10.5. Генераторы сигналов. Условия генерации

Генератором электрических колебаний называют устройство, преобразующее энергию источника питания постоянного напряжения в энергию переменных колебаний требуемой формы.

В зависимости от формы выходного напряжения различают: *генераторы гармонических* (*синусоидальных*) *колебаний* и *генераторы негармонических колебаний* (*импульсные генераторы*).

Любой генератор, независимо от формы выходных колебаний, может работать в одном из двух режимов: *режим автоколебаний* и *режим внешнего запуска* (*ждущий*).

Генератор, работающий в режиме автоколебаний, обычно называют *автогенератором*. Выходное переменное напряжение на его выходе формируется сразу после подключения напряжения питания и не требует для начала работы подачи внешнего управляющего воздействия.

Генераторы, работающие в режиме запуска внешними импульсами, после подключения источника питания могут сколь угодно долго находиться в устойчивом состоянии, не формируя выходное переменное напряжение. При подаче управляющего сигнала на вход такого генератора, на его выходе формируется выходной сигнал, параметры которого полностью определяются собственными характеристиками устройства. Такой режим работы также называют *ждущим*.

Автогенераторный режим работы применяется в устройствах, используемых в основном в качестве задающих генераторов, а *ждущий* – в устройствах, преобразующих форму импульсов к требуемому виду, например, в СИФУ управляемых выпрямителей.

Генератор можно построить на базе биполярных и полевых транзисторов, операционных усилителей, таймеров, выполненных в виде интегральных микросхем, потенциальных логических элементов или специализированных интегральных микросхем. Последний вариант на сегодняшний день наиболее распространён.

Условия возникновения колебаний. Положительная обратная связь (ОС) является главной особенностью всех генераторов, построенных на операционных усилителях. Обратная связь – участок цепи генератора, передающий часть выходного сигнала на его вход. Обратимся к структурной схеме генератора с положительной обратной связью (рис. 10.64).

Обратная связь в усилителе генератора должна быть положительной, тогда часть выходного сигнала с усилителя поступает снова на вход, чтобы быть в фазе с входным, и за счёт их сложения, амплитуда входного сигнала увеличивается. Например, усилитель по схеме с общим эмиттером создаёт фазовый сдвиг на 180° между его входом и выходом, тогда петля положительной обратной связи должна обеспечивать фазовый сдвиг выходного сигнала, поступающего обратно на вход, ещё на 180° для того, чтобы схема положительной обратной связи работала.

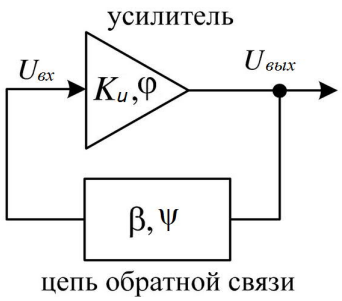

Рис. 10.64. Структурная схема генератора с положительной ОС

Результатом введения положительной ОС является возрастающее усиление, дающееся ценой возрастающих шумов и искажений. Если величина положительной обратной связи достаточно большая, в результате получаются колебания, где усилитель выдаёт свой собственный сигнал.

При работе операционного усилителя с положительной ОС можно выразить коэффициент усиления такого генератора через коэффициент усиления усилителя без положительной ОС K_u:

$$K_г = \frac{K_u}{(1 - K_u\beta)}, \tag{10.82}$$

где β – коэффициент передачи цепи положительной ОС.

Условием самовозбуждения генератора является бесконечное значение $K_г$, что в случае положительной ОС выполняется при $K_u\beta = 1$. Это означает, что усилитель создаёт выходной сигнал в отсутствие входного за счёт своего же выхода. Обычно β и K_u зависят от частоты, в этом случае условие генерации можно записать в виде:

$$\begin{cases} \left|K_u(\omega)\right|\left|\beta(\omega)\right| = 1; \\ \varphi(\omega) + \psi(\omega) = 2\pi n, \end{cases} \tag{10.83}$$

где φ и ψ – фазовые углы коэффициента передачи усилителя и цепи положительной ОС.

Условия (10.83) называются *балансом амплитуд* и *балансом фаз*.

Если условие самовозбуждения (генерации) выполняется только для одной частоты, то на выходе генератора поддерживается синусоидальное напряжение этой частоты (именно это характерно для генераторов гармонических колебаний). Если это условие выполняется для нескольких частот, то выходное напряжение оказывается несинусоидальным, в нем имеется несколько гармоник.

Из изложенного следует, что генератор гармонических колебаний должен содержать по крайней мере одну *частотно-избирательную цепь* (ЧИЗ), которая бы обеспечивала выполнение условия самовозбуждения на заданной частоте.

В зависимости от вида частотно-избирательной цепи, использующейся в генераторе, генератор относят к тому или иному типу. По виду используемой цепи Разделяют *LC-, RC-* и кварцевые генераторы, в которых используются кварцевые резонаторы.

10.5.1. Генераторы синусоидальных колебаний

Генераторы синусоидальных колебаний преобразуют энергию источника с постоянной ЭДС в энергию синусоидального тока требуемой частоты. Различают генераторы с самовозбуждением (*автогенераторы*) и с независимым возбуждением, которые представляют собой усилители мощности, усиливающие сигналы автогенераторов малой мощности.

LC-генераторы. Наиболее распространенный способ получения высокочастотных колебаний – это применение генератора, в котором *LC*-контур, настроенный на определенную частоту, подключен к усилительной схеме, чтобы обеспечить необходимое усиление на его резонансной частоте. Охватывающая схему петля положительной обратной связи применяется для поддержания колебаний на резонансной частоте *LC*-контура, и такая схема будет самозапускающейся.

В *LC*-генераторах (рис. 10.65) частота колебаний выходного напряжения определяется резонансной частотой ω_0 параллельного колебательного *LC*-контура

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}\,. \qquad (10.84)$$

Усилитель автогенератора охвачен двумя цепями ОС, обеспечивающими режимы балансов амплитуд и фаз.

На частоте f_0 коэффициент передачи цепи положительной ОС

$$\left|\beta\left(\omega_0\right)\right| = \frac{U_{LC}}{U_{вых}} = \frac{R_0}{R_0 + R}, \qquad (10.85)$$

где R_0 – резонансное сопротивление параллельного контура.

Баланс амплитуд устанавливается цепью отрицательной ОС, состоящей из резисторов R_1 и R_2. С её помощью задаётся требуемый коэффициент усиления ОУ

$$\left|K_u\left(\omega\right)\right| = \frac{R_2}{R_1} \geq \frac{R_0 + R}{R_0}. \qquad (10.86)$$

Баланс фаз обеспечивает цепь положительной ОС, состоящая из резистора R и параллельного колебательного LC-контура.

Как правило, LC-генераторы предназначаются для работы в автоматизированных измерительно-вычислительных комплексах и обеспечивают возможность дистанционного управления частотой и уровнем выходного напряжения. Дискретность установки частоты составляет 0,01 Гц.

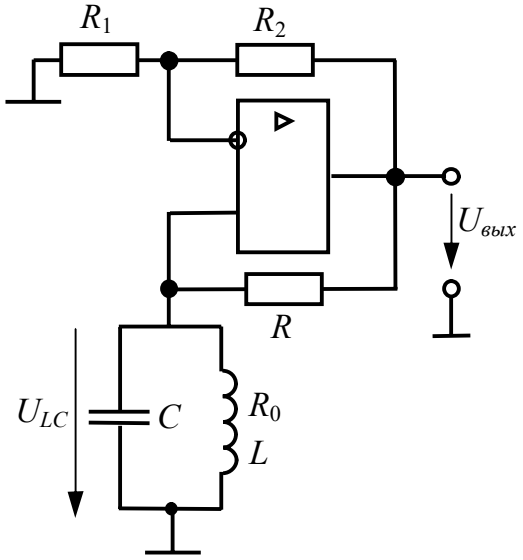

Рис. 10.65. LC-генератор на ОУ

Технические характеристики LC-генераторов в диапазонах достаточно низких частот существенно ухудшаются из-за резкого возрастания величин индуктивностей и ёмкостей колебательного контура и соответствующих им размеров катушек индуктивностей и конденсаторов. Кроме того, их трудно перестраивать по частоте в широких

пределах. Поэтому в низкочастотных генераторах гармонических колебаний в качестве колебательных систем и цепей положительной обратной связи используют частотно-избирательные *RC*-цепи. Такие генераторы называют *RC*-генераторами.

