

## ШИРОКОПОЛОСНЫЕ ИНДУКТИВНЫЕ ДЕЛИТЕЛИ НАПРЯЖЕНИЯ

А. И. КРАМНЮК, М. С. РОЙТМАН

(Представлена научным семинаром кафедры радиотехники)

На основании работы [1] можно сформулировать требования, которые должны удовлетворяться при проектировании широкополосных индуктивных делителей (ИД).

Во-первых, необходимо обеспечить равенство эквивалентных емкостей, приведенных к отдельным обмоткам. Причем это условие желательно выполнить без применения дополнительных корректирующих емкостей.

Во-вторых, значения приведенных емкостей должны быть по возможности минимальными, чтобы не наблюдалось резкого снижения входного сопротивления декады на верхних частотах.

Одним из эффективных решений поставленной задачи является предложенная нами лестничная намотка делителей [2, 3].

Суть ее сводится к следующему.

Предположим, что на одном сердечнике намотано несколько секций, имеющих строго одинаковое количество витков. Причем каждая секция выполнена жгутом, состоящим из нескольких равномерно скрученных проводов, которые образуют отдельные обмотки, включенные согласованно и последовательно\*). Так как отдельные секции выполнены жгутами, то они представляют уже известные делители и рассмотрены в [1]. Для них можно записать значения емкостей у каждой отдельной обмотке в виде

$$C'_{\text{эkv}_1} = K_1 C_{2/2};$$

$$C'_{\text{эkv}_2} = K_2 C_{2/2};$$

$$C'_{\text{эkv}_3} = K_1 C_{2/2},$$

где  $C'_{\text{эkv}_1}$ ,  $C'_{\text{эkv}_2}$ ,  $C'_{\text{эkv}_3}$  — значения емкостей, приведенных к первой, второй и третьей обмотке каждой секции;  $C_{2/2}$  — значение распределенной емкости между двумя проводами;  $K_1$ ,  $K_2$  — коэффициенты пересчета [1]. Аналогичные соотношения можно записать и для других секций, расположенных на этом же сердечнике.

Далее, сдвинув выводы каждой последующей секции относительно предыдущей на одну обмотку и соединив все выводы, оказавшиеся на

\*) Для упрощения ограничимся жгутами, выполненными из трех проводов. Однако приведенные рассуждения справедливы для делителей, у которых жгуты выполнены в принципе из любого количества проводов.

одной линии (рис. 1), получим схему, для которой суммарные значения емкостей отдельных обмоток определяются соотношениями:

$$\begin{aligned}
 C_{\text{ЭКВ}_1} &= K_1 C_{2/2}; \\
 C_{\text{ЭКВ}_2} &= K_2 C_{2,2} + K_1 C_{2/2}; \\
 C_{\text{ЭКВ}_3} &= K_1 C_{2/2} + K_2 C_{2,2} + K_1 C_{2/2}; \\
 C_{\text{ЭКВ}_4} &= K_1 C_{2/2} + K_2 C_{2,2} + K_1 C_{2/2}; \\
 C_{\text{ЭКВ}_5} &= K_1 C_{2/2} + K_2 C_{2,2} + \dots \\
 C_{\text{ЭКВ}_6} &= K_1 C_{2/2} + \dots \\
 C_{\text{ЭКВ}_7} &= \dots
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Как видно из (1), суммарные значения емкостей у обмоток, начиная с третьей, равны между собой. Таким образом, выполнено необходимое условие обеспечения широкополосности ИД — достигнуто равенство эквивалентных емкостей, приведенных к отдельным обмоткам, причем без применения корректирующих емкостей. При таком построении делителей одновременно сохраняется высокая точность деления благодаря гальванической связи между отдельными обмотками.

Аналогичным образом можно выполнить делители, используя жгуты, состоящие из двух, четырех, пяти и т. д. проводов. Применение жгутов, состоящих более чем из двух проводов, позволяет в некоторой степени уменьшить погрешность ИД, но возникающие при этом технологические трудности, а также резкое увеличение входной емкости сводят на нет достигаемый эффект. Поэтому для практического применения наиболее приемлемыми оказываются делители, выполненные жгутом из двух проводов (рис. 2). Причем крайние выводы у них не исполь-

