

налов:

$$K_{\Phi} = U_{\text{эфф}}/U_{\text{ср}}; \quad K_a = U_{\text{max}}/U_{\text{эфф}}, \quad K_{\text{ср}} = U_{\text{max}}/U_{\text{ср}}$$

Коэффициенты формы, амплитуды и усреднения, связанные зависимостью $K_{\text{ср}} = K_a K_{\Phi}$, лишь в первом приближении характеризуют форму кривой сигнала. Для любой периодической функции времени имеет место неравенство $1 \leq K_{\Phi} \leq K_a \leq K_{\text{ср}}$. Для сигнала вида «квадратная волна» (мсадр) коэффициенты $K_{\Phi} = K_a = K_{\text{ср}} = 1$. Для синусоидальных сигналов $K_{\Phi} = \pi/2 \sqrt{2}$, $K_a = \sqrt{2}$, $K_{\text{ср}} = \pi/2$. Отличие кривой сигнала от синусоидальной формы оценивается по коэффициенту гармоник K_{Γ} (клир-фактор) либо по коэффициенту нелинейных искажений $K_{\text{Н}}$:

$$K_{\Gamma} = \frac{1}{U_1} \sqrt{\sum_{k=2}^N U_k^2}; \quad K_{\text{Н}} = \frac{1}{U_{\text{эфф}}} \sqrt{\sum_{k=2}^N U_k^2}$$

где U_k — эффективное значение k -й гармоники сигнала.

Коэффициенты K_{Γ} и $K_{\text{Н}}$ связаны соотношением

$$K_{\text{Н}} = \frac{K_{\Gamma}}{\sqrt{1 + K_{\Gamma}^2}} \approx K_{\Gamma} \left(1 - \frac{1}{2} K_{\Gamma}^2 \right)$$

Эффективное значение $u(t)$ можно выразить через эффективное значение 1-й гармоники сигнала и через K_{Γ} :

$$U_{\text{эфф}} = U_1 \sqrt{1 + K_{\Gamma}^2} \approx U_1 \left(1 + \frac{1}{2} K_{\Gamma}^2 \right)$$

2. АКТИВНЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

Выпрямители представляют собой устройства, формирующие модуль входного сигнала, т. е.

$$U_{\text{вых}} = K |u(t)|$$

В пассивных выпрямителях, где используются диоды, напряжение открывания p - n -перехода (около 0,7 В) при низких уровнях сигналов вносит недопустимо большую погрешность. В активных выпрямителях диод используется как нелинейный элемент

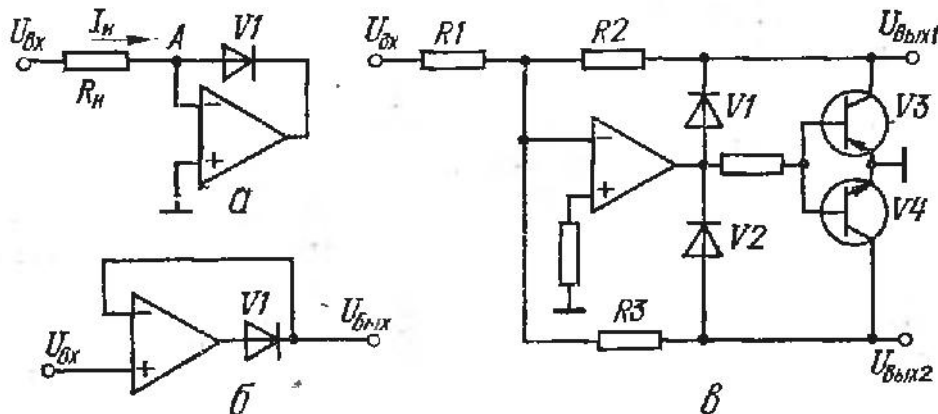


Рис. 10.1. Схемы однополупериодных выпрямителей

в цепи ООС усилителя, что позволяет снизить пороговое значение открывания p - n -перехода в $K_{\text{У}}\beta$ раз. Кроме того, влияние нелинейности, нестабильности и разброса сопротивления диода также уменьшается в $K_{\text{У}}\beta$ раз, где $K_{\text{У}}\beta$ — петлевое усиление.