RC-генераторы.

Обычно в *RC*-генераторах включают мост Вина, который осуществляет сдвиг фазы сигнала обратной связи на 180º. Генератор на основе моста Вина является одним из наиболее простых и известных, он широко используется в аудиосхемах. Достоинство этой схемы – малое количество применённых деталей и хорошая стабильность частоты.

Мост Вина – это мост переменного тока, параметры которого зависят от частоты сигнала (рис. 10.66). Одна пара плеч моста – последовательно и параллельно соединённые *RC*-цепи, составляющие совместно квазирезонансную частотно-избирательную цепь, другая пара плеч представляет резистивный делитель напряжения.

Этот мост впервые построил Макс Вин в 1891 году. В основном он применяется для построения *RC*-генераторов синусоидального сигнала с малыми нелинейными искажениями, относительно стабильной частотой и достаточно широким диапазоном перестройки по частоте. Кроме того мост Вина применяется в фильтрах.

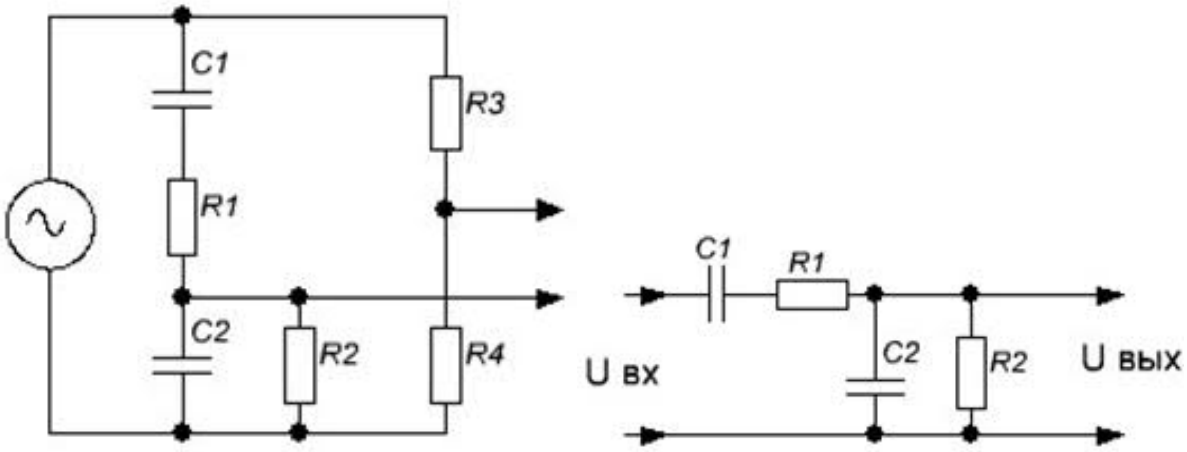

Рис. 10.66. Мост Вина и ЧИЗ ветви моста

При $C1 = C2$ и $R1 = R2$ выходное напряжение составляет $1/3U_{вх}$. $C1R1$ представляет собой фильтр верхних частот, подключенный к $C2R2$ – фильтру низких частот. В результате образуется *полосовой фильтр*, который пропускает составляющие, находящиеся в некоторой полосе частот, с максимальной передачей на резонансной частоте фильтра.

Для того, чтобы построить генератор на мосте Вина, нужно компенсировать потери в нем. Это можно сделать, если мост Вина использовать в цепи положительной обратной связи ОУ (рис. 10.67).

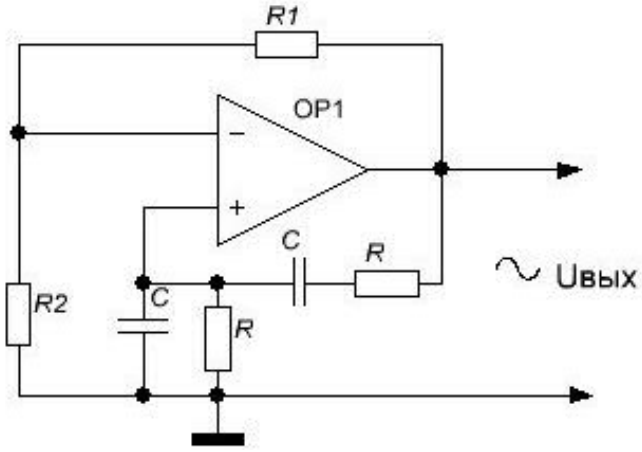

Рис. 10.67. *RC*-генератор с мостом Вина

Частота гармонических колебаний в *RC*-генераторе с мостом Вина

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi RC}. \qquad (10.87)$$

$$T = 2\pi RC. \qquad (10.88)$$

Здесь мост Вина включен в цепь положительной обратной связи между выходом усилителя и его неинвертирующим входом. Усиление устанавливается в цепи отрицательной обратной связи между выходом усилителя и его инвертирующим входом.

На частоте f_0 коэффициент передачи цепи положительной ОС

$$\left|\beta(\omega_0)\right| = \frac{1}{\left(1 + \frac{R}{R} + \frac{C}{C}\right)} = \frac{1}{3}. \qquad (10.89)$$

Исходя из баланса амплитуд, условием самовозбуждения *RC*-генератора с такой цепочкой Вина является коэффициент усиления ОУ

$$\left|K_u(\omega)\right| = \frac{R_2}{R_1} \geq 3. \qquad (10.90)$$

Для генераторов гармонических колебаний важной проблемой является автоматическая стабилизация амплитуды выходного напряжения. Если в схеме не предусмотрены устройства автоматической

стабилизации, устойчивая работа генератора окажется невозможной. В этом случае после возникновения колебаний амплитуда выходного напряжения начнет постепенно увеличиваться, что приведет к насыщению операционного усилителя. В результате выходное напряжение генератора будет отличаться от гармонического. Один из способов устранения этого эффекта предполагает включение в цепь ООС нелинейных элементов.

На рис. 10.68. представлена схема генератора с мостом Вина на ОУ с пассивной схемой автоматической стабилизации амплитуды, которую обеспечивают диоды *VD*1 и *VD*2. Назначение переменного резистора *R*3 – подстройка компенсации амплитуды выходного напряжения.

Схема работает следующим образом. Если амплитуда напряжения на выходе увеличилась, то увеличится ток, проходящий через диоды. Это приведет к тому, что у каждого диода уменьшится дифференциальное сопротивление и сопротивление постоянному току для соответствующих моментов времени. Это эквивалентно уменьшению сопротивления в цепи между выходом ОУ и его инвертирующим входом. Это приводит к уменьшению коэффициента усиления усилителя на ОУ, охваченного ООС. В результате выходное напряжение уменьшится, возвратившись к исходному значению.

