердечнике из феррита, обладающем соответствующими частотными и мощностными свойствами с относительно высокой начальной магнитной проницаемостью  $\mu$  и высоким коэффициентом индуктивности  $A_L$ . Тщательный выбор размеров трансформатора приводит к тому, что вносимое им затухание  $A_i$  будет менее 0,8 дБ, как правило 0,3-0,6 дБ, реже 0,1-0,3 дБ при сопротивлениях  $\leq 250$  Ом, на частотах  $\leq 50$  МГц. При этом коэффициент стоячей волны (КСВ) не превышает 1,25 ( $s \leq 1,25$ ).

Прежде всего скажем немного о согласующих трансформаторах. Они позволяют получить желаемый коэффициент трансформации  $Z_u$ , значение которого может выбираться в широких пределах. Полоса рабочих частот составляет около пяти октав при сопротивлениях  $\leq 250$  Ом. На более высоких частотах следует учитывать ухудшение коэффициента трансформации  $Z_u$  и уменьшение полосы пропускания, вызванные влиянием паразитной распределенной емкостной связи, а также значительное увеличение вносимого затухания  $A_i$ .

Эквивалентная электрическая схема и расположение обмоток на тороидальном сердечнике трансформатора для произвольного  $Z_u$  приведены на рис. 1.2. В данном случае можно включать трансформатор в режиме без поворота фазы. Этот трансформатор можно использовать и с двусторонней симметричной нагрузкой.

Расчетные соотношения, представленные на рис. 1.2, справедливы для всех случаев. Обмотки трансформаторов выполняются скрученными между собой проводами с целью получения оптимального коэффициента связи (на рисунках для наглядности показано параллельное расположение проводов). Обязательно соблюдайте верную фазировку включения обмоток, обращайте внимание на концы, обозначенные точками.

На рис. 1.3 представлены схема и расположение обмоток на тороидальном сердечнике для двух трансформаторов, у которых  $Z_u = 1:| > 1 \dots < 4 |$ . В этом устройстве используется так называемая квазилиния, и поэтому оно обладает очень широкой полосой рабочих частот. Практически электрическую длину линии выбирают значительно меньше  $\lambda/4$  ( $\approx 0,05-0,15\lambda$ ). Конструкция на основе коаксиального кабеля предпочтительнее в каскадах усиления мощности. В данном случае поворот фазы невозможен.

Схема и расположение обмоток на тороидальном сердечнике согласующего трансформатора с  $Z_u 1:4:9$  представлена на рис. 1.4. Поворот фазы невозможен; для преодоления этого недостатка можно использовать вариант схемы, изображенный на рис. 1.2.

Схема и расположение обмоток на тороидальном сердечнике трансформатора, согласующего симметричную и несимметричную нагрузки с  $Z_u 1:|2:2|$ , изображена на рис. 1.5. Такую схему можно применять и в случае симметричной нагрузки с обеих сторон.

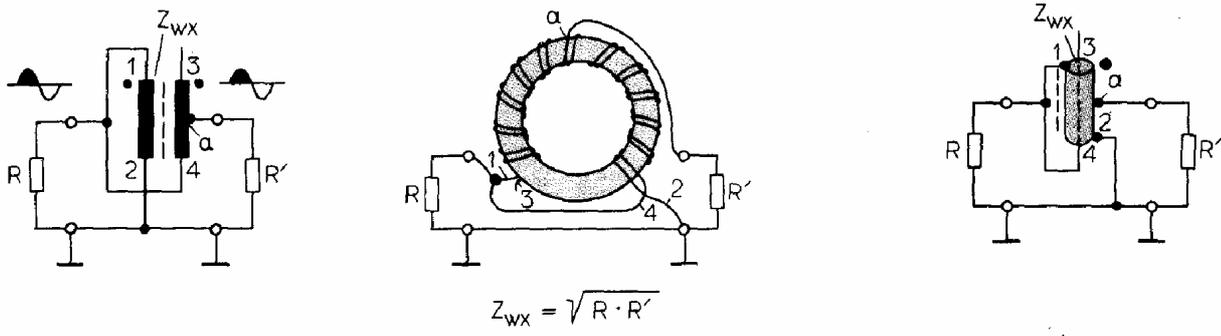


Рис. 1.3. Схемы двух трансформаторов и расположение обмоток на тороидальном сердечнике при коэффициенте трансформации  $Z_{wx}(1: >1- <4)$ .

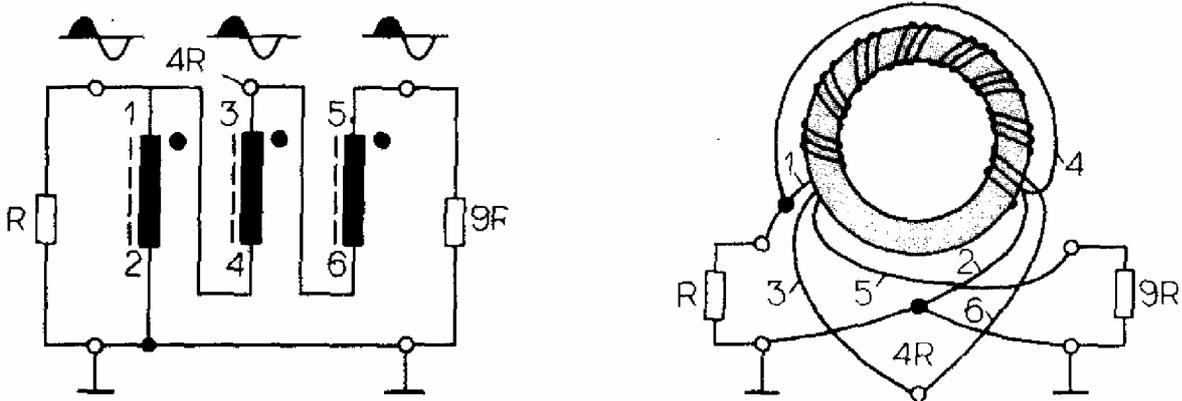


Рис. 1.4. Схема трансформатора и расположение обмоток на тороидальном сердечнике при коэффициенте трансформации  $Z_j(1:4:9)$ .

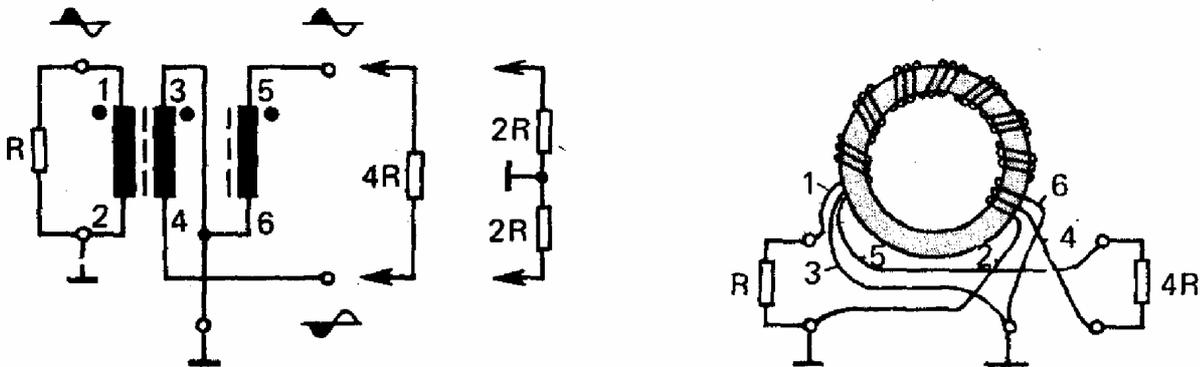


Рис. 1.5. Схема симметрирующего трансформатора и расположение обмоток на тороидальном сердечнике при коэффициенте трансформации  $Z_g(1:2:2)$ .

