

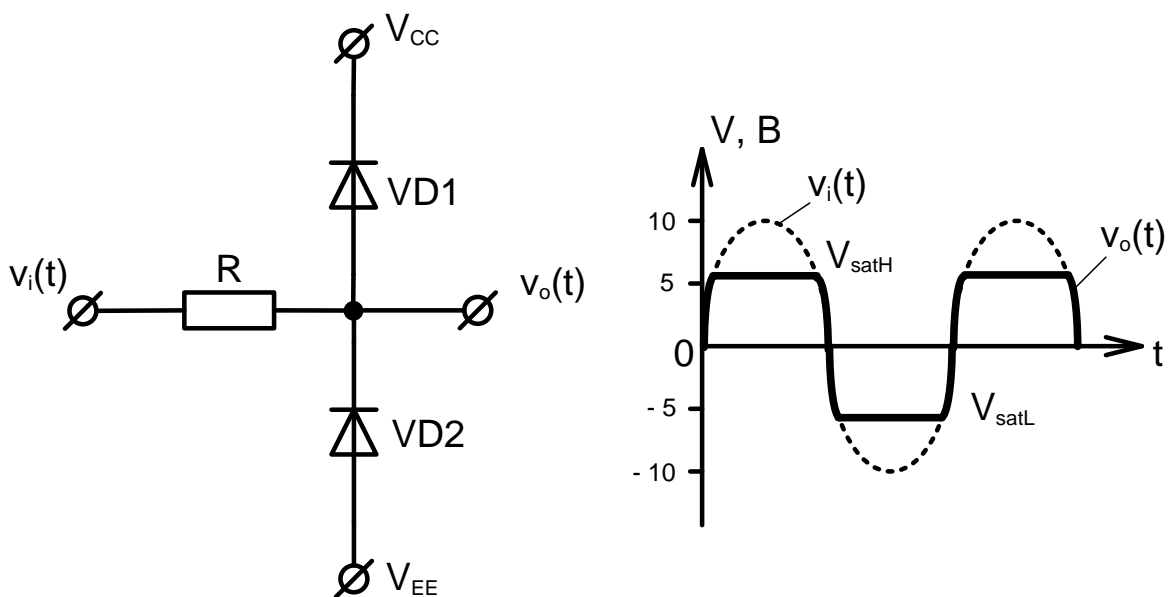
## Упражнение 1.22

Спроектируйте симметричный ограничитель, который будет ограничивать сигнал на уровнях  $-5,6\text{ В}$  и  $+5,6\text{ В}$ .

**В наличии:**  $V_{\text{satH}} = 5,6\text{ В}$ ;  $V_{\text{satL}} = -5,6\text{ В}$ ;  $V_D = 0,6\text{ В}$ .

Нарисовать схему.

Упражнение очень простое, поэтому, прочитав соответствующий раздел книги, можно не задумываясь его выполнить.



Суть диодных ограничителей состоит в том, чтобы соответствующий диод смещался в прямом направлении, на величину типового падения напряжения на диодах  $V_D$ , при уходе входного сигнала  $v_i(t)$  за заданные рамки. Таким образом, достигается ограничение входного сигнала в установленных пределах. Резистор  $R$  носит функцию токового ограничителя при открытии одного из диодов.

Теперь определим параметры симметричного источника питания, задающего нужные границы выходного сигнала  $v_o(t)$ . В этом нам поможет правило Кирхгофа для напряжений.

Когда диод  $VD1$  открыт, то имеют место следующие соотношения:

$$v_o(t) = V_{\text{satH}};$$

$$V_{CC} = V_{satH} - V_D. \quad (1)$$

Когда диод VD2 открыт, то имеют место следующие соотношения:

$$v_o(t) = V_{satL};$$

$$V_{EE} = V_{satL} + V_D. \quad (2)$$

Вычислим по формулам (1) и (2) параметры симметричного источника питания:

$$V_{CC} = 5,6 - 0,6 = 5 \text{ В};$$

$$V_{EE} = -5,6 + 0,6 = -5 \text{ В}.$$

### Упражнение 1.23

*Покажите, что предыдущее утверждение верно.*

В книге, тексту упражнения предшествует следующий абзац.

