

В связи с повышением требований к качеству звуко-воспроизводящей аппаратуры измерительные генераторы для ее проверки должны отличаться незначительным уровнем гармоник и высокой стабильностью амплитуды генерируемых колебаний и, кроме того, должны быть достаточно простыми, недорогими и доступными для повторения даже начинающими радиолюбителями.

Имеется значительное число публикаций, посвященных вопросам построения генераторов НЧ. Известно, что характеристики радиоэлектронной аппаратуры в значительной степени определяются наличием цепей обратных связей и их глубиной. Именно поэтому в высококачественном генераторе необходимо применить для формирования сигнала цепь ООС. Если это мост Вина, то максимальный коэффициент передачи реактивной час-

ти моста наблюдается на резонансной частоте $\omega_0 = \frac{1}{RC}$

и равен $1/3$. В отличие от моста Вина, двойной Т-мост (рис. 1) на квазирезонансной частоте ω_0 имеет «непрозрачную» передаточную характеристику, т. е. его коэффициент передачи приближается к нулю. Причем чем больше расстройка частоты от резонансной, тем больше коэффициент передачи моста приближается к единице. Именно поэтому двойной Т-мост, являясь селективной цепью ООС, эффективно подавляет все колебания, не являющиеся резонансными, обеспечивая тем самым высокое качество генерируемого сигнала.

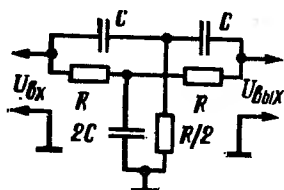


Рис. 1. Двойной Т-мост

Измерительный генератор, схема которого дана на рис. 2, выполнен с использованием в цепи ООС упрощенного двойного Т-моста.

Частотный диапазон генератора $10 \dots 10^5$ Гц разбит на четыре поддиапазона:

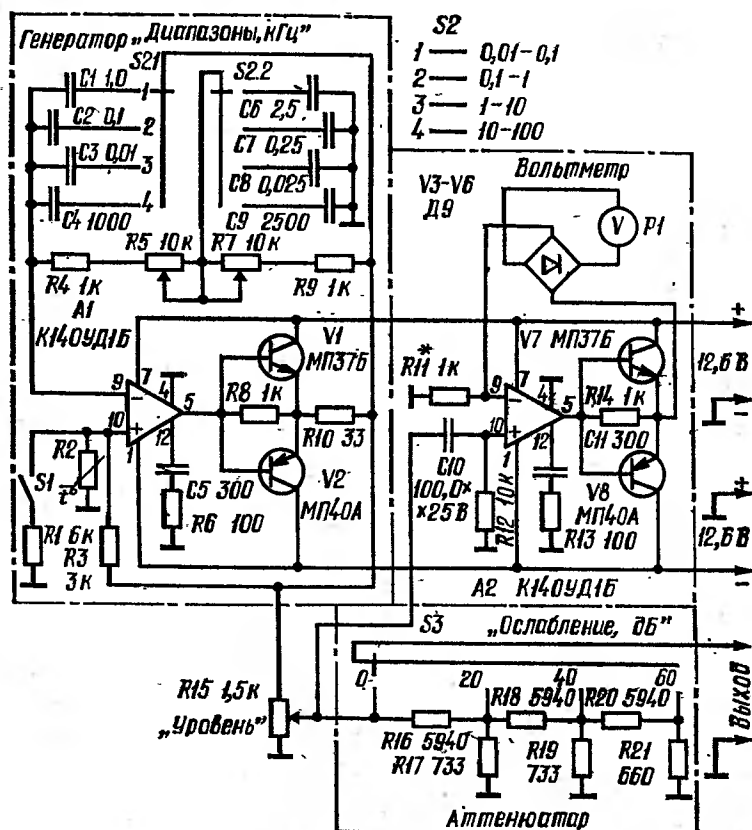


Рис. 2. Принципиальная схема генератора и вольтметра

10...100 Гц, 100...1000 Гц, 1000...10 000 Гц, 10 000...100 000 Гц; коэффициент нелинейных искажений в диапазоне частот $20...20 \times 10^3$ Гц не более 0,01 % при амплитуде выходного сигнала не менее 5 В на нагрузке 600 Ом.