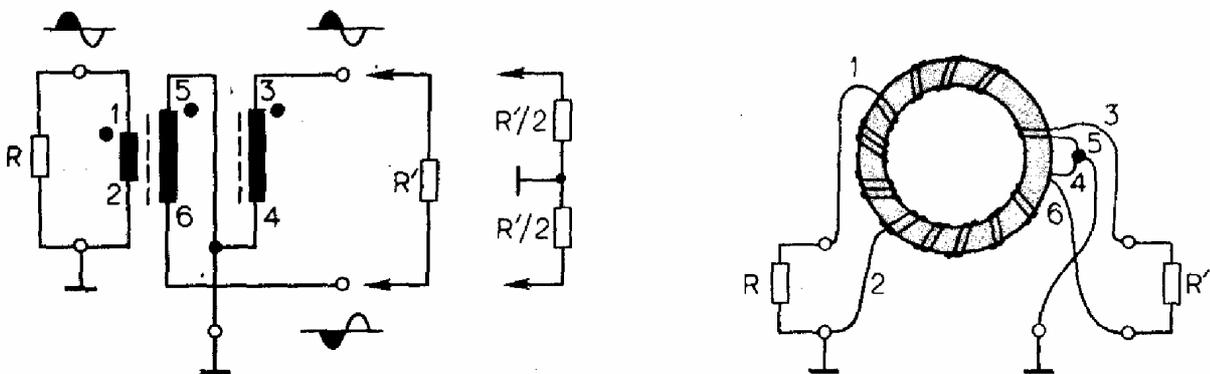


Рис. 1.6. Схема симметрирующего трансформатора и расположение обмоток на тороидальном сердечнике при коэффициенте трансформации  $Z_{jj}(1: >2:2)$ .

Схема еще одного симметрирующего трансформатора и расположение его обмоток изображены на рис. 1.6. Этот трансформатор имеет  $Z_u 1: >2:2$ . Мы можем применять данную схему в случае симметричной нагрузки с обеих сторон.

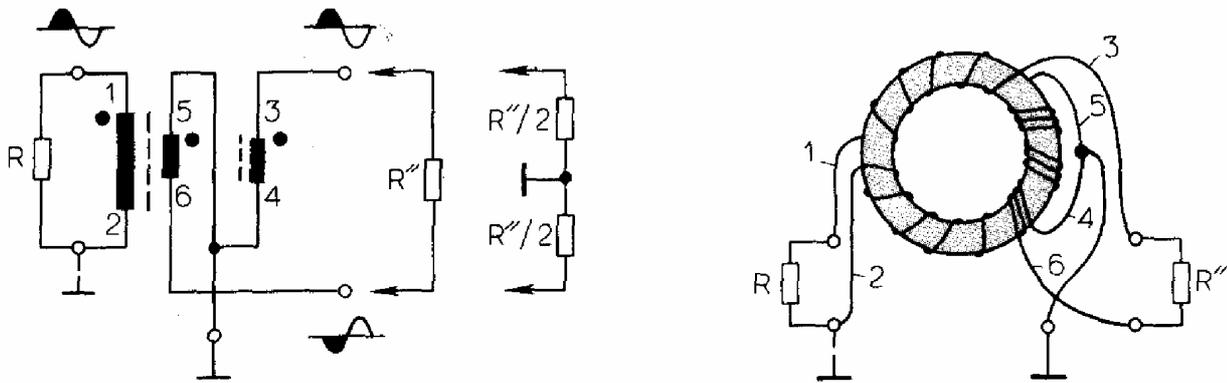


Рис. 1.7. Схема симметрирующего трансформатора и расположение обмоток на тороидальном сердечнике при коэффициенте трансформации  $Z_u$  ( $1 : <2:2$ ).

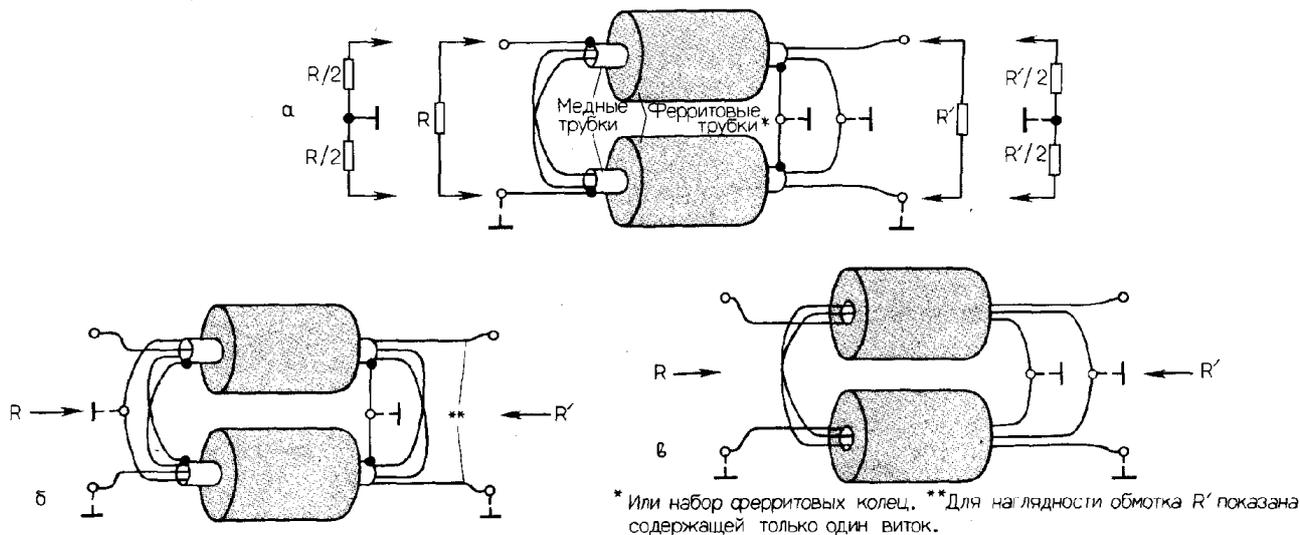


Рис. 1.8. Схема согласующего трансформатора и расположение обмоток на трубчатом сердечнике при произвольном значении коэффициента трансформации  $Z_u$ . Трансформатор используется для передачи больших мощностей.

На рис. 1.7 представлены эквивалентная схема и расположение обмоток симметрирующего трансформатора с  $Z_u$   $1 : <2:2$ . Эту схему можно использовать и в случае симметричной нагрузки с обеих сторон.

Схема и расположение обмоток на трубчатом сердечнике трансформатора с произвольным  $Z_u$  см. на рис. 1.8. Эту схему можно применять для передачи больших мощностей, в особенности при сопротивлениях  $<50$  Ом в оконечных каскадах и возбuditеле передатчиков. Возможно как синфазное, так и противофазное включение нагрузок. Трансформатор может использоваться в одноконтном режиме (класс А) в качестве симметрирующего трансформатора или как симметричный с обеих сторон (см. рис. 1.8, а)

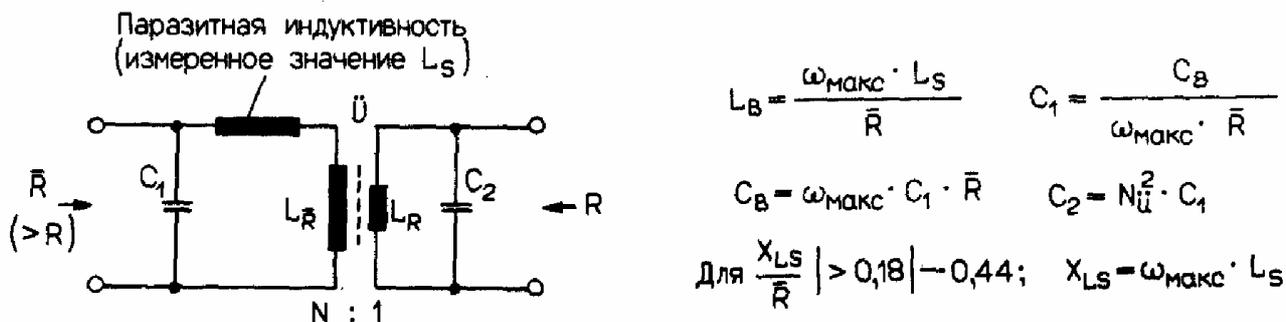


Рис. 1.9. Эквивалентная схема формулы для расчета компенсирующих элементов трансформатора.