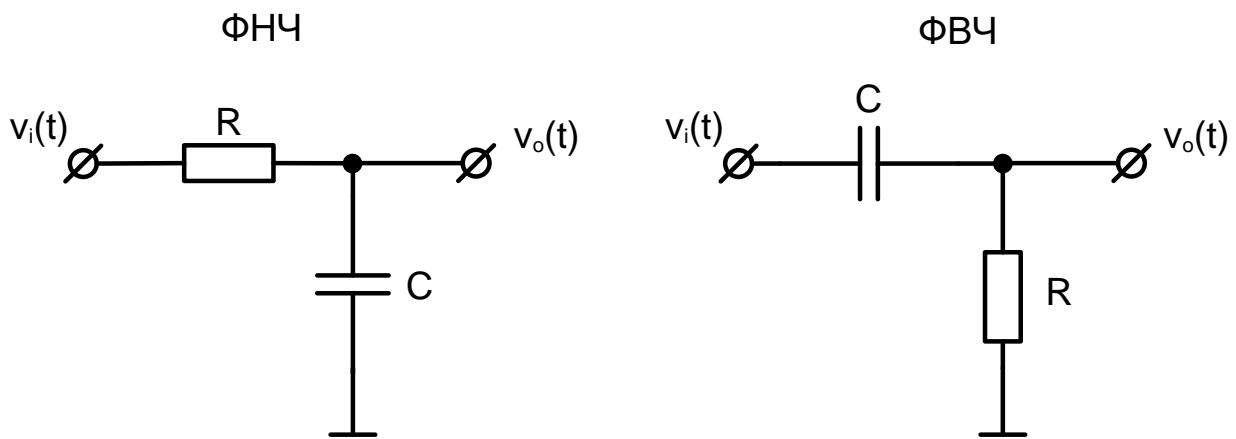
*«Все, что нас интересует при проектировании любого из двух простых RC-фильтров (фильтра низких частот или фильтра высоких частот) в составе более сложных устройств, это их входные и выходные импедансы. Задача кажется сложной, поскольку речь идет о четырех импедансах, изменяющихся в зависимости от частоты сигнала. Однако, если вы решите эту задачу верно, то ответ будет простым и одинаковым для всех четырех величин искомым импедансов!*

...

*Итак, ответ поразительно прост: в наихудшем случае все четыре импеданса будут равны R.»*

**В наличии:**  $R = \text{const.}$ ,  $C = \text{const.}$

$|Z_{iMIN}| - ?$ ;  $|Z_{oMAX}| - ?$

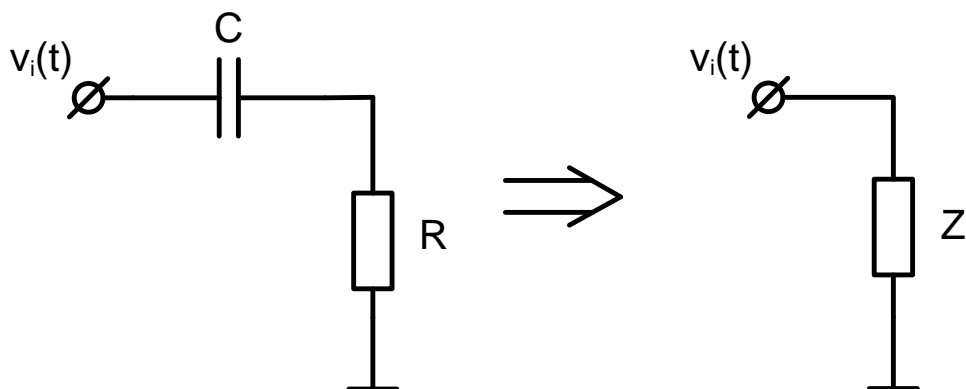


Из материалов книги нам известно, что величина реактанса конденсатора определяется по формуле:

$$|X_c| = \frac{1}{\omega \cdot C}, \quad (1)$$

где  $\omega$  – угловая частота сигнала, Гц.