Нестабильность амплитуды выходного сигнала на первых трех поддиапазонах 0,1 дБ, а на четвертом — 0,3 дБ. Потребляемый генератором ток не превышает 30 мА.

Измерение коэффициента нелинейных искажений производилось прибором С6-1А в диапазоне частот $20...20 \times 10^3$ Гц, на более высоких частотах — прибором С6-5. Собственный уровень шумов прибора С6-1А соответствует уровню нелинейных искажений 0,005 % при измерении коэффициента нелинейных искажений менее 0,01 %.

Генератор представляет собой усилитель, охваченный как положительной, так и отрицательной обратными связями. Основой описываемого генератора является широко распространенный операционный усилитель (ОУ) К140УД1Б. На выходе ОУ для увеличения нагрузочной способности используются транзисторы $V1$ и $V2$, работающие в режиме эмиттерных повторителей. Применение выходного каскада такого типа обычно приводит к неустойчивой работе при малых уровнях сигнала на выходе ОУ. Это связано с тем, что при значении выходного сигнала меньше напряжения отпирания переходов эмиттер-база выходных транзисторов $V1$ и $V2$ напряжение на выходе генератора не зависит от напряжения на выходе ОУ, несмотря на наличие ООС, так как цепь ООС оказывается разорванной, т. е. выходное напряжение не зависит от напряжения на базах $V1$ и $V2$. Неопределенность напряжения на входе ОУ приводит к паразитной генерации. Для устранения этой генерации необходимо либо значительно понизить верхнюю граничную частоту усилителя, либо подать сигнал со входа эмиттерных повторителей на их выход. Понижение верхней граничной частоты ухудшает практически все параметры усилителя, а значит, и самого генератора. В первую очередь ухудшается коэффициент гармоник на верхних частотах. Лучшее второе решение — подать через резистор $R8$ напряжение с выхода ОУ в нагрузку. В этом случае при малых напряжениях на выходе ОУ, когда выходные транзисторы заперты, часть выходного

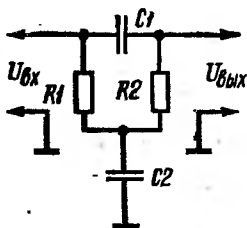


Рис. 3. Упрощенный двойной Т-мост

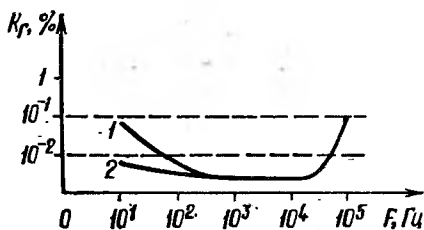


Рис. 4. Зависимость коэффициента гармоник от частоты

напряжения с выхода ОУ подается в нагрузку через резистор R_8 , и цепь ООС не оказывается разорванной. При больших напряжениях на выходе ОУ транзисторы $V1$ и $V2$ отпираются, и резистор R_8 шунтируется ими.

Необходимая для работы генератора положительная обратная связь осуществляется резистором R_3 , образующим совместно с термистором R_2 делитель выходного напряжения, которое подается на неинвертирующий вход ОУ. Синусоидальный сигнал формируется упрощенным двойным Т-мостом, образованным конденсаторами $C1...C4$, $C6...C9$ и резисторами $R4$, $R5$, $R7$, $R9$ и включенным в цепь ООС как по переменному, так и по постоянному току. Упрощенный двойной Т-мост (рис. 3, 4) отличается от двойного Т-моста меньшим количеством элементов при практически тех же характеристиках. Меньшее количество элементов моста упрощает перестройку частоты и коммутацию при переходе с одного поддиапазона на другой. Кратное изменение емкостей конденсаторов $C1...C4$ и $C6...C9$ приводит лишь к изменению частоты генерируемых колебаний и практически не влияет на другие параметры генератора. Для плавной перестройки частоты генератора используется сдвоенный переменный резистор $R5$, $R7$. Применение такого резистора, а не блока сдвоенных конденсаторов, вызвано тем, что наибольшая емкость переменных конденсаторов составляет $500...1000$ пФ и, следовательно, на низких частотах сопротивление резисторов моста достигает единиц и даже десятков МОм, что приводит к необходимости применения ОУ с большим входным сопротивлением. Такие ОУ как, например, К140УД8 не позволяют получить высокие параметры генератора из-за своей низкой граничной частоты, их применение целесообразно лишь

на частотах, близких к частоте среза и менее (для К140УД8 частота среза около 30 Гц). Поэтому при замене ОУ К140УД1Б на К140УД8 коэффициент нелинейных искажений генератора на частоте 1 кГц увеличивается до 0,05 %, а на частоте 10 кГц уже до 0,5 %.