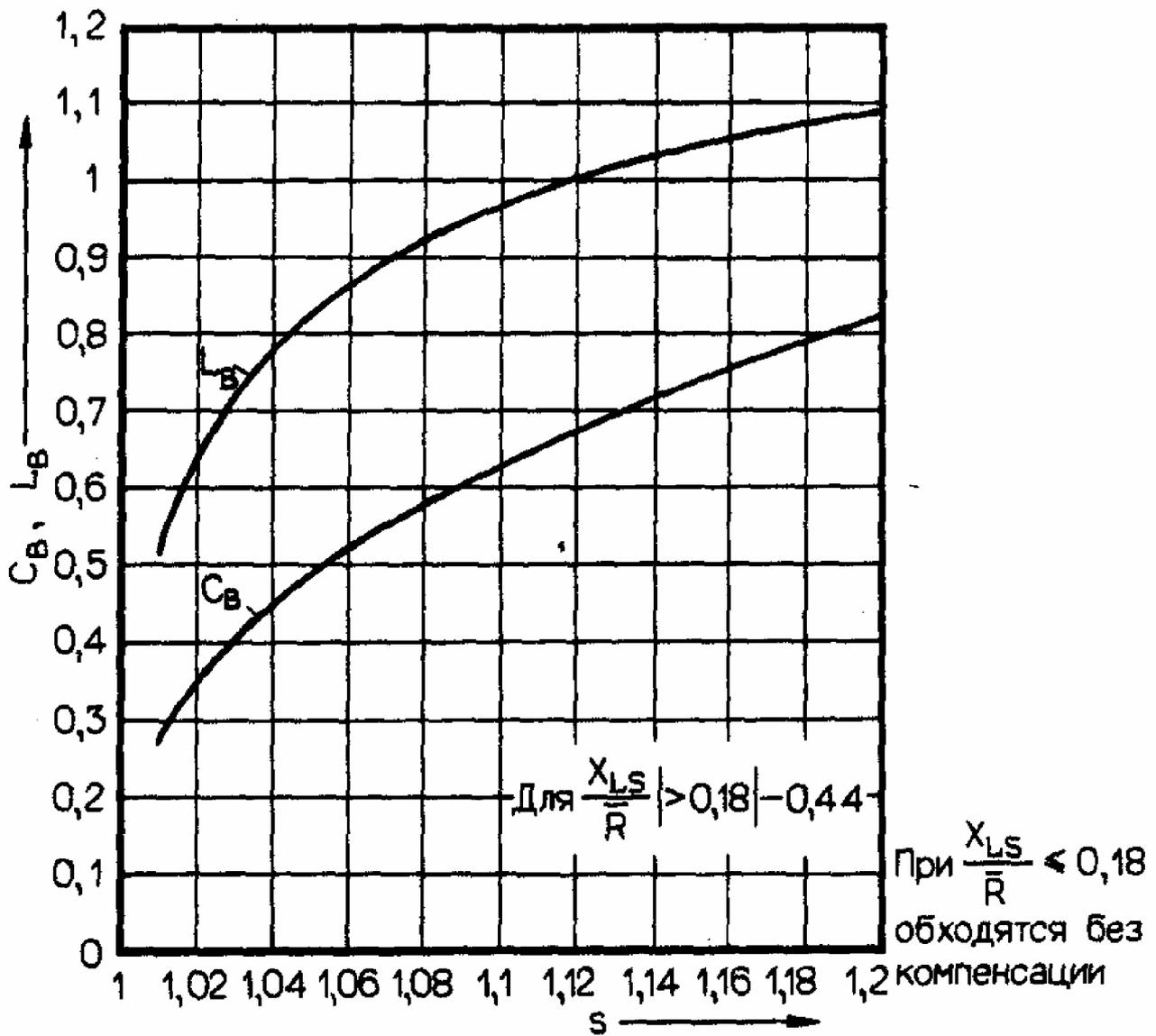


Рис. 1.10. Номограмма для определения компенсирующих емкостей { рис. 1.9).

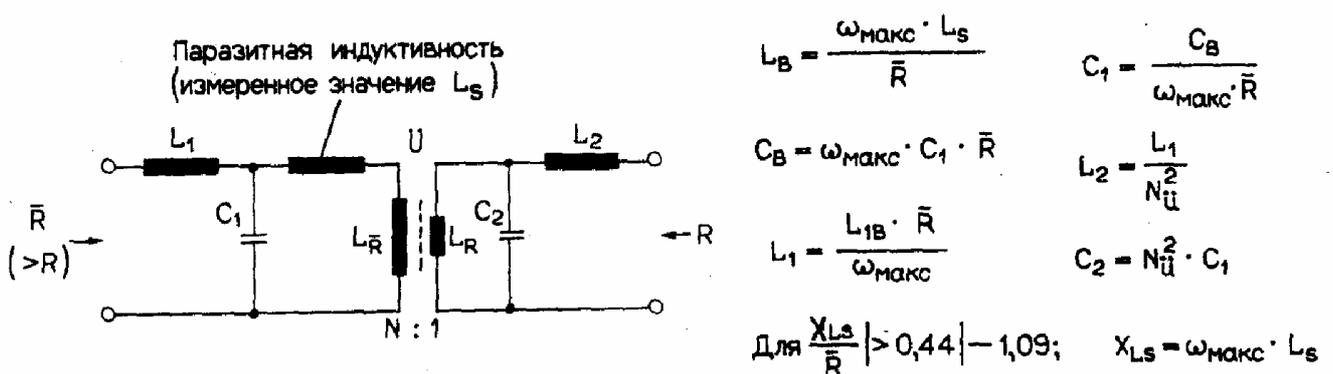


Рис. 1.11. Эквивалентная схема; формулы для определения компенсирующих элементов трансформатора в широком диапазоне частот.