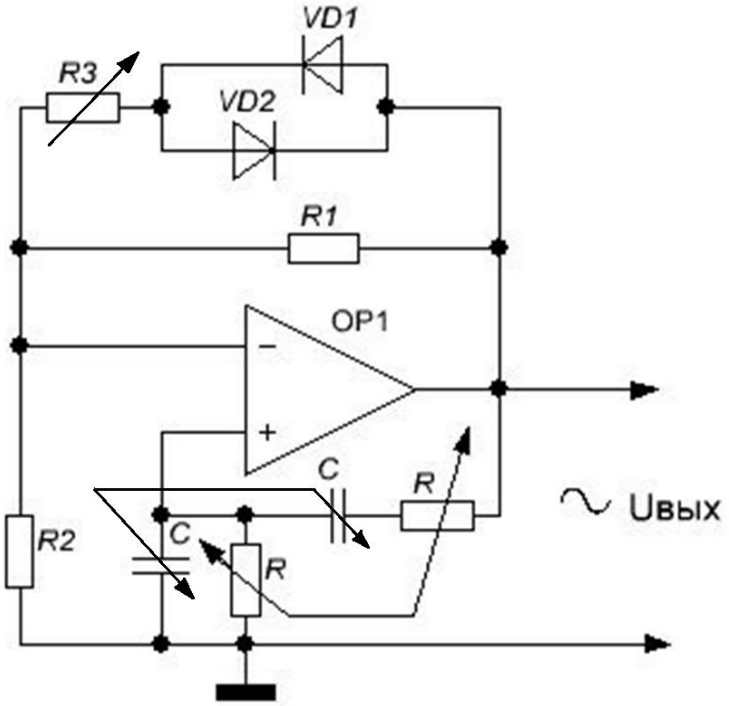

Рис. 10.68. *RC*-генератор на мосте Вина и автоматической стабилизацией амплитуды

На рис. 10.69 представлена схема реального генератора с мостом Вина на ОУ с активной схемой автоматической стабилизации амплитуды на базе полевого транзистора. В таком генераторе выше стабильность генерируемых колебаний, облегчена точная настройка на заданную частоту, повышена температурная стабильность генерируемых колебаний.

Фазовращающая цепь Вина подключена к неинвертирующему входу ОУ. Стабилизация амплитуды генерируемых колебаний осуществляется с помощью транзистора VT1. Сигнал с выхода ОУ выпрямляется диодами VD1, VD2 и поступает на затвор полевого транзистора. При изменении амплитуды колебаний сопротивление сток – исток также изменяется, что приводит к изменению коэффициента передачи ОУ. Таким образом, амплитуда колебаний на выходе генератора остаётся постоянной. Чтобы коэффициент нелинейных искажений генерируемых колебаний не превышал 0,2 %, эффективное значение напряжения сигнала, устанавливаемое резистором на должно превышать 100 мВ. Резистором *R*11 регулируют амплитуду сигнала.

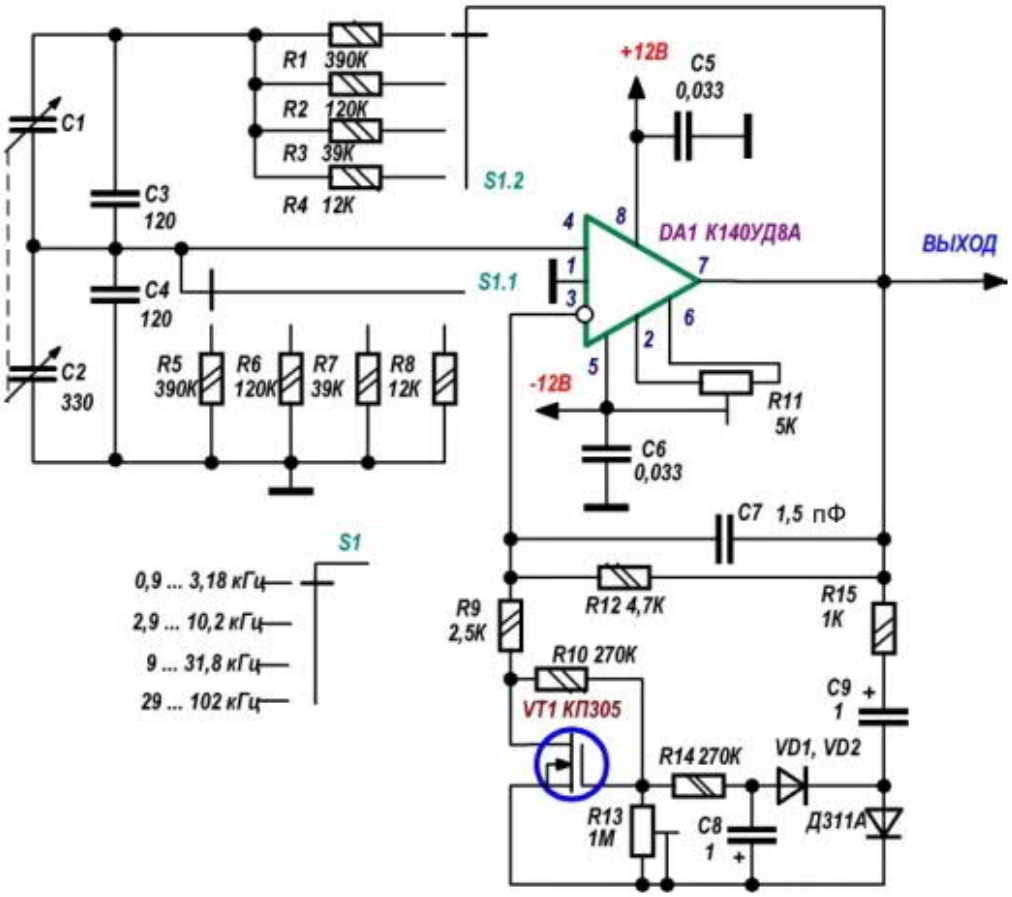

Рис. 10.69. *RC*-генератор на мосте Вина и активной автоматической стабилизацией амплитуды

10.5.2. Генераторы негармонических колебаний

В электронной технике широко применяются устройства, форма выходного напряжения которых резко отличается от синусоидальной. Такие колебания называют *релаксационными*, их форма может быть прямоугольной, пилообразной, трапецеидальной и т.д.

Мультивибратор представляет собой разновидность одного из релаксационных генераторов. Мультивибратор (от латинских слов *multim* – много и *vibro* – колеблю) – релаксационный генератор импульсов прямоугольной формы, выполненный в виде усилительного устройства с цепью положительной ОС.

Генераторы импульсных сигналов могут работать в одном из трех режимов: *автоколебательном*, *ждущем* или *синхронизации*.

В автоколебательном режиме генераторы непрерывно формируют импульсные сигналы без внешнего воздействия. В ждущем режиме генераторы формируют импульсный сигнал по приходу внешнего (запускающего) импульса. В режиме синхронизации генераторы вырабатывают импульсы напряжения, частота которых равна или кратна частоте синхронизирующего сигнала.

Сущность работы мультивибратора – переключение энергии конденсатора с заряда на разряд от источника питания к резистору. Это переключение осуществляется с помощью электронных ключей.

Мультивибраторы служат для запуска в работу других импульсных устройств при их совместной синхронной работе [11, 14].

Автоколебательный мультивибратор на транзисторах

Принципиальная схема автоколебательного *мультивибратора на биполярных транзисторах n-p-n* типа приведена на рис. 7. Схема представляет собой двухкаскадный усилитель с ёмкостными связями. Выход каждого каскада соединен со входом другого, что обеспечивает глубокую, практически 100%-ную положительную обратную связь.

При условиях: $R_{к1} = R_{к2}$; $R_{б1} = R_{б2}$; $R_{к1} < R_{б2}$ и $R_{к2} < R_{б1}$, $C_{б1} = C_{б2}$, $VT_1 = VT_2$ мультивибратор называется *симметричным*. Как видно, конденсаторы связи могут быть электролитическими и при *n-p-n* транзисторах плюсы конденсаторов подключаются к коллекторам. Если применить *p-n-p* транзисторы, надо поменять полярность источника питания и полярность электролитических конденсаторов.

В момент включения питания транзисторы обоих плеч мультивибратора открываются, так как на их базы через соответствующие резисторы $R_{б1}$ и $R_{б2}$ подаются положительные напряжения.