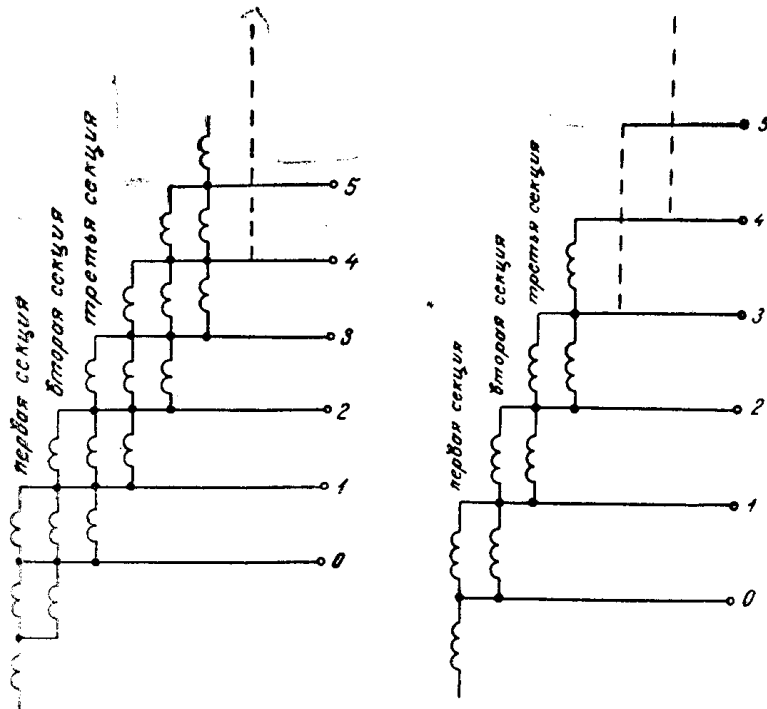


Рис. 1

Рис. 2

зуются, так как эквивалентные емкости, приведенные к крайним обмоткам, не равны емкостям, приведенным ко всем остальным обмоткам.

При использовании лестничного типа намотки довольно легко получить делители, имеющие любое необходимое количество градаций выходного напряжения путем увеличения или уменьшения числа секций.

Но даже при применении лестничного типа намотки в реальных делителях значения емкостей, шунтирующих отдельные обмотки, неточно равны между собой. Это вызвано наличием паразитных емкостей относительно экрана и магнитопровода, а также имеются паразитные емкости между отдельными обмотками, т. е. в какой-то мере присутствует эффект, характерный для известного способа намотки делителей. И для получения ИД с высокими метрологическими характеристиками приходится применять дополнительные корректирующие емкости. Ввиду значительной трудности определения различных паразитных емкостей ниже приводится расчетно-экспериментальный метод коррекции ИД.

Эквивалентные емкости, шунтирующие отдельные обмотки делителя, можно представить суммой двух емкостей  $C_0$  — постоянной для всех обмоток и равной минимальному значению емкости, имеющейся в данной системе, и  $C_1—C_{10}$  — учитывающие превышение емкости, шунтирующей данную обмотку, над  $C_0$ . Так как  $C_0$  подключена к каждой обмотке и на частотную погрешность не оказывает влияния, то ее можно не учитывать. Представляют интерес только значения  $C_1—C_{10}$  (рис. 3).

Путем сличения исследуемого делителя с образцовым можно экспериментально подобрать для каждого из отводов корректирующую емкость, полностью компенсирующую частотную погрешность. На рис. 3 показано подключение такой емкости для отвода 0,1— $C_{01}$  и 0,4 (пунктиром) —  $C_{04}$ . Если декада помещена в экран и нагружена на соответствующую нагрузку, то при подборе корректирующих емкостей указанные факторы учтутся автоматически.

Для обеспечения частотонезависимости напряжения на выводе 0,1 необходимо выполнение условия

$$\frac{\sum_{\kappa=2}^{10} C_{\kappa}}{9} = C_1 + C_{01}.$$

Для вывода 0,2

$$\frac{\sum_{\kappa=3}^{10} C_{\kappa}}{8} = \frac{\sum_{\kappa=1}^2 C_{\kappa}}{2} + 2C_{02}.$$

Для остальных выводов аналогично

$$\frac{\sum_{\kappa=4}^{10} C_{\kappa}}{7} = \frac{\sum_{\kappa=1}^3 C_{\kappa}}{3} + 3C_{03};$$