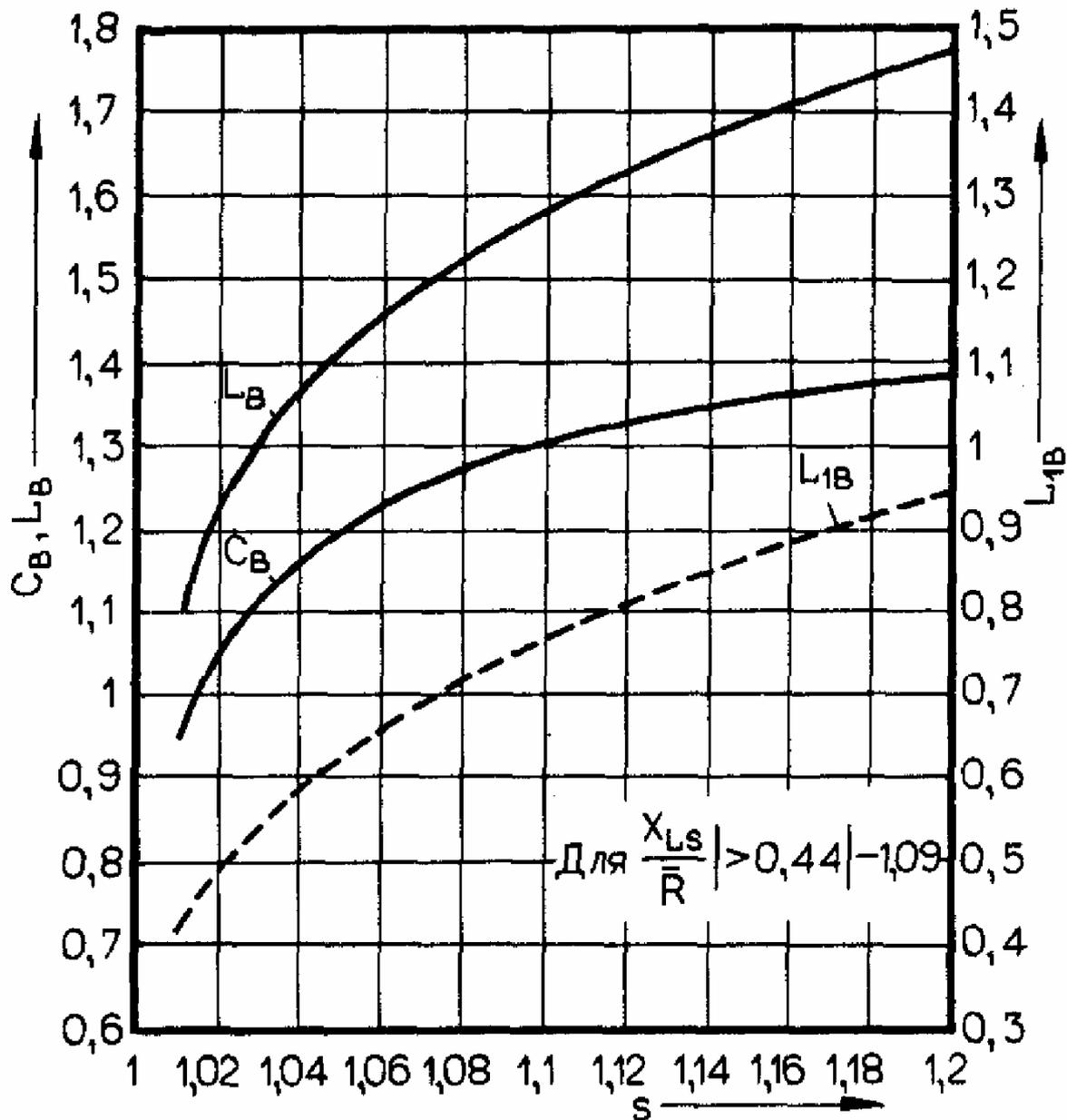


Рис. 1.12. Номограмма для определения компенсирующих емкостей и индуктивностей (к рис. 1.11).

На рис. 1.9-1.12 представлены схемы и формулы для расчета емкостной компенсации индуктивных составляющих рассеяния трансформаторов в высокочастотной области рабочих частот. Критерием, используемым при компенсации, является максимальная рабочая частота  $F_{max}$ , на которой измеряется  $L_s$  высокоомных обмоток при короткозамкнутых низкоомных обмотках.

Исходной величиной при расчете компенсации является  $L_s$ , а также допустимое значение КСВ ( $s$ ). Вначале следует определить величины  $L_v$  и  $C_v$ , соответствующие заданному  $s$ , и, наконец, необходимо рассчитать значения  $C1/C2$  или  $L1/C1/C2/L2$ ; как правило, вычисленное значение  $L2$  столь мало, что им можно пренебречь. При компенсации симметрирующих трансформаторов наличие среднего симметрирующего отвода симметричной обмотки не принимается во внимание (за исключением измерений).

Относительно компенсации согласующих традиционных трансформаторов следует, во-первых, отметить, что при сопротивлениях  $> 50$  Ом она необходима только для обеспечения чрезвычайно широкой полосы пропускания. С другой стороны, трансформаторы, используемые в каскадах усиления мощности при сопротивлениях  $\ll 50$  Ом, должны компенсироваться всегда, даже при небольших полосах пропускания; при сопротивлениях  $< 10$  Ом в диапазоне  $F_{max}$  30 МГц, типичном для широкополосной коротковолновой техники, результирующее значение емкости  $C2$  может достигать величины 1 нФ (!). Поэтому индуктивности обмоток (см. рис. 1.2) следует по возможности снижать.

И наконец, упомянем о трансформаторах на линии (с электромагнитной связью). Они в отличие от согласующих трансформаторов (с магнитной связью) должны иметь коэффициент трансформации, выраженный отношением квадратов целых натуральных чисел, таких, как 1:2, 2:2, 3:2 и т. д., что соответствует значениям  $Z_u$  1:1, 1:4, 1:9 и т. д. Это ограничение можно рассматривать как недостаток; с другой стороны, трансформаторы данного типа обладают очень широкой полосой рабочих частот, достигающей десяти октав при сопротивлениях нагрузок  $< 500 \text{ Ом}$ .

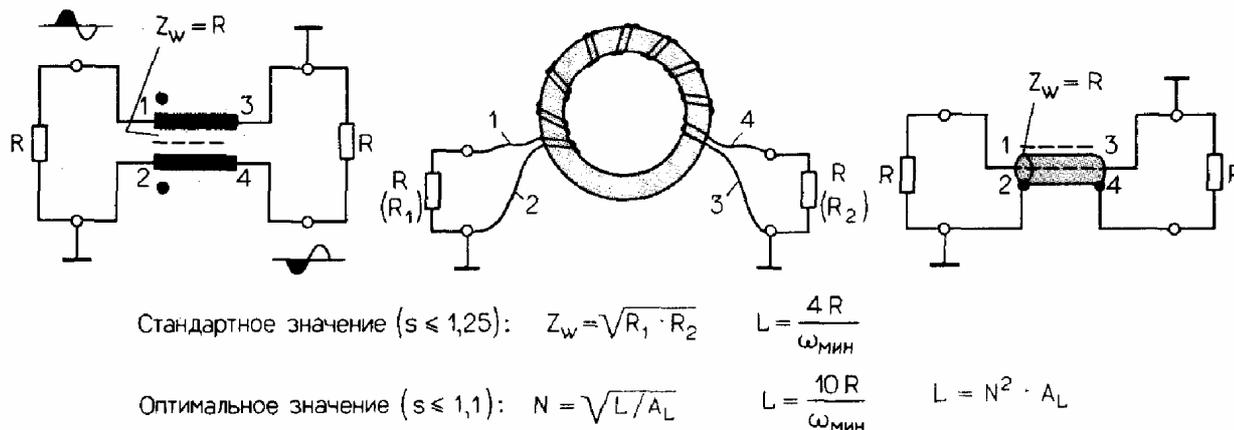


Рис. 1.13. Схемы двух трансформаторов на линии для противофазного включения нагрузок и расположение обмоток на тороидальном сердечнике при коэффициенте трансформации  $Z_u$  (1:1). Приведенные здесь формулы находят широкое применение.

Схемы и эскизы размещения обмоток на тороидальном сердечнике для двух фазоинверсных трансформаторов при  $Z_u$  1:1 приведены на рис. 1.13. Синфазное включение нагрузок в данном случае невозможно, так как теряется функция линии. К неудовлетворительным результатам приводят попытки использовать этот тип трансформатора в качестве симметрирующего. Разновидность трансформатора, выполненного на коаксиальных кабелях, применяется в основном в каскадах усиления мощности. Формулы, приведенные на рисунке, имеют широкое применение при проектировании. Конструктивная реализация линии с волновым сопротивлением  $Z_w$  будет описана ниже. Всегда обращайтесь внимание на точки, обозначающие фазировку обмоток трансформатора, и подключайте многообмоточные структуры, строго соблюдая полярность.

На рис. 1.14 приведены электрические схемы и размещение обмоток на тороидальном сердечнике для двух симметрирующих трансформаторов с  $Z_u$  1:1. Линия и вспомогательная обмотка выполняются с согласованным числом витков. Оптимальная конструкция трансформатора реализуется при использовании тороидального сердечника.