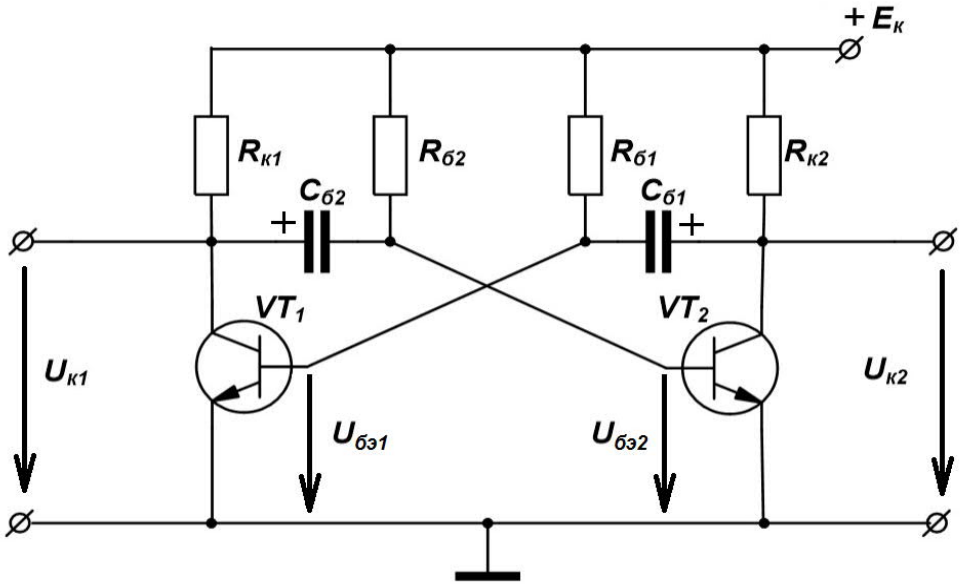

Рис. 7. Схема мультивибратора на биполярных транзисторах *n-p-n* типа

Одновременно начинают заряжаться конденсаторы связи: $C_{б2}$ – через эмиттерный переход транзистора VT_2 и резистор $R_{к1}$; $C_{б1}$ – через эмиттерный переход транзистора VT_1 и резистор $R_{к2}$.

Эти цепи зарядки конденсаторов, являясь делителями напряжения источника питания, создают на базах транзисторов (относительно эмиттеров) все возрастающие по значению положительные напряжения, стремящиеся все больше открыть транзисторы. Открывание транзистора вызывает снижение положительного напряжения на его коллекторе, что вызывает снижение положительного напряжения на базе другого транзистора, закрывая его.

Такой процесс протекает сразу в обоих транзисторах, однако закрывается только один из них, на базе которого более высокое отрицательное напряжение, например, из-за разницы коэффициентов передачи токов h21э, номиналов резисторов и конденсаторов, поскольку, даже при подборе идентичных пар, параметры элементов все равно будут несколько отличаться. Второй транзистор остается открытым. Но эти состояния транзисторов неустойчивы, поскольку электрические процессы в их цепях продолжаются.

Допустим, что через некоторое время после включения питания закрытым оказался транзистор VT_2, а открытым – транзистор VT_1. С этого момента конденсатор $C_{б2}$ начинает разряжаться через открытый транзистор VT_1, сопротивление эмиттер-коллектор которого в это время мало, и резистор $R_{б2}$. По мере разрядки конденсатора $C_{б2}$ отрицательное напряжение на базе закрытого транзистора VT_2 уменьшается.

Как только конденсатор полностью разрядится и напряжение на базе транзистора VT_2 станет близким нулю, в коллекторной цепи этого, теперь уже открывающегося транзистора появляется ток, который воздействует через конденсатор $C_{б1}$ на базу транзистора VT_1 и понижает положительное напряжение на ней. В результате ток, текущий через транзистор VT_1, начинает уменьшаться, а через транзистор VT_2, наоборот, увеличиваться. Это приводит к тому, что транзистор VT_1 закрывается, а транзистор VT_2 открывается. Теперь начнет разряжаться конденсатор $C_{б1}$, но через открытый транзистор VT_2 и резистор $R_{б1}$, что в конечном итоге приводит к открыванию первого и закрыванию второго транзисторов и т.д. Транзисторы все время взаимодействуют, в результате чего мультивибратор генерирует электрические колебания.

Работу мультивибратора иллюстрируют графики зависимостей напряжений *Uбэ* и *Uк* от времени первого и второго транзисторов (рис. 8).

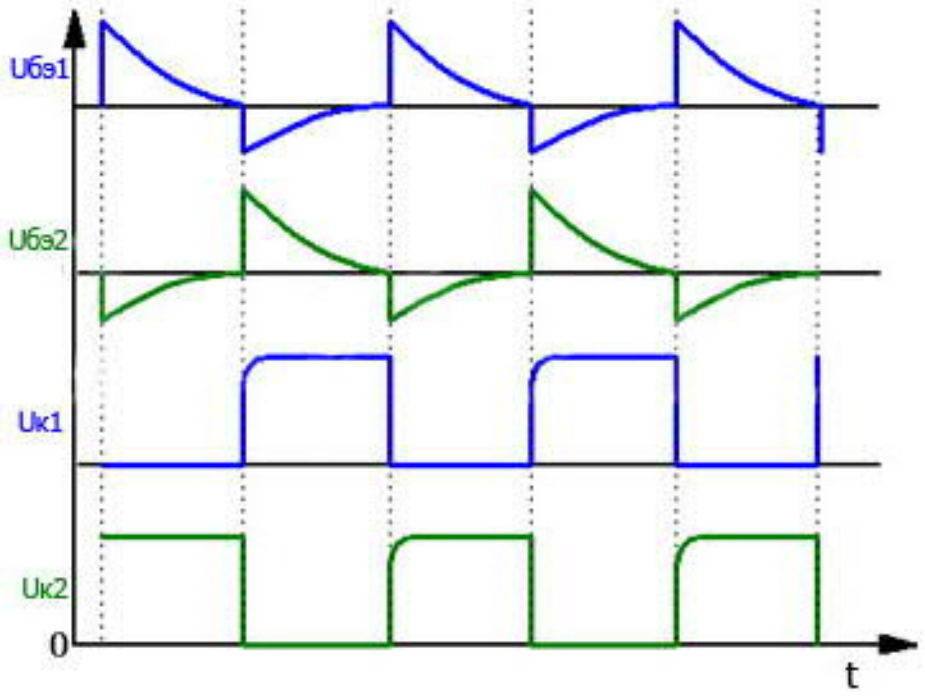

Рис. 8. Напряжения мультивибратора на биполярных транзисторах

Частота колебаний мультивибратора зависит как от ёмкости конденсаторов связи, так и от сопротивления базовых резисторов. Период колебаний мультивибратора определяется временем, в течение которого разряжаются конденсаторы и которое равно:

$$t = \ln 2 \cdot R_{б1} C_{б1} = \ln 2 \cdot R_{б2} C_{б2} \approx 0,7 R_{б1} C_{б1}. \qquad (10.88)$$

Как видно, мультивибратор генерирует, практически, «прямоугольные» колебания. Некоторое нарушение прямоугольной формы связано с переходными процессами в моменты отпирания транзисторов. Отсюда же видно, что сигнал можно «снимать» с любого транзистора. На практике можно считать форму колебаний мультивибратора «чисто прямоугольной», такая форма называется «*меандр*».

Время от начала одного импульса меандра до начала другого – период T – состоит из: $t_и$ – длительности импульса и $t_п$ – длительности паузы (рис. 9).

Рис. 9. Меандр

Отношение $S = T/t_и$ называется *скважностью*. Для симметричного мультивибратора $S = 2$. Величина, обратная скважности называется *коэффициентом заполнения* $D = 1/S$. Для симметричного мультивибратора $D = 0{,}5$.