Вспомним теорему Тевенина. По отношению к внешней цепи, фильтр низких частот (ФНЧ) и фильтр высоких частот (ФВЧ), являются нагрузкой, представленной последовательно соединенной RC-цепью (вне зависимости от порядка подключения элементов схемы).



Таким образом, для ФНЧ и ФВЧ, входной импеданс будет равен (без учета фазы сигнала):

$$|Z_i| = R + |X_c|. \quad (2)$$

В соответствии с выражением (1), с увеличением частоты реактанс конденсатора будет уменьшаться и в пределе, устремится к нулю. Следовательно, выражение (2) примет вид:

$$|Z_{i\text{MIN}}| = R.$$

Выходной импеданс для ФНЧ и ФВЧ без учета фазы сигнала будет определяться по формуле выходного сопротивления резистивного делителя:

$$|Z_o| = \frac{R \cdot |X_c|}{R + |X_c|}. \quad (3)$$

На низких частотах выполняется условие:

$$|X_c| \gg R. \quad (4)$$

С учетом (4), выражение (3) для выходного импеданса примет окончательный вид:

$$|Z_{o\text{MAX}}| = R.$$

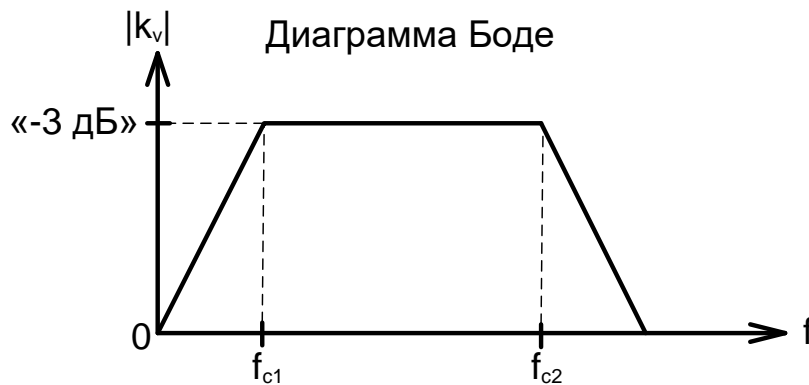
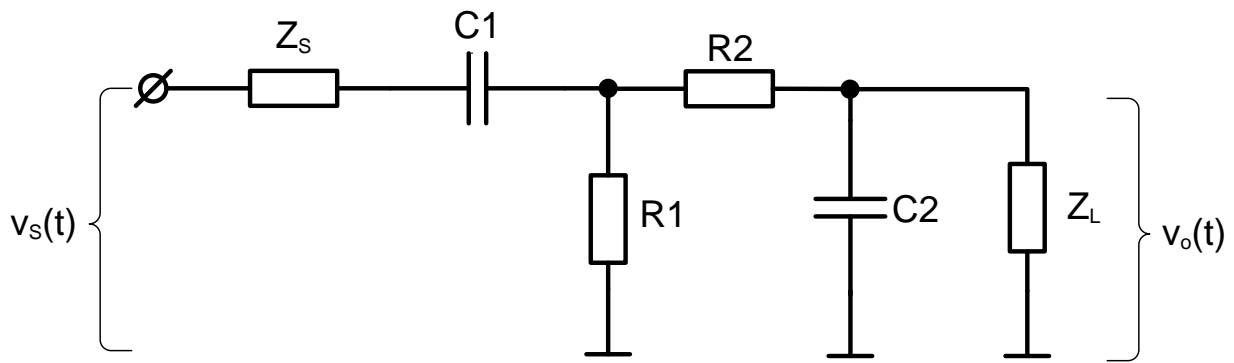
Таким образом, мы доказали справедливость предложенного утверждения и получили практически важный инструмент проектирования фильтров.