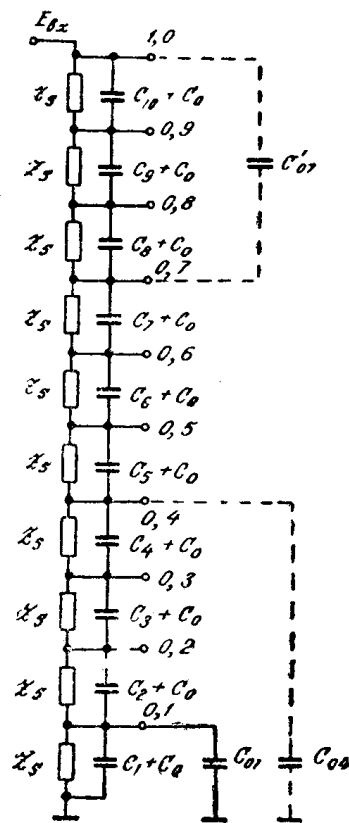


Рис. 3.

$$\begin{aligned}
\frac{\sum_{\kappa=5}^{10} C_{\kappa}}{6} &= \frac{\sum_{\kappa=1}^4 C_{\kappa}}{4} + 4C_{o_4}; \\
\frac{\sum_{\kappa=6}^{10} C_{\kappa}}{5} &= \frac{\sum_{\kappa=1}^5 C_{\kappa}}{5} + 5C_{o_5}; \\
\frac{\sum_{\kappa=7}^{10} C_{\kappa}}{4} &= \frac{\sum_{\kappa=1}^6 C_{\kappa}}{6} + 6C_{o_6}; \\
\frac{\sum_{\kappa=8}^{10} C_{\kappa}}{3} &= \frac{\sum_{\kappa=1}^7 C_{\kappa}}{7} + 7C_{o_7}; \\
\frac{\sum_{\kappa=9}^{10} C_{\kappa}}{2} &= \frac{\sum_{\kappa=1}^8 C_{\kappa}}{8} + 8C_{o_8}; \\
\frac{C_{10}}{1} &= \frac{\sum_{\kappa=1}^9 C_{\kappa}}{9} + 9C_{o_9}.
\end{aligned} \tag{2}$$

После преобразования система приводится к виду

$$\begin{aligned}
C_2 &= C_1 + 1,8 C_{c_1} - 3,2 C_{c_2}; \\
C_3 &= C_1 + 0,9 C_{o_1} + 3,2 C_{o_2} - 6,3 C_{o_3}; \\
C_4 &= C_1 + 0,9 C_{o_1} + 6,3 C_{o_3} - 9,6 C_{o_4}; \\
C_5 &= C_1 + 0,9 C_{c_1} + 9,6 C_{o_4} - 12,5 C_{o_5}; \\
C_6 &= C_1 + 0,9 C_{c_1} + 12,5 C_{c_5} - 14,4 C_{o_6}; \\
C_7 &= C_1 + 0,9 C_{c_1} + 14,4 C_{c_6} - 14,7 C_{o_7}; \\
C_8 &= C_1 + 0,9 C_{c_1} + 14,7 C_{o_7} - 12,8 C_{o_8}; \\
C_9 &= C_1 + 0,9 C_{c_1} + 12,8 C_{o_8} - 8,1 C_{c_9}; \\
C_{10} &= C_1 + 0,9 C_{o_1} + 8,1 C_{c_9}.
\end{aligned} \tag{3}$$

В процессе подбора корректирующих емкостей возможен вариант, когда указанную емкость необходимо подключить к потенциальному выводу  $C'_{o_7}$  (рис. 3). Нетрудно показать, что значение  $C_{o_7}$ , необходимое для (3), определится из выражения

$$C_{on_i} = -C'_{on_i} \frac{10 - n_i}{n_i},$$

и для приведенного примера

$$C_{c_7} = -C'_{o_7} \frac{3}{7}.$$

Так как в системе (3) число уравнений меньше числа неизвестных,  $C_1$  принимается такой величины, чтобы значения  $C_2 - C_{10}$  были положительны и имели минимальное значение. Величины корректирующих емкостей выбирают такими, чтобы она в сумме с соответствующей ем-

костью декады равнялась емкости, имеющей максимальную величину (из числа  $C_1 \div C_{10}$ ).