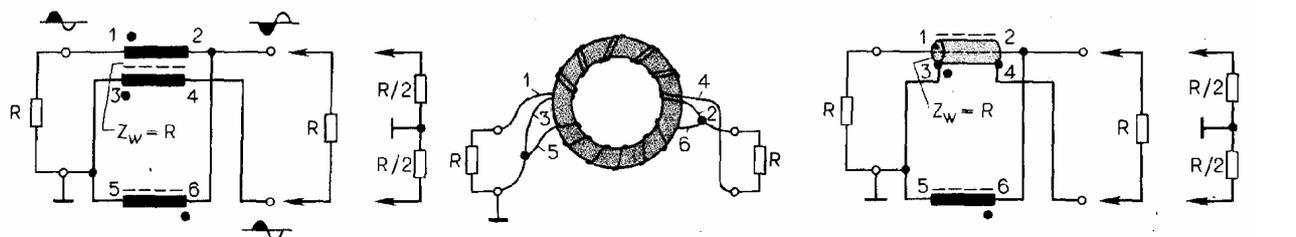


Рис. 1.14. Схемы двух симметрирующих трансформаторов на линии и расположение обмоток на тороидальном сердечнике при коэффициенте трансформации  $Z_u$  (1:1).

Схемы и размещение обмоток на тороидальном сердечнике для двух других симметрирующих трансформаторов с  $Z_u$  1:1 изображены на рис. 1.15. Эти схемы имеют средний отвод (С) с симметричной обмотки (в отличие от схем на рис. 1.14). Обе линии должны обладать почти согласованными индуктивностями и размещаться на одном сердечнике.

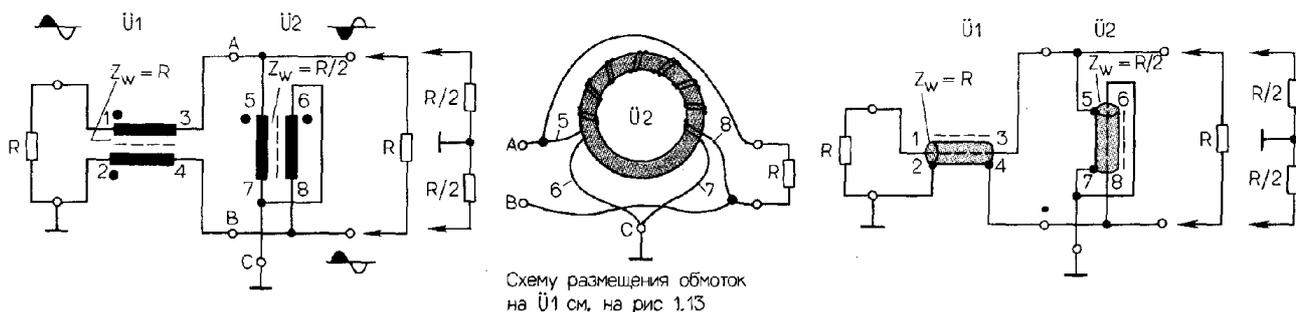


Рис. 1.15. Схемы двух симметрирующих трансформаторов на линии и расположение обмоток на тороидальном сердечнике при коэффициенте трансформации  $Z_u$  (1:1).

Электрическая схема и расположение витков на тороидальном сердечнике для двух трансформаторов с  $Z_u$  1:4 приведены на рис. 1.16. Поворот фазы невозможен.

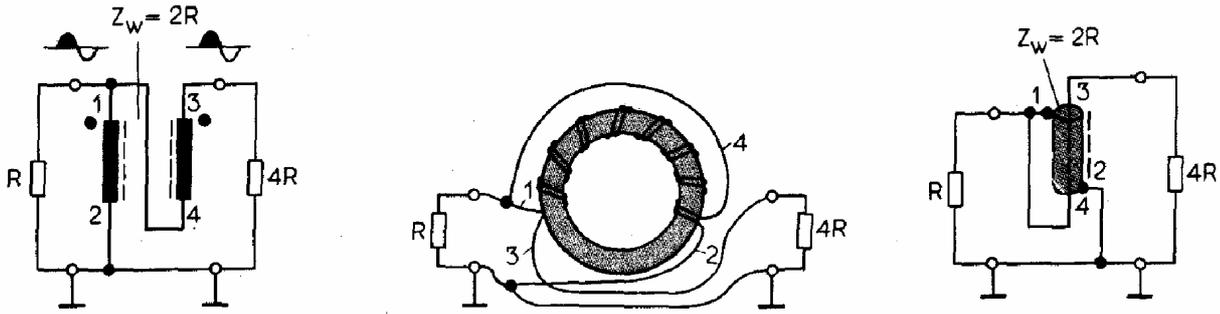


Рис. 1.16. Схемы двух симметрирующих трансформаторов на линии и расположение обмоток на тороидальном сердечнике при коэффициенте трансформации  $2z$  (1:4).

На рис. 1.17 представлены схемы и расположение обмоток для двух симметрирующих трансформаторов с  $Z_u$  1:|2:2|. Обе линии секции 1:4 должны содержать удвоенное количество витков по сравнению с обмотками секции 1:1. Если данная схема используется при симметричной нагрузке с обеих сторон, секция 1:1 может отсутствовать. Оптимальная конструкция трансформаторов реализуется при использовании тороидального сердечника.

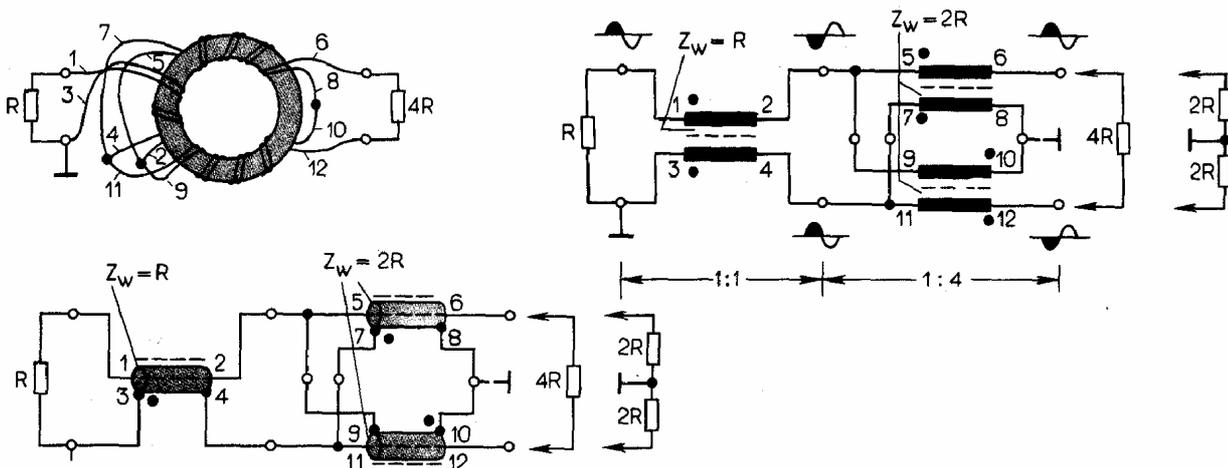


Рис. 1.17. Схемы двух симметрирующих трансформаторов на линии и расположение обмоток на тороидальном сердечнике при коэффициенте трансформации  $Z_{jj}$  (1:|2:2|).

Схемы и расположение обмоток на тороидальном сердечнике для двух симметрирующих трансформаторов с  $Z_u$  1:|1/8:1/8| представлены на рис. 1.18. Обе линии секции 4:1 должны содержать половинное число витков по сравнению с обмотками секции 1:1. И в данном случае при использовании устройства с симметричными нагрузками с обеих сторон секция 1:1 может отсутствовать. Оптимальная реализация предполагает, что в конструкции трансформатора используется тороидальный сердечник.