### Упражнение 1.24

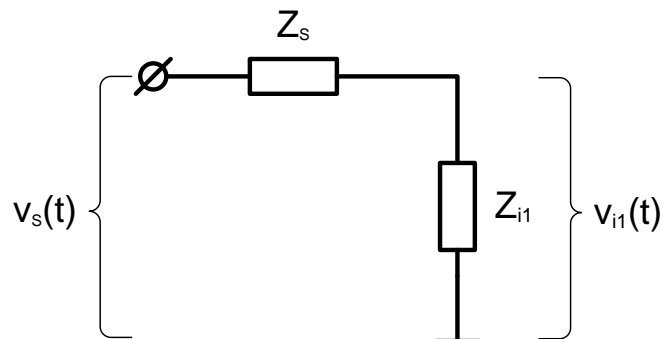
*Спроектируйте двухкаскадный полосовой RC-фильтр, в котором, в качестве первого каскада выступает фильтр высоких частот с частотой среза 100 Гц, а в качестве второго каскада – фильтр низких частот с частотой среза 10 кГц. Источник входного сигнала обладает выходным импедансом в 100 Ом. Чему равен выходной импеданс вашего фильтра в наихудшем случае, и каков при этом минимально рекомендуемый импеданс нагрузки?*

**В наличии:**  $f_{c1} = 100 \text{ Гц}$ ;  $f_{c2} = 10 \text{ кГц}$ ;  $|Z_S| = 100 \text{ Ом}$ .

$R_1 - ?$ ;  $C_1 - ?$ ;  $R_2 - ?$ ;  $C_2 - ?$ ;  $|Z_{o\text{MAX}}| - ?$ ;  $|Z_{L\text{MIN}}| - ?$



Представим, как первый каскад нагружает источник входного сигнала.



Чтобы первый каскад не оказывал сильного влияния на источник входного сигнала, необходимо, чтобы его входной импеданс  $Z_{i1}$  был как минимум на порядок больше выходного сопротивления источника сигнала  $Z_s$  (вспомним резистивный делитель):

$$|Z_{i1}| \geq 10|Z_s|. \quad (1)$$

Согласно результатам, полученным из предыдущего упражнения, минимальный входной импеданс первого каскада будет равен:

$$|Z_{i1MIN}| = R1. \quad (2)$$

С учетом (2), выражение (1) нам позволит определить величину резистора R1 и рассчитать ее:

$$R1 = 10|Z_s|, \quad (3)$$

$$R1 = 10 \cdot 100 = 1 \text{ кОм}. \quad (4)$$

Частота среза первого каскада  $f_{c1}$ , будет определяться по формуле (из пройденного материала книги):

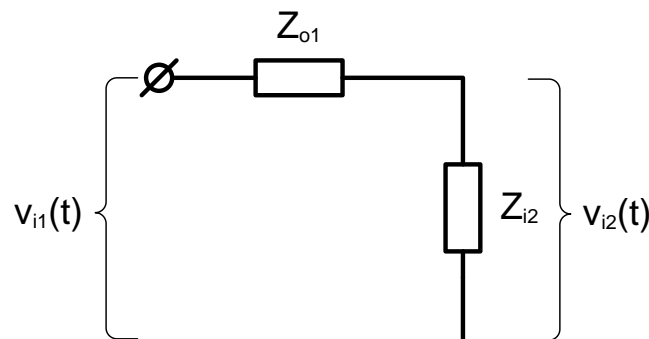
$$f_{c1} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R1 \cdot C1}. \quad (5)$$

Из выражения (5) выразим, а затем рассчитаем, с учетом результатов вычислений (4), величину емкости конденсатора C1:

$$C1 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R1 \cdot f_{c1}}, \quad (5)$$

$$C1 = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 1000 \cdot 100} \approx 1,6 \text{ мкФ}.$$

Теперь представим, как второй каскад нагружает первый каскад, в соответствии с теоремой Тевенина.