С помощью корректирующих элементов имеется возможность устранить влияние таких факторов, как наличие межобмоточной емкости ( $C_{2,2}$ ), емкости относительно магнитопровода ( $C_m$ ), ослабить влияние собственной емкости относительно экрана и входной емкости последующей декады. В то же время основную роль играет наличие  $C_{ni}$  (емкость нагрузки), для которой компенсация достигается только у декад, которые одним концом подключены к общему проводу. Для остальных декад применяемые схемы почти не оказывают влияния. Для обеспечения частотонезависимости ИД при любых значениях коэффициента деления потребовалось бы очень большое количество корректирующих элементов. Так, для пятидекадного делителя их число достигает  $10^5$ , что, естественно, практически неосуществимо. Нужны новые решения, позволяющие успешно справиться с поставленной задачей. Ниже рассматриваются ИД, предложенные авторами, в которых резко снижено влияние  $C_{ni}$  для всех декад и при любых коэффициентах деления [4].

На рис. 4 приведена схема одной декады, работающая на емкостную нагрузку  $C_{ni}$ . При этом влияние нагрузки было бы устранено, если выполнить условие, что ток в цепи  $a-a'$  равен 0.

Для этого необходимо потенциал точки  $a$  сделать равным потенциалу точки  $a'$ . Потенциалы указанных точек можно выравнивать, если

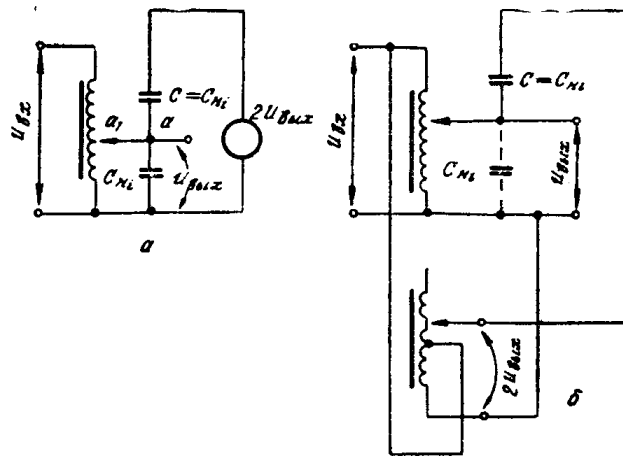


Рис. 4

точку  $a$  через емкость, равную по значению  $C_{ni}$ , подключить к источнику эдс, величина которой равна  $2U_{вых}$ , и находящемуся в фазе с выходным напряжением. Ток в цепи  $a-a'$  равен нулю и  $C_{ni}$  не будет нагружать декаду, т. е. происходит нейтрализация емкости нагрузки.

Источник с удвоенным значением выходного напряжения можно получить, используя дополнительный делитель (рис. 5), у которого входное напряжение подключено не ко всей обмотке, а только к ее половине\*). Если декады делителей будут переключаться синхронно, т. е. одним переключателем, выходное напряжение с дополнительного дели-

\*) Входное напряжение на дополнительный делитель можно подавать не на половину обмотки ( $n_{доп} = 5$ ), а на любой выход. При этом величина компенсирующей емкости  $C$  определится из выражения

$$C = \frac{n_{\text{доп}}}{10 - n_{\text{доп}}} \cdot C_{ni}$$

и для рассмотренного случая ( $n_{\text{доп}} = 5$ )  $C = C_{ni}$

теля всегда будет в два раза больше выходного напряжения основного делителя.

Для устранения паразитных емкостей у многодекадных делителей необходимо иметь дополнительный делитель с таким же количеством декад, как и у основного (рис. 5). При этом дополнительные емкости подключаются между «земляными» выводами соответствующих декад, кроме первых, и между выходными зажимами обоих делителей. Они выбираются следующим образом: емкость, включенная между выходными зажимами ( $C$ ), равна емкости нагрузки делителя; емкости, включенные между декадами ( $C_1, C_2, C_3 \dots$ ), по значению равны емкости соответствующих декад основного делителя относительно экрана.

Применение рассмотренных принципов построения ИД позволило создать делитель со следующими техническими характеристиками:

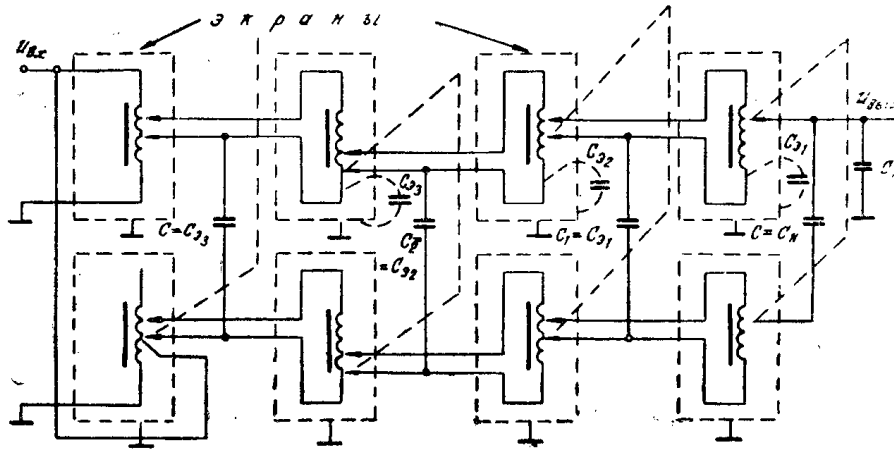


Рис. 5

1. Диапазон рабочих частот  $20 \text{ гц} \div 200 \text{ кгц}$ .
2. Коэффициент деления от 1 до  $10^5$ .
3. Количество декад прибора равно 5 с дискретностью в декадах  $10^{-1}, 10^{-2}, 10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5}$ .

4. Основная погрешность коэффициента деления на частоте  $1 \text{ кгц}$ , при активной нагрузке ( $R_n$ ) более  $1 \text{ мгом}$  и емкости нагрузки от 0 до  $50 \text{ пф}$  не должна превышать значения:  $10^{-5} \div 2 \cdot 10^{-6} K$ , где  $K = \frac{U_{в.х}}{U_{вых}}$  (коэффициент деления).

5. Основная погрешность коэффициента деления ( $\delta_2$ ) при  $R_n \geq 1 \text{ мгом}$  и  $C_n$  от 0 до  $50 \text{ пф}$  не превышает значений:

- а) в диапазоне частот  $1 \text{ кгц} \div 200 \text{ кгц}$   $\delta_2 = \delta_1 + \delta_f$ ,  
где  $\delta$  — значение основной погрешности на частоте  $1 \text{ кгц}$ ,  
 $\delta_f$  — определяется из выражения

$$\delta_f = 10^{-8} [(f-1) \kappa + 5(f-1)^2],$$

где  $f$  — частота [ $\text{кгц}$ ];

- б) в диапазоне частот  $20 \text{ гц} \div 1 \text{ кгц}$  определяется из выражения

$$\delta_3 = \delta_1 + 6 \cdot 10^{-4} (1 - f \text{ кгц})^2.$$

6. Основная погрешность коэффициента деления при емкости нагрузки от 0 до  $200 \text{ пф}$  соответствует пунктам 4,5 при условии подключения внешних корректирующих емкостей.

7. Максимально допустимое входное напряжение (эффективное значение) не менее  $\frac{f[гц]}{4}$ , но не более 100 в.

8. Максимальное значение фазового сдвига во всем диапазоне частот определяется из выражения (расчетное значение)

$$\Delta\varphi_{\max} = 0,1^\circ + 5^\circ \cdot 10^{-5} \cdot \kappa.$$

9. Коэффициент нелинейных искажений при максимально допустимом значении входного напряжения определяется из выражения

$$\kappa_f[\%] = 0,015 R_i[ом],$$

где  $R_i$  — значение выходного сопротивления источника сигнала.

10. Напряжение прямого прохождения во всем диапазоне частот не превышает значения

$$U_{\text{прох}}[\varepsilon] = 2 \cdot 10^{-6} \cdot U_{\text{вх}}[\varepsilon].$$

11. Модуль входного сопротивления в диапазоне частот 20 гц ÷ ÷ 100 кгц не менее 1 ком, в диапазоне 100 ÷ 200 кгц — не менее 500 ом.

12. Максимальное значение активного выходного сопротивления во всем диапазоне частот не превышает 5 ом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. И. Крамнюк, М. С. Ройтман. Расширение рабочего диапазона индуктивных делителей. Изд-во ТГУ, Томск, Изв. ТПИ, т. 231, 1971.

2. «Образцовые источники переменных напряжений». Отчет по НИР «Веретено», НИР «Витамин», депонированная рукопись. Гос. регистр. № 68021571, № 68021579.

3. А. И. Крамнюк. Широкополосный индуктивный делитель. Решение о выдаче авторского свидетельства по заявке № 1299427/26-9 от 22 января 1969.

4. А. И. Крамнюк. Широкополосный индуктивный делитель напряжения. Авт. свид., № 322723. Бюл. изобр., № 36, 1971.