Поскольку длительность периода T симметричного мультивибратора складывается из равных времен импульса и паузы, то:

$$T = t_и + t_п \approx 1{,}4 R_{б1} C_{б1}. \qquad (10.88)$$

Частота импульсов:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{t_и + t_п} = \frac{1}{\ln 2 \cdot R_{б1} C_{б1}}. \qquad (10.88)$$

Мультивибратор, схема которого показана на рис. 10, вырабатывает прямоугольные импульсы. Частоту их повторения можно изменять в широких пределах, при этом скважность импульсов остаётся неизменной. Работа мультивибратора отличается тем, что в моменты времени, когда транзистор VT2 открыт, конденсатор C2 разряжается через цепочку, состоящую из диода VD3 и резистора R7, а также через резистор R3. Аналогично, когда открыт транзистор VT1, конденсатор C1 разряжается через диод VD2 и резисторы R7 и R4.

Частоту повторения импульсов можно регулировать в больших пределах, изменяя только сопротивление резистора R7. Мультивибратор с данными деталей, показанными на схеме, генерирует импульсы с частотой от 140 до 1400 Гц.

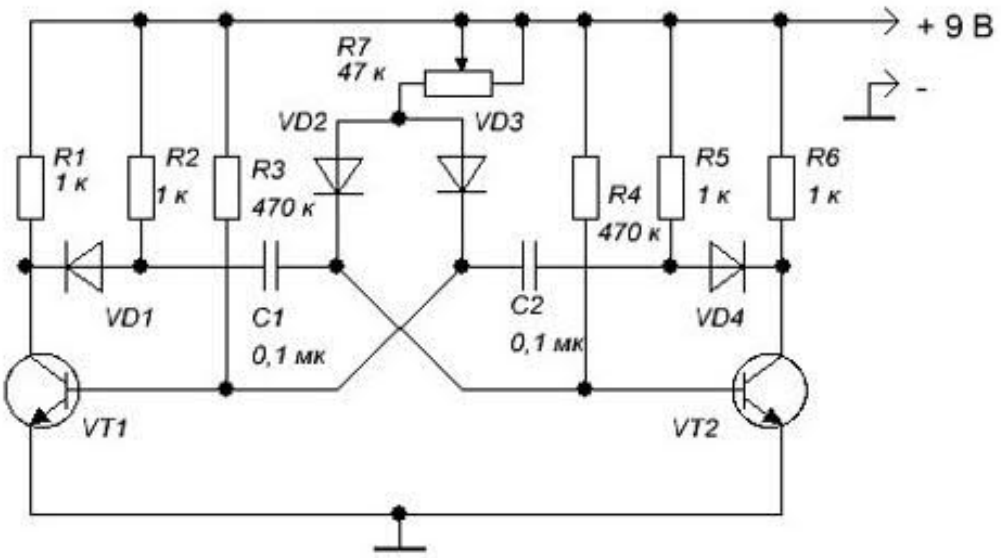

Рис. 10. Схема регулируемого симметричного мультивибратора

Если немного изменить включение резистора R7, то пучится мультивибратор с изменяемой скважностью импульсов (рис. 11). В зависимости от положения движка резистора R7 данный мультивибратор становится несимметричным.

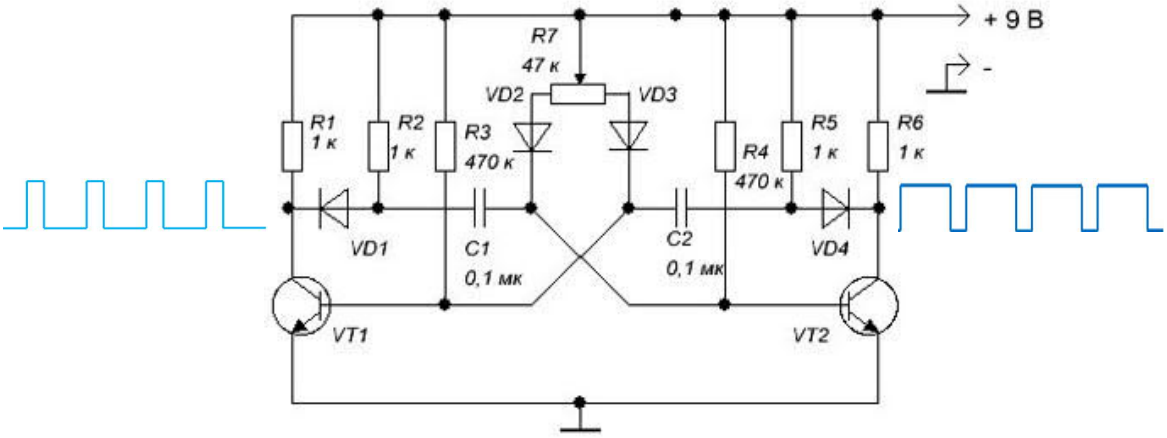

Рис. 11. Схема регулируемого несимметричного мультивибратора

Регулируемые несимметричные мультивибраторы с переменной скважностью лежат в основе *широтно-импульсной модуляции* (ШИМ, англ. PWM) – процесса управления мощностью нагрузки при помощи пульсирующего включения и выключения напряжения. При таком способе управления нагрузкой длительность выходных импульсов t_u пропорциональна уровню выходного сигнала (среднего тока или мощности). ШИМ-сигнал используется, например, для регулирования скорости вращения двигателей постоянного тока или плавности изме-

нения яркости освещения или подсветки множества электронных приборов.

Аналоговые ШИМ-контроллеры выпускаются и в виде готовых микросхем, внутри которых установлен компаратор и схема генерации несущей частоты. Имеются входы для подключения внешних частотозадающих элементов и подачи информационного сигнала. С выхода снимается сигнал, управляющий мощными внешними ключами. Такова, например, микросхема TL494. Для случаев, когда мощность потребителя относительно невелика, выпускаются ШИМ-контроллеры со встроенными ключами. На ток до 3 ампер рассчитан внутренний ключ микросхемы LM2596.

Цифровой способ ШИМ осуществляется применением специализированных микросхем или микропроцессоров. Длина импульса регулируется внутренней программой. Во многих микроконтроллерах, включая популярные PIC и AVR, «на борту» имеется встроенный модуль для аппаратной реализации ШИМ, для получения PWM-сигнала надо активировать модуль и задать параметры его работы. Если такой модуль отсутствует, то ШИМ можно организовать чисто программным методом. Этот способ дает более широкие возможности и предоставляет больше свободы за счёт гибкого использования выходов, но задействует большее количество ресурсов контроллера.

Автоколебательный мультивибратор на ОУ

На рис. 12, *а* приведена классическая схема симметричного мультивибратора на ОУ. В его основе лежит триггер Шмитта или компаратор с гистерезисом, но в отличие от триггера напряжение в мультивибраторе формируется интегрирующей цепочкой *RC*.

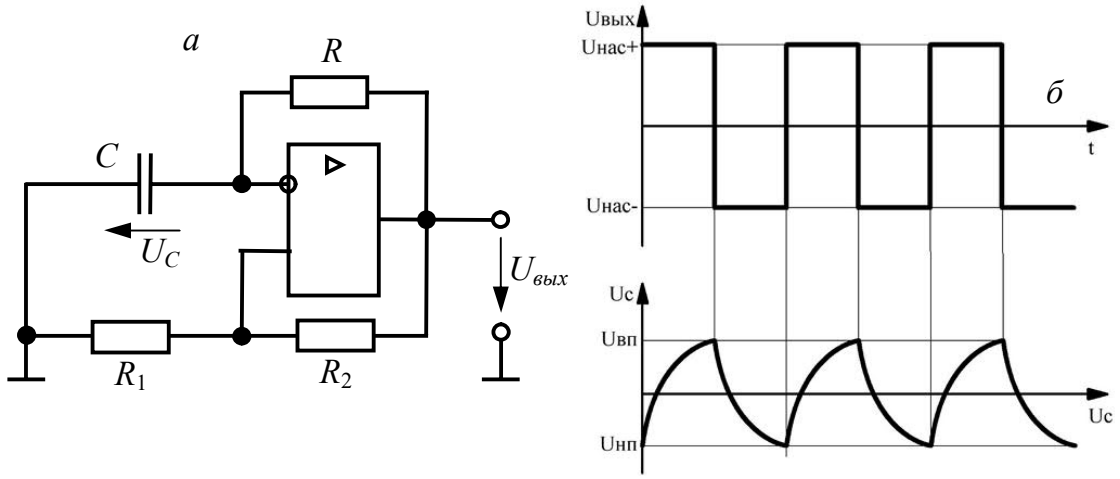

Рис. 12. Схема симметричного мультивибратора на ОУ

Данный мультивибратор состоит из операционного усилителя DA1, который охвачен положительной обратной связью через резисторы R_1R_2 и отрицательной обратной связью при помощи интегрирующей цепочки RC.