Из предыдущего упражнения нам теперь известно, что максимальный выходной импеданс первого каскада будет равен:

$$|Z_{o1MAX}| = R1. \quad (6)$$

Чтобы второй каскад не оказывал сильного влияния на первый каскад, необходимо, чтобы его входной импеданс  $Z_{i2}$  был как минимум на порядок больше максимального выходного сопротивления первого каскада  $Z_{o1MAX}$ :

$$|Z_{i2}| \geq 10|Z_{o1MAX}|. \quad (7)$$

По аналогии с первым каскадом, выражение (2), минимальный входной импеданс второго каскада будет равен:

$$|Z_{i2MIN}| = R2. \quad (8)$$

С учетом (4), (6) и (8), выражение (7) нам позволит определить величину резистора R2 и рассчитать ее:

$$R2 = 10 \cdot R1, \quad (9)$$

$$R2 = 10 \cdot 1 = 10 \text{ кОм}. \quad (10)$$

Частота среза первого каскада  $f_{c2}$ , будет равна:

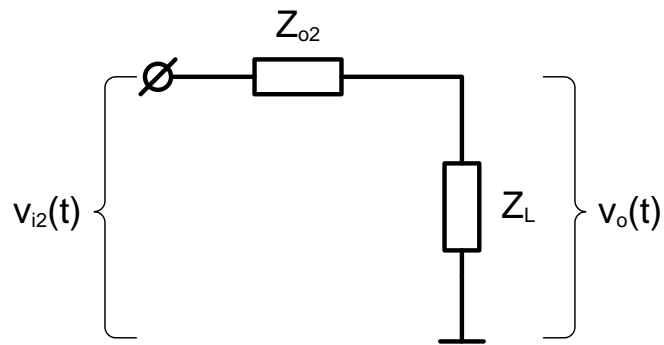
$$f_{c2} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R2 \cdot C2}. \quad (11)$$

Из выражения (11) выразим, а затем рассчитаем, с учетом результатов вычислений (10), величину емкости конденсатора C2:

$$C2 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R2 \cdot f_{c2}}, \quad (12)$$

$$C2 = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 1000 \cdot 10 \cdot 1000} \approx 1,6 \text{ нФ}.$$

Наконец, представим, как нагрузка  $Z_L$  подключена ко второму каскаду, в соответствии с теоремой Тевенина.



Аналогично первому каскаду (6), максимальный выходной импеданс второго каскада будет равен максимальному выходному импедансу всей схемы:

$$|Z_{o \text{ MAX}}| = |Z_{o2 \text{ MAX}}| = R2, \quad (13)$$

$$|Z_{o \text{ MAX}}| = 10 \text{ кОм}. \quad (10)$$

Чтобы нагрузка не оказывала сильного влияния на второй каскад, необходимо, чтобы ее импеданс  $Z_L$  был как минимум на порядок больше максимального выходного сопротивления всей схемы  $Z_{o \text{ MAX}}$ :

$$|Z_L| \geq 10 |Z_{o \text{ MAX}}|. \quad (14)$$

С учетом (10) и (14), минимальный импеданс нагрузки будет равен:

$$|Z_{L \text{ MIN}}| = 10 \cdot |Z_{o \text{ MAX}}|, \quad (15)$$

$$|Z_{L \text{ MIN}}| = 10 \cdot 10 = 100 \text{ кОм}.$$



## Упражнение 1.25

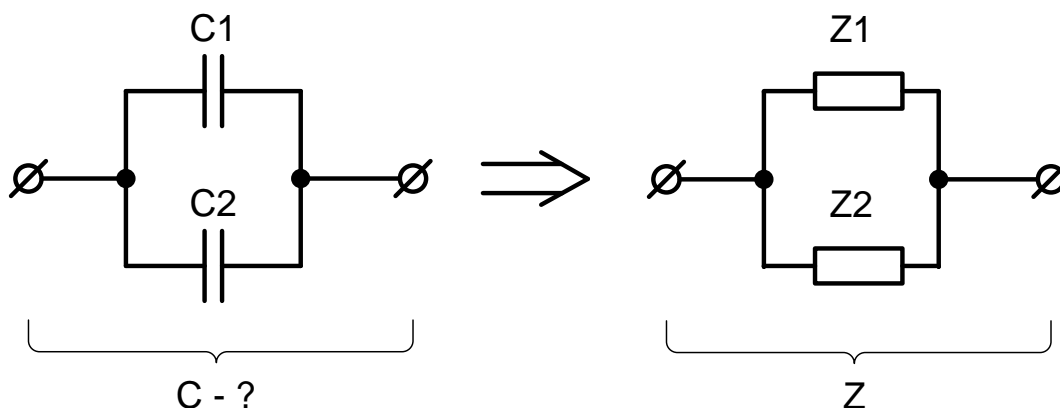
Воспользуйтесь приведенными выше выражениями для импеданса при параллельном и последовательном соединении компонентов схем, чтобы вывести формулы (1.17) и (1.18) для емкости двух конденсаторов а) при параллельном и б) последовательном соединении последних. Подсказка: один конденсатор имеет емкость  $C_1$ , другой –  $C_2$ . Запишите выражения для импеданса параллельного и последовательного соединений конденсаторов. Определите из полученных выражений общую емкость  $C$ .

В наличии:

$$C = C_1 + C_2, \quad (1.17)$$

$$C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}. \quad (1.18)$$

а) Параллельное соединение.



По аналогии с сопротивлением двух параллельно соединенных резисторов, импеданс схемы будет равен:

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}}. \quad (1)$$

В соответствии с материалами книги и нашей схемой, общий импеданс также равен:

$$Z = -\frac{j}{\omega \cdot C}, \quad (2)$$

где

$\omega$  – угловая частота, Гц;

$j = \sqrt{-1}$  – мнимая единица.

Выражение (2) можно видоизменить, умножив и числитель, и знаменатель на мнимую единицу:

$$Z = -\frac{j \cdot j}{j \cdot \omega \cdot C} = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C};$$
$$Z = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C}. \quad (3)$$

По аналогии с выражением (3), для импедансов  $Z1$  и  $Z2$  мы можем записать следующие выражения:

$$Z1 = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C1}; \quad (4)$$

$$Z2 = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C2}. \quad (5)$$

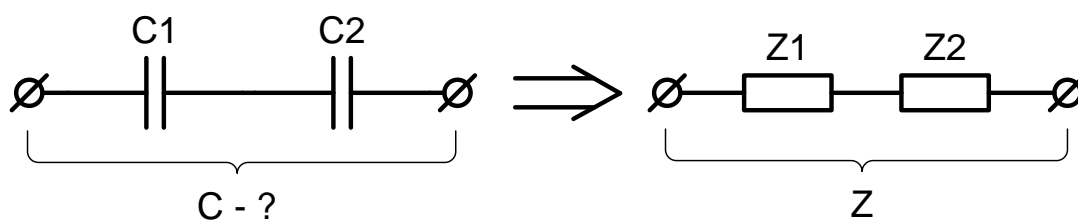
Подставив выражения (3), (4) и (5) в (1), мы сможем определить общую емкость  $C$ :

$$\frac{1}{j \cdot \omega \cdot C} = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C1 + j \cdot \omega \cdot C2};$$

$$\frac{1}{j \cdot \omega \cdot C} = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot (C1 + C2)};$$

$$C = C1 + C2.$$

б) Последовательное соединение.



По аналогии с сопротивлением двух последовательно соединенных резисторов, импеданс схемы будет равен:

$$Z = Z1 + Z2. \quad (6)$$

Подставив выражения (3), (4) и (5) в (6), мы сможем определить общую емкость C:

$$\frac{1}{j \cdot \omega \cdot C} = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C1} + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C2};$$

$$\frac{1}{j \cdot \omega \cdot C} = \frac{1}{j \cdot \omega} \cdot \left( \frac{1}{C1} + \frac{1}{C2} \right);$$

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C1} + \frac{1}{C2};$$

$$C = \frac{C1 \cdot C2}{C1 + C2}.$$