Схемы однополупериодных выпрямителей (рис. 10.1, а, б) представляют собой «идеальные диоды», используемые для выпрямления тока и напряжения. Выпрямитель, выполненный по схеме рис. 10.1, а, включается последовательно с нагрузкой $R_{\text{н}}$. При прямом направлении тока $I_{\text{н}}$ диод V1 открыт выходным напряжением ОУ отрицательной полярности, при этом потенциал точки А равен нулю (для идеального ОУ), что эквивалентно подсоединению $R_{\text{н}}$ к общей шине. При другом направлении тока $I_{\text{н}}$ диод V1 заперт выходным напряжением ОУ положительной полярности, при этом последовательно с $R_{\text{н}}$

будет включено обратное сопротивление закрытого диода $V1$, что эквивалентно отключению нагрузки от общей шины. Для смещения характеристики выпрямителя в ту или другую сторону на неинвертирующий вход ОУ можно подать управляющее напряжение соответствующей полярности.

В выпрямителе, выполненном по схеме рис. 10.1, б, при положительной полярности входного сигнала диод $V1$ открыт, вследствие чего ОУ будет охвачен ООС, а схема выпрямителя может рассматриваться как повторитель напряжения. При отрицательной

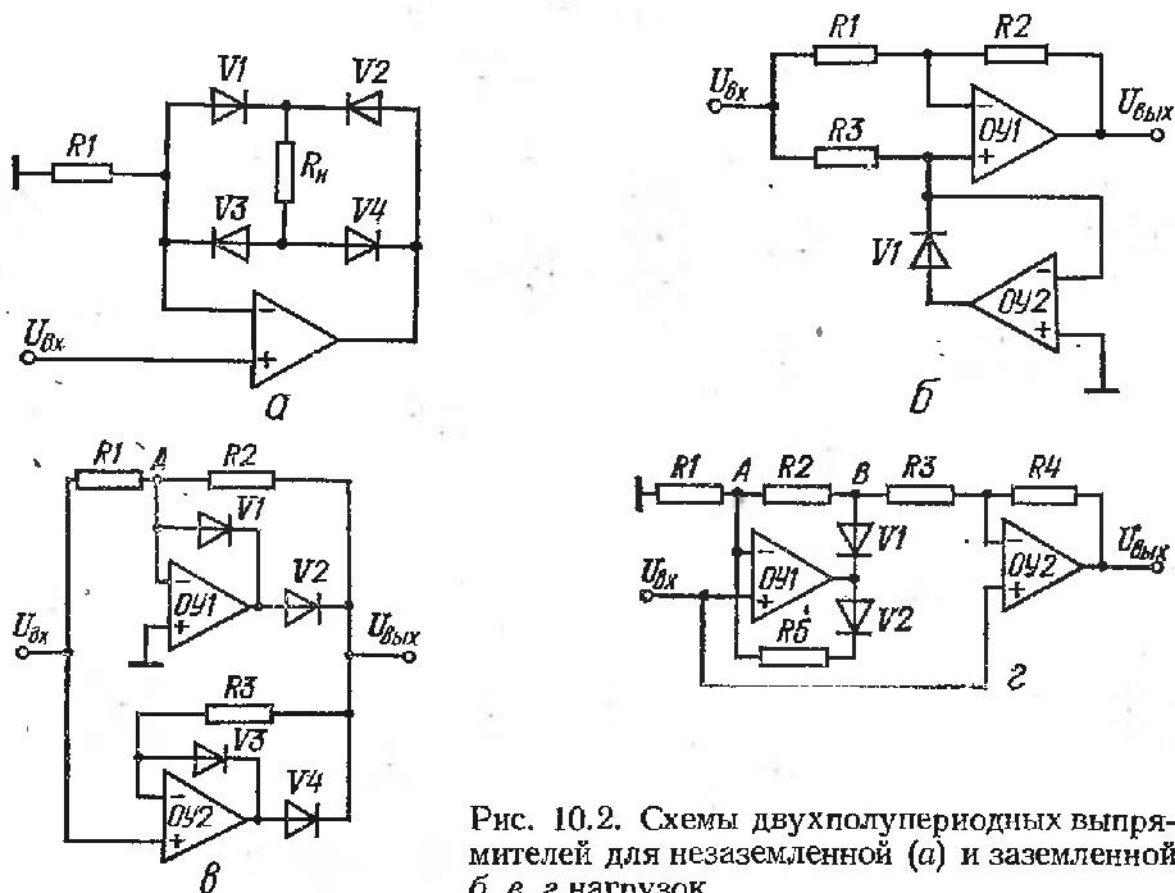


Рис. 10.2. Схемы двухполупериодных выпрямителей для незаземленной (а) и заземленной б, в, г нагрузок

полярности входного сигнала диод $V1$ заперт выходным напряжением ОУ отрицательной полярности, в результате чего напряжение на нагрузке R_H будет определяться обратным током диода $V1$. Максимально допустимая амплитуда входного сигнала в выпрямителе рис. 10.1, б ограничивается допустимым сдвигным напряжением ОУ. Очевидно, что изменив полярность включения диода $V1$ в схемах рис. 10.1, а, б, изменится и выпрямляемая фаза сигнала.