Таким образом, в момент подачи питания конденсатор C полностью разряжен, то есть на инвертирующем входе ОУ напряжение равно нулю. В тоже время на выходе ОУ, вследствие неидеального ОУ, присутствует некоторое положительное напряжение, часть которого через ПОС R_1R_2 поступает на неинвертирующий вход ОУ. Далее происходит усиление этого напряжения и на выходе ОУ происходит дальнейший рост напряжения.

Напряжение с выхода ОУ поступает также через цепочку RC, но вследствие того, что интегрирующая цепочка задерживает сигнал, то рост напряжения на конденсаторе C, а, следовательно, и на инвертирующем входе будет происходить медленнее, чем на неинвертирующем. И в результате разность напряжений на инвертирующем и неинвертирующем входе (дифференциальный сигнал ОУ) будет расти, и в месте с ними – выходное напряжение.

В некоторый момент времени напряжение на конденсаторе U_C (а также на инвертирующем входе) достигнет напряжения верхнего порогового уровня триггера Шмитта и выходное напряжение $U_{вых}$ скачком станет равным отрицательному напряжению насыщения. В результате чего ток через резистор R изменится на противоположный, а конденсатор C начнёт разряжаться. Разряд конденсатора будет происходить до напряжения нижнего порога переключения триггера. После этого также скачкообразно произойдёт переключение выходного напряжения с отрицательного насыщения к положительному напряжению насыщения триггера Шмитта. Данные переключения иллюстрирует график расположенный на рис. 12, *б*.

Данный мультивибратор симметричный (длительность импульса и длительность паузы равны) поэтому скважность равна 2.

Частота выходных импульсов такого симметричного мультивибратора зависит от постоянной времени интегрирующей цепочки RC, а также от ширины петли гистерезиса триггера Шмитта и в общем случае определяется следующим выражением:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{t_и + t_п} = \frac{1}{2RC\ln(1 + 2R_1/R_2)}. \qquad (10.88)$$

В случае равенства сопротивлений резисторов в цепи ПОС R_1 и R_2 выражение частоты будет выглядеть следующим образом:

$$f = \frac{1}{T} \approx \frac{1}{2,2RC}. \qquad (10.88)$$

При необходимости получения несимметричного мультивибратора, резистор в цепи ООС заменяется двумя параллельными диодно-резисторными цепями (рис. 13).

Перезарядка конденсатора во время формирования положительных и отрицательных импульсов осуществляется через различные резисторы. Когда напряжение на выходе ОУ положительно, открыт диод $VD1$ и перезарядка происходит с постоянной времени $\tau_1 = R_3C$, а когда напряжение на выходе ОУ отрицательно, открыт диод $VD2$ и постоянная времени $\tau_2 = R_4C$. Можно менять длительность положительных и отрицательных импульсов, варьируя сопротивления резисторов R_3 и R_4.

Частота выходных импульсов несимметричного мультивибратора зависит от постоянных времени $\tau_1 = R_3C$ и $\tau_2 = R_4C$, а также от ширины петли гистерезиса триггера Шмитта:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{t_и + t_п} = \frac{1}{R_3C\ln(1+2R_1/R_2) + R_4C\ln(1+2R_1/R_2)}. \qquad (10.88)$$

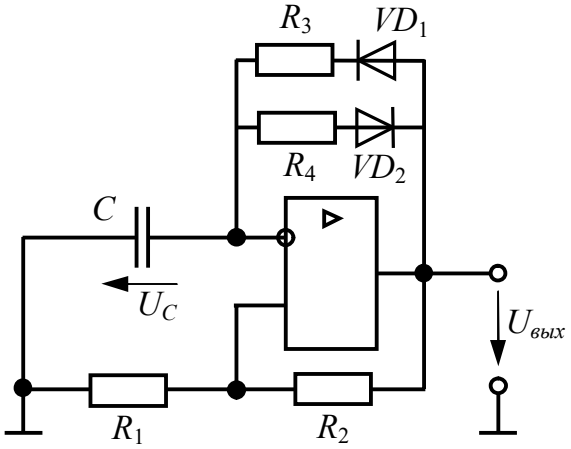

Рис. 13. Схема несимметричного мультивибратора на ОУ

Ждущий мультивибратор (одновибратор)

Одновибратор – устройство с одним устойчивым и одним временно устойчивым состоянием, предназначенное для формирования однократного прямоугольного импульса напряжения требуемой дли-

тельности при воздействии на входе импульса напряжения от внешнего источника. Одновибраторы применяются для стабилизации импульсов напряжения по длительности, управления работой электромагнитных реле, задержки импульсов напряжения и деления частоты их повторения [11, 14].

Ждущий мультивибратор в отличие от автоколебательного на выходе формирует одиночный импульс под действием входного сигнала, причём длительность выходного импульса зависит от номиналов элементов обвязки операционного усилителя. Схема ждущего мультивибратора показана на рис. 14

Ждущий мультивибратор состоит из операционного усилителя $DA1$, цепи ПОС на резисторах R_4R_5, цепи ООС $VD_1C_2R_3$ и цепи запуска $C_1R_1VD_2$.

Цикл работы ждущего мультивибратора можно условно разделить на три части: ждущий режим, переход из ждущего режима в состояние выдержки и непосредственно состояние выдержки.

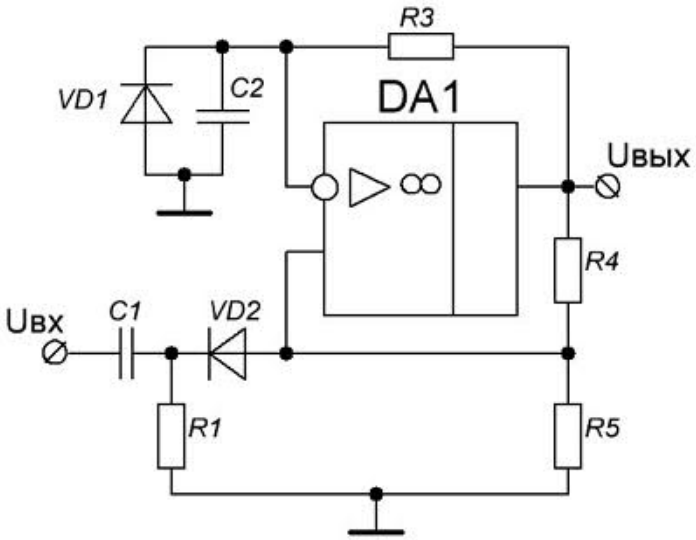

Рис. 14. Схема ждущего мультивибратора на ОУ

Ждущий режим является основной и наиболее устойчивой частью цикла работы данного типа мультивибратора, так как самопроизвольно он не может перейти в следующие части цикла работы ждущего мультивибратора. На инвертирующем входе ОУ присутствует напряжение, которое задаётся диодом VD_1 (в случае кремневого диода напряжение примерно равно 0,6 – 0,7 В), то есть меньше порога переключения мультивибратора. При данных условиях ждущий мультивибратор может находиться неограниченно долгое время (до тех пор, пока не поступит запускающий импульс).