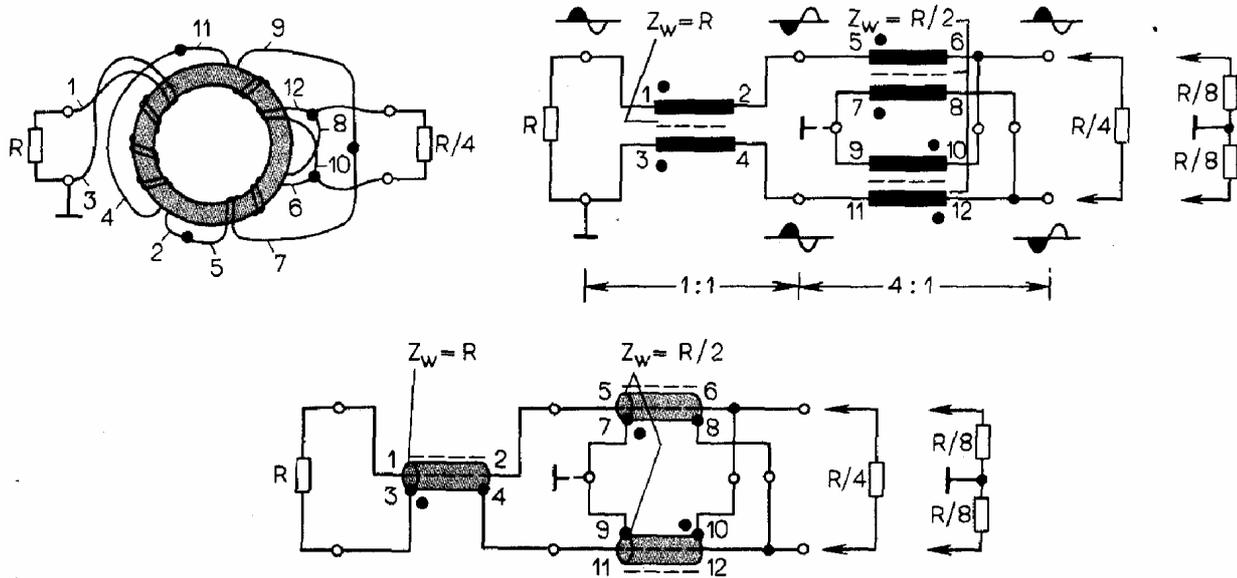


Рис. 1.18. Схемы двух симметрирующих трансформаторов на линии и рас- F положение обмоток на тороидальном сердечнике при коэффициенте трансформации  $Z_{jj}$  (1: |1/8:1/8|).

Схемы и расположение обмоток на тороидальном сердечнике для двух трансформаторов с  $Z_u$  1:9 показаны на рис. 1.19. Участок цепи, обозначенный цифрами 5-8, содержит обмотки с удвоенным числом витков по сравнению с обмотками 1-4. Синфазное включение нагрузок невозможно.

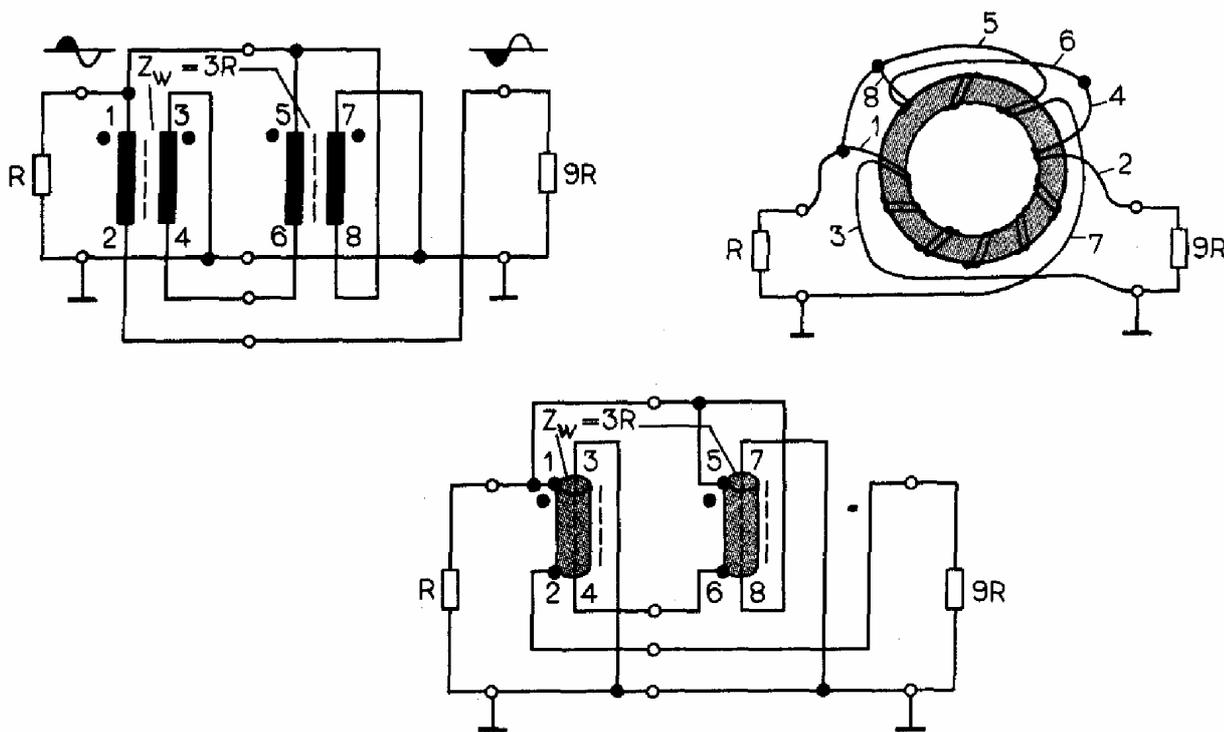


Рис. 1.19. Схемы двух симметрирующих трансформаторов на линии и расположение обмоток на тороидальном сердечнике при коэффициенте трансформации  $Z_u$  (1:9).

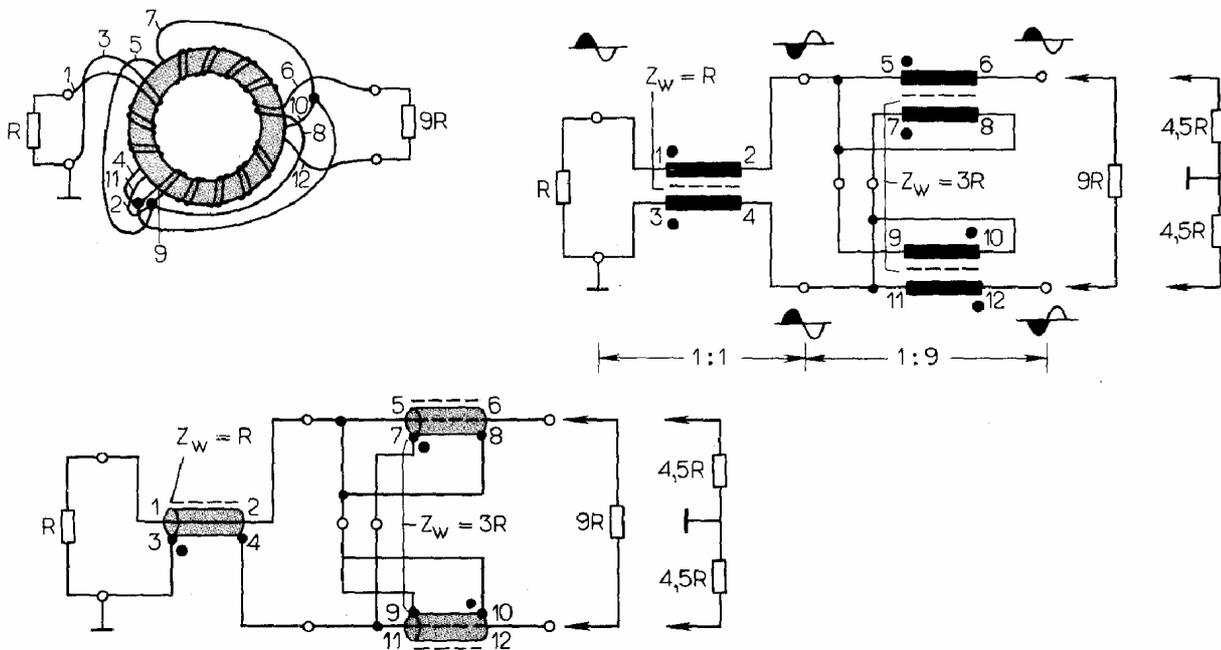


Рис. 1.20. Схемы двух симметрирующих трансформаторов на линии и расположение обмоток на тороидальном сердечнике при коэффициенте трансформации  $Z_u$  (1: |4,5:4,5|).