Для выпрямления сигналов с одновременным их масштабированием наиболее широко используется схема однополупериодного выпрямителя, показанная на рис. 10.1, в, в которой имеются отдельные цепи ООС для положительной и отрицательной полуволн сигнала. Положительная полуволна входного напряжения замыкается через диод $V2$ и резистор $R3$, отрицательная — через $V1$ и $R2$. Коэффициенты передачи по выходам 1 и 2 соответственно равны $K_1 = -R_2/R_1$, $K_2 = -R_3/R_1$. В режиме отсечки остаточное выходное напряжение определяется током утечки через запертый диод. Для выравнивания входных токов ОУ при положительной и отрицательной полуволнах сигнала сопротивления резисторов $R2$ и $R3$ выбираются равными. Выходное сопротивление (по каждому из выходов) данного выпрямителя не постоянно и скачкообразно изменяется от нуля (при пропуске сигнала) до R_2 на выходе 1 и до R_3 на выходе 2. Непостоянство выходного сопротивления выпрямителя затрудняет построение прецизионных двухполупериодных устройств на основе данной схемы. Поэтому на выходе выпрямителя целесообразно включить два ключа $V3, V4$, управление которыми осуществляется выходным напряжением ОУ, изменяющимся скачкообразно на $2\varphi_K$ при переходе через нулевой уровень. Ключ $V3$ закорачивает выход 1 на общую шину при запертом диode $V1$. Соответственно ключ $V4$ закорачивает выход 2 на общую шину при запертом диode $V2$. В результате выходное сопротивление по обоим выходам выпрямителя будет определяться либо сопротивлением открытого ключа, либо выходным сопротивлением повторителя напряжения, построенного на ОУ.

Схема двухполупериодного выпрямителя, построенного на одном ОУ для незаземленной нагрузки, показана на рис. 10.2, а. Нагрузка R_H включена в одну из диаго-

налей диодного моста $V1-V4$. Для положительной полярности входного напряжения открыты диоды $V2, V3$, диоды $V1, V4$ заперты. Схема в этом случае может рассматриваться как неинвертирующий усилитель, коэффициент передачи которого по отношению к R_H равен R_H/R_1 . Для отрицательной полярности диоды $V1, V4$ открыты, диоды $V2, V3$ заперты. Схема также может рассматриваться как неинвертирующий усилитель с коэффициентом передачи R_H/R_1 (направление тока в R_H не изменяется).