Простая, но достаточно эффективная стабилизация амплитуды генерируемых колебаний осуществляется термистором $R2$, который в данном генераторе включен в плечо положительной обратной связи полностью и поэтому хорошо стабилизирует амплитуду колебаний. Еще лучше стабилизация с использованием оптронов, но пока они не получили широкого распространения.

При работе генератора выходное напряжение измеряется широкополосным вольтметром с линейной шкалой. Он, как и генератор, выполнен на основе ОУ К140УД1Б, в цепи ООС которого в диагонали диодного моста включена измерительная головка. Отличительной особенностью такого вольтметра является его постоянное входное сопротивление. Так как диодный мост $V3...V6$ включен в цепь ООС, то нелинейность вольтамперной характеристики диодов практически полностью устраняется ООС. Верхняя граничная частота измерений вольтметра не менее 100 кГц и ограничена быстродействием примененного ОУ. Нижняя граничная частота измерений определяется емкостью переходного конденсатора $C10$. При емкости 100 мкФ она составляет примерно 20 Гц. Если необходимо понизить нижнюю граничную частоту измерений, емкость конденсатора $C10$ следует увеличить. Резистором $R11$ при необходимости корректируется усиление вольтметра, причем сопротивление его примерно равно сопротивлению примененной измерительной головки. В таком случае коэффициент усиления вольтметра равен единице.

В данном генераторе для плавной перестройки частоты используются двоянные переменные резисторы СПЗ-12 с номинальным сопротивлением 10 кОм. Для других номиналов резисторов $R5$, $R7$ емкости конденсаторов $C1...C4$ и $C6...C9$ следует изменить, чтобы поддиапазоны частот генератора не изменились. При этом произведение номинального сопротивления примененного резистора $R5$, $R7$ на номинальную емкость соответствующего конденсатора из $C1...C4$ или $C6...C9$ должно быть таким же для каждого поддиапазона, как и на приведенной схеме генератора. Приведенное значение сопротив-

лений $R5$ и $R7$ является оптимальным для данного генератора. Это связано с тем, что резисторы двойного Т-моста образуют передающую цепь для частот ниже квазирезонансной на входе ОУ. Входное сопротивление ОУ К140УД1Б примерно 10 кОм, поэтому чем больше сопротивление резисторов моста, тем меньше его коэффициент передачи по низким частотам на вход ОУ, тем меньше подавляются гармоники. Но и уменьшение сопротивлений $R5$ и $R7$ тоже нецелесообразно, так как мост подключен к выходу генератора и шунтирует его. Поэтому следует применять переменные резисторы моста с номинальным сопротивлением, не превышающим входное сопротивление примененного ОУ. Если коэффициент перекрытия поддиапазона по частоте K_d необходимо изменить, то следует изменить и сопротивление резисторов $R4$, $R9$. При этом при их увеличении перекрытие диапазона по частоте уменьшается, а при уменьшении — увеличивается. В качестве конденсаторов $C1...C4$ и $C6...C9$ моста следует применять бумажные или пленочные конденсаторы. На частотах выше 1 кГц можно применять и керамические конденсаторы. На более низких частотах применение керамических конденсаторов большей емкости, имеющих большие диэлектрические потери, может привести к релаксационным колебаниям амплитуды генерируемого сигнала. Еще лучше слюдяные конденсаторы, так как у них малый температурный коэффициент емкости. Если необходимо увеличить амплитуду генерируемых колебаний, не изменяя частот, то емкости конденсаторов $C6...C9$ следует увеличить, а емкости $C1...C4$ соответственно уменьшить. Если соотношение емкостей $C1...C4$ и $C6...C9$ будет постоянным для всех поддиапазонов, то и амплитуда колебаний также будет постоянной. Если необходимо изменить частоты поддиапазонов при неизменном уровне выходного сигнала генератора, то следует увеличить емкости конденсаторов моста $C1...C4$ и $C6...C9$ или уменьшить их в одно и то же число раз. При этом при увеличении емкостей частоты поддиапазонов уменьшаются, а при уменьшении — увеличиваются. Применение термистора ТП1-2/05 не является обязательным, если его нет, можно использовать вакуумную лампочку накаливания. В этом случае вместо резистора $R3$ включается лампочка, а вместо термистора $R2$ — резистор с сопротивлением, равным 20...30 % от номинального сопротивления лампочки, которое опре-