Переход из ждущего режима в состояние выдержки, является следующей частью цикла работы ждущего мультивибратора и начинается после того, как на вход поступит импульс отрицательной полярности, амплитуда которого превысит двухкратное значение напряжения переключения ждущего мультивибратора. В этом случае напряжение порога переключения ждущего мультивибратора понизится и станет меньше, чем напряжение падения на диоде VD_1. Далее произойдёт лавинообразный процесс переключения выходного напряжения и на выходе установится напряжение отрицательного насыщение ОУ ($U_{НАС-}$) и ждущий мультивибратор перейдёт в состояние выдержки. При выборе номиналов элементов входной цепи C_1 и R_1 надо исходить из того, что конденсатор C_1 должен полностью разрядиться за время действия входного импульса, то есть постоянная времени цепи C_1R_1 должна быть на порядок (в десять раз) меньше длительности входного импульса.

Заключительная часть цикла работы ждущего мультивибратора является *состояние выдержки*. В данном состоянии на неинвертирующий вход поступает часть напряжения с выхода мультивибратора, тем самым задавая пороговое напряжение перехода мультивибратора в ждущий режим. В тоже время выходное напряжение через цепь ООС C_1R_1 поступает на инвертирующий вход и открывает диод VD_1, через который начинает разряжаться конденсатор C_1. После разряда конденсатора C_1 до 0 В происходит его зарядка через резистор R_1 до напряжения перехода мультивибратора в ждущий режим. После чего схема переходит в исходное состояние и на выходе устанавливается напряжение положительного насыщения ОУ ($U_{НАС+}$).

Длительность состояния выдержки и непосредственно формируемого выходного импульса определяется временем зарядки конденсатора C_1 через резистор R_1 и в общем случае определяется следующим выражением:

$$T \approx R_1 C_1 \ln 2 . \qquad (10.88)$$

Мультивибраторы на интегральных схемах

Одна из самых популярных интегральных схем для реализации мультивибраторов – интегральная микросхема NE555 (рис. 15) или её отечественный аналог – микросхемах КР1006ВИ1 (КР1087ВИ2). Эти микросхемы, в отличии от мультивибратора на транзисторах, делают импульсы близкие к прямоугольным.

Впервые выпущен в 1971 году компанией Signetics под обозначением NE555. Функциональные аналоги оригинального NE555 вы-

пускаются во множестве биполярных и КМОП-вариантов. Сдвоенная версия 555 выпускается под обозначением 556, счетверенная — под обозначением 558.

Таймер NE555 применяется для построения различных генераторов, модуляторов, реле времени, пороговых устройств и прочих узлов электронной аппаратуры. В качестве примеров применения микросхемы-таймера можно указать функции восстановления цифрового сигнала, искажённого в линиях связи, фильтры дребезга, двухпозиционные регуляторы в системах автоматического регулирования, импульсные преобразователи напряжения, устройства широтно-импульсного регулирования, таймеры и др.

Микросхема состоит из делителя напряжения с двумя опорными напряжениями для сравнения, двух прецизионных компараторов (низкого и высокого уровней), RS-триггера с дополнительным входом сброса, транзисторного ключа с открытым коллектором и выходного усилителя мощности для увеличения нагрузочной способности.

Номинальное напряжение питания базовой версии микросхемы может находиться в пределах 4,5…16,5 В. Потребляемый микросхемой ток может достигать величины 6…15 мА в зависимости от напряжения питания. Типовое потребление бывает меньше и обычно составляет 3…10 мА в состоянии низкого уровня и 2…9 мА – в состоянии высокого.

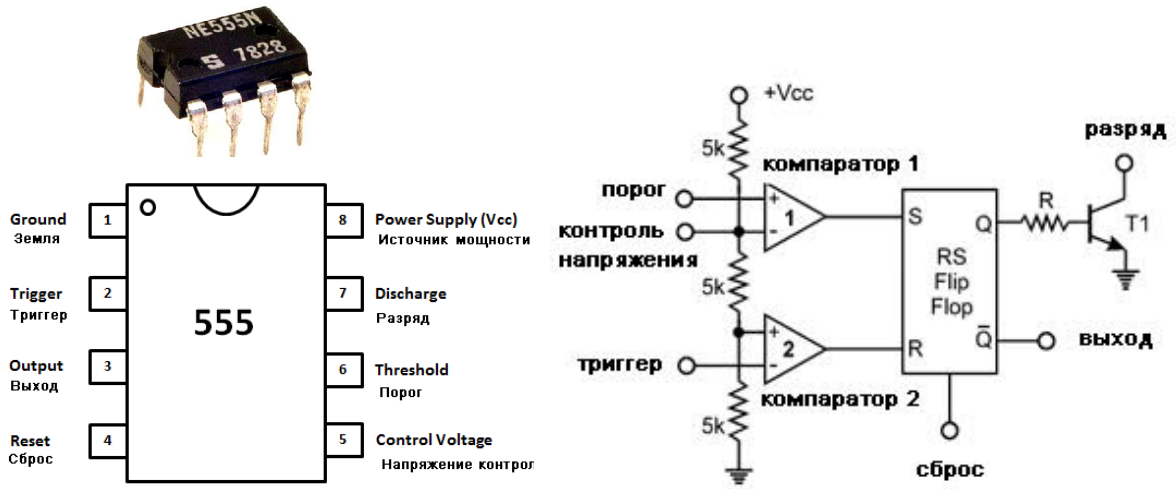

Рис. 15. Таймер NE555: внешний вид и внутренняя структура

Максимальный выходной ток для отечественной КР1006ВИ1 и КМОП-версий таймера составляет 100 мА. Большинство ныне выпускаемых зарубежных аналогов, выполненных по биполярной технологии, допускает выходной ток до 200 мА и более.

Одновибратор на NE555

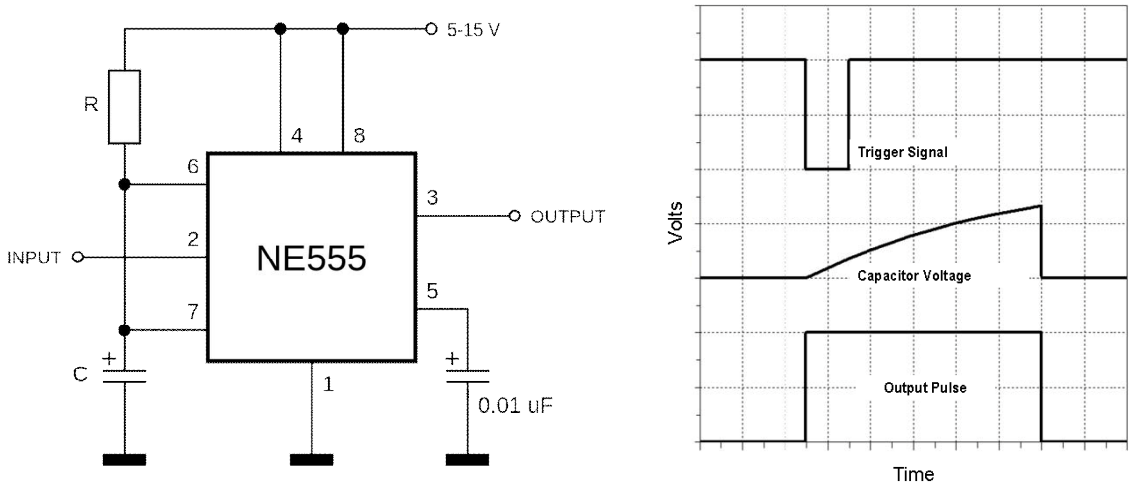

Рис. 16. Схема одновибратора на NE555

Входной импульс низкого уровня на входе *2* вызывает переключение таймера в режим отсчёта времени (на выходе *3* высокий уровень), который длится заданный промежуток времени:

$$T \approx 1{,}1RC\,, \qquad (10.88)$$

а затем таймер переключается обратно в стабильное состояние (низкий уровень на выходе *3*).