На рис. 10.2, б показана схема двухполупериодного выпрямителя [8] для заземленной нагрузки с минимальным числом элементов. Выпрямитель работает в соответствии со следующим алгоритмом:

$$U_{\text{вых}}(t) = \begin{cases} Ku_{\text{вх}}(t) & \text{при } u_{\text{вх}}(t) > 0; \\ -Ku_{\text{вх}}(t) & \text{при } u_{\text{вх}}(t) < 0, \end{cases}$$

т. е. в зависимости от полярности входного сигнала изменяется знак коэффициента передачи усилителя. Изменение знака осуществляется с помощью выпрямителя тока, построенного на ОУ2. При отрицательной полуволне неинвертирующий вход ОУ1 закорочен на общую шину через весьма низкое выходное сопротивление ОУ2, работающего в этом случае в режиме повторителя напряжения. Коэффициент передачи для отрицательной полуволны $K^- = -R_2/R_1$. Для положительной полуволны диод $V1$ будет заперт выходным напряжением ОУ2, а коэффициент передачи выпрямителя будет равен единице, т. е.

$$K^+ = -R_2/R_1 + 1 + R_2/R_1 = 1.$$

Таким образом, если выбрать $R_1 = R_2$, то коэффициент передачи будет равен единице для положительной и минус единице для отрицательной полуволн. Входное сопротивление данного выпрямителя непостоянно в связи с коммутацией резистора R_3 .

На рис. 10.2, в показана схема двухполупериодного выпрямителя, построенного на основе двух однополупериодных выпрямителей, включенных параллельно на одну общую нагрузку. Входное сопротивление данного выпрямителя постоянно и равно R_1 . Выходное сопротивление определяется выходным сопротивлением повторителя напряжения, построенного на ОУ2 (для положительной полуволны), и выходным сопротивлением инвертирующего усилителя, построенного на ОУ1 (для отрицательной полуволны). При положительной полуволне входного напряжения диоды $V1, V4$ открыты, диоды $V2, V3$ заперты. В этом случае напряжение на выходе определяется ОУ2 (потенциал точки А близок к нулю). Для отрицательной полуволны диоды $V2, V3$ открыты, диоды $V1, V4$ заперты. В этом случае напряжение на выходе будет определяться инвертирующим усилителем на ОУ1, коэффициент передачи которого $K = -R_2/R_1 = -1$. Максимальное входное напряжение для данной схемы ограничено допустимым синфазным напряжением ОУ2.

Для выпрямления сигналов, поступающих от маломощных источников, используются выпрямители с большим входным сопротивлением. Схема такого выпрямителя (рис. 10.2, г) включает в себя однополупериодный выпрямитель, построенный на ОУ1, и дифференциальный усилитель на ОУ2. При положительной полуволне входного сигнала диод $V1$ заперт, диод $V2$ открыт, напряжение в точке А равно напряжению на входе. Выходное напряжение можно записать в виде

$$U_{\text{вых}}^+ = -\frac{R_4}{R_2 + R_3} U_{\text{вх}}^+ + U_{\text{вх}}^+ \left(1 + \frac{R_4}{R_2 + R_3} \right) = U_{\text{вх}}^+.$$

При отрицательной полуволне диод $V1$ открыт, диод $V2$ заперт, напряжение в точке В $U_B^- = U_{\text{вх}}^- (1 + R_2/R_1)$. Выходное напряжение можно записать в виде

$$U_{\text{вых}}^- = -\frac{R_4}{R_3} (1 + R_2/R_1) U_{\text{вх}}^- + U_{\text{вх}}^- \left(1 + \frac{R_4}{R_3} \right) = -\frac{R_2 R_4}{R_1 R_3} U_{\text{вх}}^-.$$

Для обеспечения равенства коэффициентов передачи при положительной и отрицательной полярностях входного напряжения необходимо выполнить условие

$$R_2 R_4 / R_1 R_3 = 1.$$

В данном выпрямителе максимальное входное напряжение ограничено допустимым значением синфазного напряжения ОУ1, ОУ2. Выходное сопротивление выпрямителя определяется выходным сопротивлением ОУ2, охваченного ООС. Так как выходное сопротивление однополупериодного выпрямителя (точка В) принимает значения 0 или R_2 в зависимости от полярности входного сигнала, то возникает модуляция входного тока

ОУ2. Поэтому при построении прецизионного выпрямителя необходимо выбрать ОУ2 с минимальным входным током.