На рис. 1.20 приведены схемы и расположение обмоток на тороидальном сердечнике для двух симметрирующих трансформаторов с  $Z_u$  1: |4,5:4,5|. Обе обмотки секции 1:9 должны содержать примерно в полтора раза больше витков, чем обмотки секции 1:1. Оптимальная реализация предполагает, что в конструкции трансформатора используется тороидальный сердечник.

Схемы и расположение обмоток на тороидальном сердечнике для двух симметрирующих трансформаторов с  $Z_u$  1: |1/18:1/18| представлены на рис. 1.21. Обе обмотки секции 1:9 должны содержать примерно 0,67 витков от числа витков в обмотках секции 1:1. Для данного трансформатора при его симметричной нагрузке с обеих сторон секция 1:1 может отсутствовать. И в этом случае оптимальная реализация конструкции трансформатора предполагает, что используется тороидальный сердечник.

Схемы и расположение обмоток на тороидальном сердечнике для двух трансформаторов с  $Z_u$  1:16 показаны на рис. 1.22. Обмотки секции со стороны нагрузки  $16R$  должны содержать удвоенное число витков по сравнению с обмотками со стороны  $R$ . Поворот фазы невозможен.

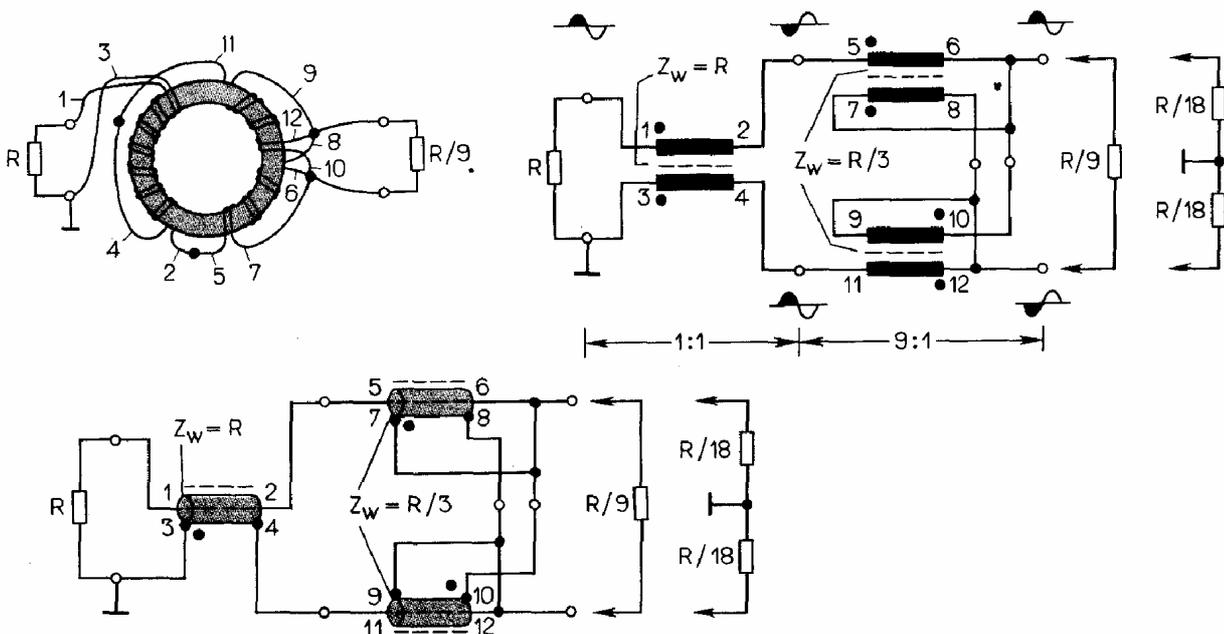


Рис. 1.21. Схемы двух симметрирующих трансформаторов на линии и расположение обмоток на тороидальном сердечнике при коэффициенте трансформации  $Z_u$  (1: |1/18:1/18|).

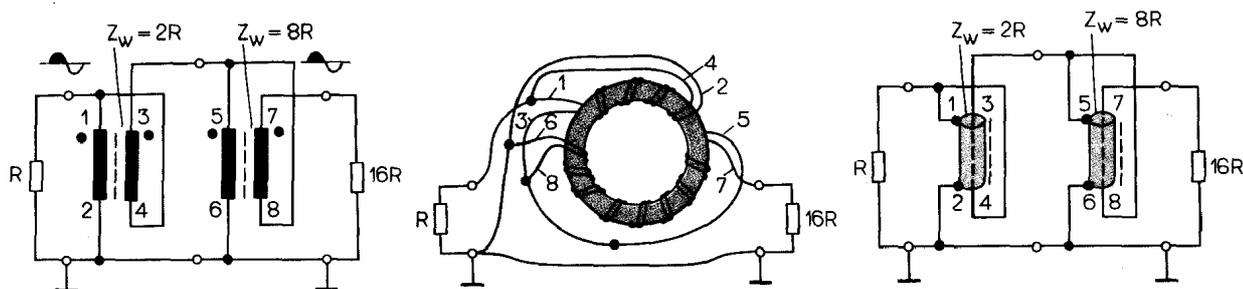


Рис. 1.22. Схемы двух симметрирующих трансформаторов на линии и расположение обмоток на тороидальном сердечнике при коэффициенте трансформации  $Z_u$  (1:16).

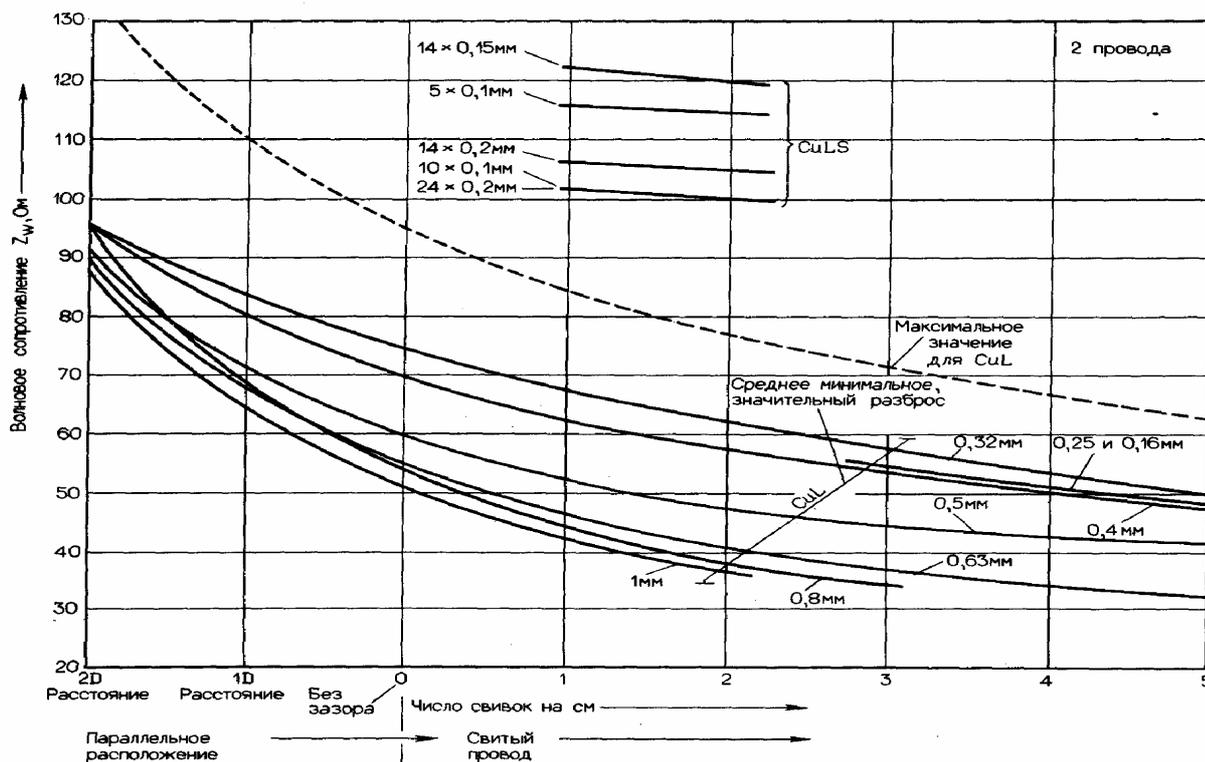


Рис. 1.23. Номограмма для определения волнового сопротивления  $Z_w$  двухпроводных линий.