деляется отношением номинального напряжения накала к току накала. Так, для лампочки типа КМ60-30 номинальное сопротивление будет 2 кОм, а сопротивление резистора R_2 — около 500 Ом. Чем меньше сопротивление этого резистора и чем больше номинальное сопротивление лампочки, тем лучше стабилизация амплитуды генерируемых колебаний. Точное сопротивление резистора определяется экспериментально по наличию устойчивой генерации под нагрузкой на всех поддиапазонах. При замене термистора лампочкой может измениться нестабильность и амплитуда генерируемых колебаний. На частотах ниже 100...300 Гц коэффициент нелинейных искажений увеличивается из-за малой тепловой инерции термистора (лампочки). Для уменьшения этих искажений следует увеличить тепловую постоянную времени термистора. Поэтому, когда необходим малый уровень гармоник на низких частотах, переключателем S_1 параллельно термистору R_2 подключается шунт R_1 (см. рис. 2). Причем чем меньше сопротивление шунта, тем меньше нелинейные искажения, но увеличивается нестабильность амплитуды колебаний. Сопротивление шунта следует подобрать экспериментально, уменьшая его до тех пор, пока существует устойчивая генерация на всех поддиапазонах под нагрузкой. Оптимальное сопротивление шунта составляет примерно 150 % номинального сопротивления термистора. На рис. 4 приведены графики коэффициента нелинейных искажений генератора со стабилизацией амплитуды термистором ТП-2/05 без шунта — кривая 1, с шунтом 6 кОм — кривая 2. При работе генератора на нагрузку со значительной емкостью при положении S_3 — «0 дБ» возможно появление паразитной высокочастотной генерации. Для ее устранения необходимо параллельно резистору R_8 подключить конденсатор емкостью 100...1000 пФ. У отдельных ОУ К140УД1В может возникать самовозбуждение на высоких частотах, которое устраняется увеличением емкости конденсатора C_5 , но при этом могут увеличиться искажения.

Для измерения выходного напряжения применен вольтметр М2001 с пределом измерения 3 В. Можно использовать вольтметры и другого типа, но их сопротивление должно быть не менее 300 Ом. Если сопротивление примененного вольтметра более 3 кОм, то транзисторы V_7 и V_8 можно исключить.

В генераторе применены резисторы ОМЛТ-0,125 Вт

с допуском 10 %. Конденсаторы МБМ, КМ, К50-6. В качестве резисторов $R5$, $R7$ используется двоянный резистор СПЗ-12 группы Б. Резисторы могут иметь значительный разброс сопротивлений, поэтому желательно подобрать двоянный переменный резистор с разбросом сопротивлений не более 10 %. В выходном аттенуаторе резисторы подобраны с точностью не хуже 1 %. Для удобства подбора каждый из этих резисторов составлен из двух последовательно или параллельно соединенных с общим сопротивлением, как указано на схеме. Примененные переключатели ПМ можно заменить переключателями П2К.

Корпус генератора состоит из двух П-образных крышек и двух стенок — передней и задней. Верхняя и нижняя П-образные крышки согнуты из алюминия толщиной 2...3 мм и крепятся к стенкам винтами М2,5 с потайной головкой. Габариты крышек 200×200 мм с высотой нижней крышки 200 мм, а верхней — 45 мм. Обе стенки имеют размер 200×60 мм и изготовлены из дюралюминия Д16Т толщиной 5 мм. Углы стенок закруглены под радиус изгиба крышек. Компонировка генераторов и их оформление неоднократно описывались в журнале «Радио» (например, А. Майоров. РС генератор. — 1980, № 8).

К источнику питания не предъявляются специальных требований. Он должен обеспечивать выходное напряжение $\pm 12,6$ В при амплитуде пульсаций не более 1 мВ и токе не менее 30 мА.