Для получения средневыпрямленного значения напряжения на выходе выпрямителей, схемы которых рассмотрены выше, необходимо включить фильтр нижних частот [9]. Качество фильтрации тем выше, чем больше коэффициент сглаживания и меньше длительность переходного процесса. Быстродействие ФНЧ определяется их постоянной времени, при этом быстродействие и коэффициент сглаживания находятся в обратной пропорциональной зависимости. Быстродействие ФНЧ можно повысить, построив двухканальную схему, где первый канал имеет большой коэффициент сглаживания, а второй — высокое быстродействие. В некоторых случаях быстродействие ФНЧ можно повысить, используя нелинейные свойства ОУ. В схеме, показанной на рис. 10.3 [7], заряд конден-

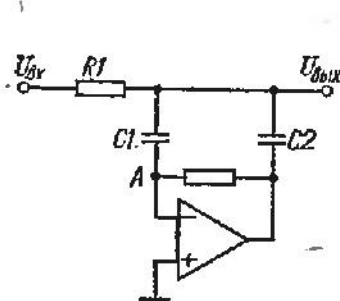


Рис. 10.3. Схема сглаживающего фильтра повышенного быстродействия с большим входным сопротивлением

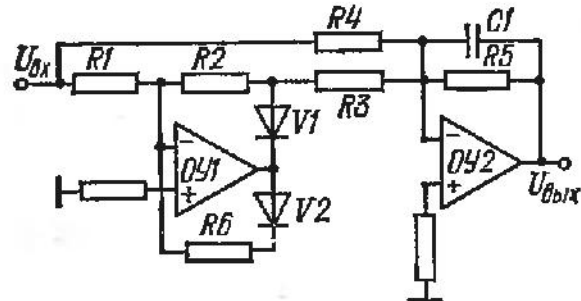


Рис. 10.4. Схема двухполупериодного выпрямителя с выходным сглаживающим фильтром

сатора $C2$ ускоряется за счет нелинейных свойств ОУ. При подаче напряжения на вход фильтра сигнал обратной связи поступает в точку A с некоторой задержкой, определяемой инерционностью цепи ООС. На время задержки ОУ находится в насыщении, что эквивалентно его отключению, при этом конденсатор $C2$ заряжается с постоянной времени $\tau_1 = R_1 C_1$. Затем ОУ выходит из насыщения, и в установившемся состоянии постоянная времени фильтра $\tau_2 = (1 + K_y) R_1 C_2$, что в $(1 + K_y)$ раз больше по сравнению с пассивным фильтром, имеющим тот же коэффициент сглаживания. Практически увеличение качества фильтрации несколько меньше в связи с неидеальностью характеристики ограничения ОУ и дифференцированием сигнала, поступающего на вход ОУ.

В некоторых случаях целесообразно совместить ФНЧ с выходным каскадом выпрямителя. На рис. 10.4 показана схема выпрямителя с сглаживающим фильтром. Отличительной особенностью данной схемы является работа ОУ без синфазных сигналов, что позволяет строить выпрямители для входных сигналов любой амплитуды. Рассмотрим работу схемы с отключенным конденсатором $C1$. Выходное напряжение в этом случае для положительной и отрицательной полярностей входного сигнала можно записать в виде

$$U_{\text{вых}}^+ = -U_{\text{вх}}^+ R_5 / R_4; \quad U_{\text{вых}}^- = -U_{\text{вх}}^- \left(\frac{R_5}{R_4} - \frac{R_2 R_6}{R_1 R_3} \right).$$

При условии $2R_3 = R_2 R_4 / R_1$ модули коэффициентов передачи для положительной и отрицательной полярностей входного напряжения будут равны. При этом, если $R_1 = R_2$, $R_4 = 2R_3$, то

$$|U_{\text{вых}}| = u_{\text{вх}} R_5 / R_4.$$

При подключении конденсатора $C1$ выходной каскад, построенный на ОУ2, превращается в ФНЧ первого порядка.

3. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ МГНОВЕННОГО И АМПЛИТУДНОГО ЗНАЧЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ

Устройства выборки — хранения (УВХ), представляющие собой преобразователи мгновенного значения напряжения с запоминанием этого значения на определенное время, работают в двух режимах: отслеживания входного сигнала и хранения мгновенного значения входного сигнала. Переход с режима на режим определяется управляющим сигналом.