На рис. 1.23 изображена номограмма для определения волнового сопротивления  $Z_w$  двухпроводной линии. С ее помощью можно приближенно определить величину  $Z_w$ , которая кроме всего прочего сильно зависит от характеристик изоляции проводов. Точное значение волнового сопротивления можно определить экспериментально путем измерений.

В соответствии с рис. 1.24 можно уменьшить эффективное волновое сопротивление  $Z_w$  линии путем параллельного соединения двух ее отрезков, что аналогично параллельному включению активных сопротивлений. Обе двухпроводные линии следует свить между собой. Перекрестное соединение двух коаксиальных линий, согласно приведенной схеме, приводит к аналогичным результатам. Допуск на величину эквивалентного волнового сопротивления  $Z_w$  параллельно включенных отрезков коаксиальных кабелей составляет заведомо меньше 10% и зависит в первую очередь от расстояния между экранами кабелей.

На рис. 1.25 иллюстрируется возможность увеличения эффективного волнового сопротивления  $Z_w$  отрезка линии путем последовательного включения двух коаксиальных кабелей, что аналогично последовательному соединению активных сопротивлений. В данном случае экраны коаксиальных кабелей не подключаются, т. е. они разомкнуты по ВЧ. Допуск на величину эквивалентного волнового сопротивления  $Z_w$  заведомо меньше 10% и зависит в первую очередь от расстояния между экранами кабелей. Включать таким образом витые двухпроводные линии не рекомендуется.

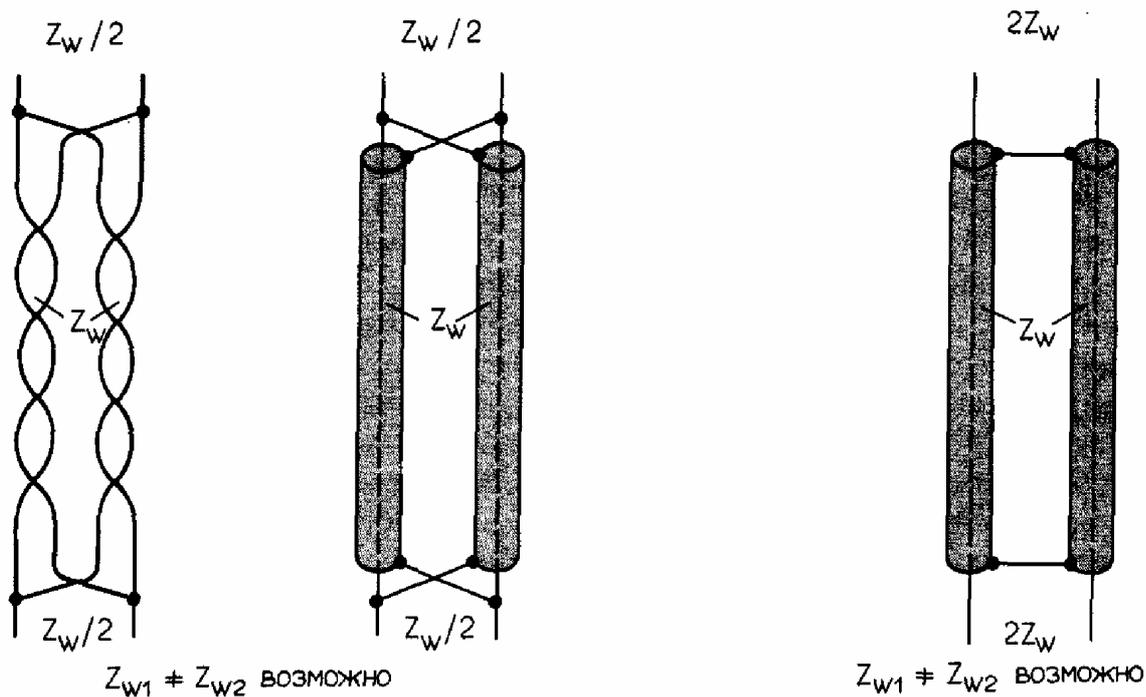


Рис. 1.24. Уменьшение эффективного волнового сопротивления  $Z_w$  двух линий путем их параллельного включения.

Рис. 1.25. Увеличение эффективного волнового сопротивления  $Z_w$  двух коаксиальных кабелей путем их последовательного включения.

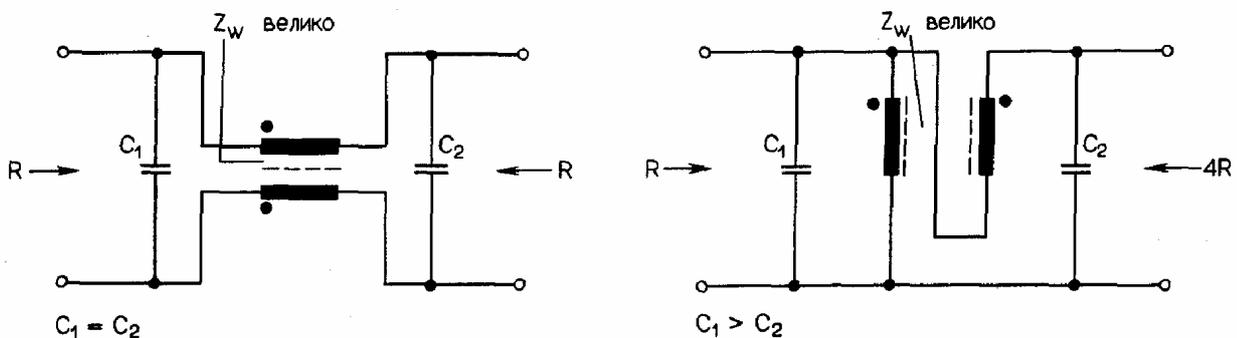


Рис. 1.26. Схема емкостной компенсации паразитных индуктивных компонент трансформаторов на линии в случае больших сопротивлений  $Z_w$ . Представленные способы имеют основополагающее значение.

На рис. 1.26 показана схема емкостной компенсации индуктивности рассеяния для трансформатора на линии путем подключения емкостей  $C_1$  и  $C_2$ . Их номиналы определяются, как правило, экспериментально, так как математическое решение чрезвычайно громоздко и поэтому обладает низкой точностью. Этот способ компенсации используется преимущественно при высоких значениях  $Z_w$ , встречающихся в первую очередь при сопротивлениях менее 50 Ом. Критерием служит получение возможно более широкой полосы рабочих частот. Для типичных случаев использования в широкополосных КВ-устройствах  $F_{max} < 30$  МГц требуются значения  $C$  от десятых долей пФ до 100 нФ; рекомендуется применять подстроечные конденсаторы с воздушным диэлектриком. Предложенный метод компенсации имеет основополагающее значение и может использоваться для всех описанных в данном разделе разновидностей трансформаторов на линии.