Автоколебательный мультивибратор на NE555

Мультивибратор (рис. 17) выдаёт относительно земли на выводе 3 выходное напряжение близкое к напряжению питания в течении длительности импульса, после чего выдаёт напряжение близкое к нулю в течении длительности паузы, дальше это повторяется до тех пор пока не будет отключено питание.

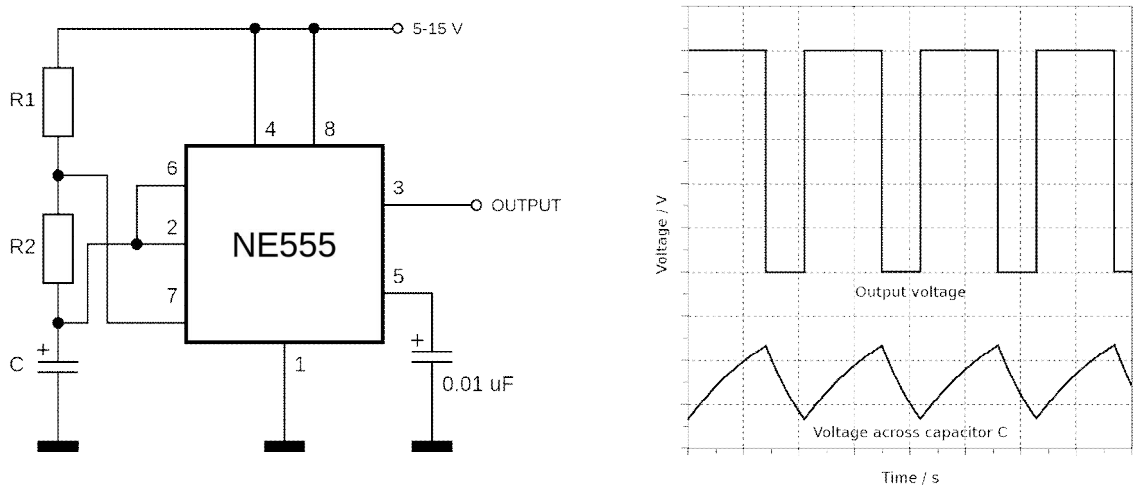

Рис. 17. Схема симметричного мультивибратора на NE555

При включении источника питания конденсатор *C* разряжен, поэтому на выходе *3* находится высокий уровень напряжения, транзистор разряда *T1* закрыт и конденсатор начинает заряжаться до $U_{пит}$ через резисторы R_1 и R_2. Когда напряжение достигает $2/3U_{пит}$, переключается вход *6* и сигнал на выходе *3* переходит в состояние низкого уровня, одновременно происходит отпирание транзистора *T1*, разряжающего конденсатор *C* на землю через резистор R_2. Схема переходит в периодический режим работы и напряжение на конденсаторе *C* колеблется между значениями 1/3 и $2/3U_{пит}$.

Длительность импульса, длительность паузы и период прямоугольных колебаний можно рассчитать по формулам:

$$t_и = \ln 2(R_1 + R_2)C \approx 0,693(R_1 + R_2)C. \qquad (10.88)$$

$$t_п = \ln 2R_2C \approx 0,693R_2C. \qquad (10.88)$$

$$T = t_и + t_п. \qquad (10.88)$$

Частота импульсов:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{t_и + t_п} = \frac{1}{\ln 2(R_1 + 2R_2)C}. \qquad (10.88)$$

Несимметричный мультивибратор на NE555

Если несколько усовершенствовать генератор, показанный на рисунке 17, можно получить генератор с регулируемой скважностью. Схема такого генератора показана на рисунке 18.

Длительность импульса, длительность паузы и частоту (период) колебаний можно рассчитать по формулам:

$$t_и = 0,693(R_1 + R_2)C_1. \qquad (10.88)$$

$$t_п = 0,693R_3C_1. \qquad (10.88)$$

$$T = t_и + t_п. \qquad (10.88)$$

Частота импульсов:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{t_и + t_п} \approx \frac{1,44}{(R_1 + R_2 + R_3)C_1}. \qquad (10.88)$$

Таким образом, подключив переменный резистор вместо R_2 и R_3, а его скользящий контакт к выводу 7 – DISCHARGE, можно получить простейший ШИМ регулятор с постоянной частотой и плавной регулировкой коэффициента заполнения в диапазоне 1…99 %

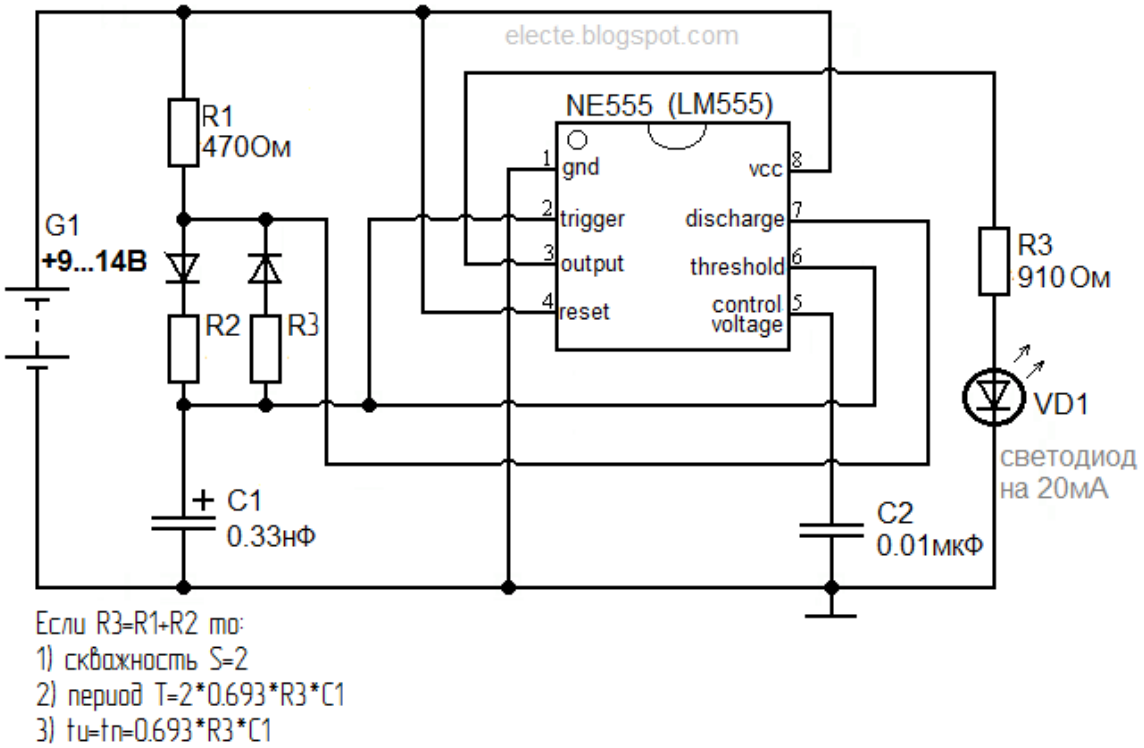

Рис. 18. Схема несимметричного мультивибратора на NE555

Контрольные вопросы и задания

1. Для чего применяют генераторы синусоидальных колебаний?
2. В чём заключается условие самовозбуждения генератора?
3. Запишите баланс амплитуд и баланс фаз генератора.
4. Перечислите области применения *LC*- и *RC*-генераторов.
5. Как определяется частота колебаний выходного напряжения в *LC*-генераторах?
6. Чем задаётся баланс амплитуд и фаз в *LC*-генераторах?
7. В чём заключается принцип действия генераторов с кварцевой стабилизацией частоты?
8. Зачем включают мост Вина в структуру *RC*-генераторов?
9. Как определяется частота гармонических колебаний выходного напряжения в *RC*-генераторе с мостом Вина?