



ВЕКТОРНЫЙ ИНДИКАТОР НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ

И. АКУЛИНЧЕВ

Векторный индикатор — это специализированный осциллограф, предназначенный для исследования нелинейности амплитудных и фазовых характеристик усилителей ПЧ и возникающих в них помех.

С его помощью можно определить номера гармоник и их амплитуду, обнаружить шум и помехи при разных уровнях выходного сигнала и сопротивлении нагрузки, выяснить причины возникновения нелинейных искажений, помех, самовозбуждения и нарушений симметрии двухтактных и дифференциальных каскадов*. Обладая формализованную оценку нелинейных искажений, векторный индикатор дает возможность исследовать различие между формами входного и выходного сигналов усилителей, отличающихся схемными решениями, в первую очередь для оценки их эффективности.

В этом приборе селекция сигнала помехи осуществляется без помощи фильтров, путем прямого вычитания входного напряжения усилителя из выходного. Такой метод селекции, основанный на сопоставлении двух противофазных напряжений, обеспечивает автокомпенсацию гармоник измерительного сигнала, поступающего от генератора. Сигнал помехи поступает на усилитель вертикального отклонения векторного индикатора. Для развертки по горизонтальной оси используется синусоидальный сигнал от измерительного генератора. Электронный луч прочерчивает на экране трубки замкнутую трассу (ниже будем называть ее «векторной трассой»), по изломам и перекрещиваниям которой можно анализировать динамику процессов в усилителях.

Основными составными частями векторного индикатора нелинейных искажений являются: генератор синусоидального измерительного сигнала;

селектор, пропускающий только комбинации с частотами, которые отличаются от частоты измерительного сигнала; инвертор повторителя; масштабный усилитель; электроннолучевая трубка с усилителями отклонения луча по горизонтали и вертикали; блок вторичного электропитания.

Структурная схема (рис. 1). Синусоидальное напряжение с выхода генератора 1 подается на вход усилителя 8 горизонтального отклонения луча электроннолучевой трубки 9 и через корректор фазового сдвига 2 на вход испытываемого устройства 3. Выходное напряжение последнего через регулятор уровня 4 и переключатель *S1* («Повторитель» — «Инвертор») поступает либо на неинвертирующий, либо на инвертирующий вход операционного усилителя 5. Этот каскад позволяет обеспечить необходимую фазу сигнала на входе резистивной цепи селектора независимо от того, каким является испытуемый усилитель: инвертирующим или неинвертирующим. Между выходами генератора и операционного усилителя включена резистивная цепь селектора *R1R2*. Общая точка резисторов через контакты переключателя «Измерение» — «Калибровка» соединяется с входом масштабного усилителя 6. Его выходное напряжение подается на вход усилителя вертикального отклонения 7.

Поскольку сопротивления резистив-

ров *R1* и *R2* постоянны, а селектор подключен к генератору синусоидального напряжения с неизменным амплитудным значением $U_1 = 9,2$ В (действующее значение 6,5 В), настройки селектора достигаются подбором амплитуды противофазного напряжения U_2 . При отношении сопротивлений резисторов $R1 : R2 = 10$ напряжение U_2 будет иметь амплитудное значение 0,92 В, а составляющая нелинейных искажений при коэффициенте гармоник, равном 0,5%, с учетом понижения U_2 делителем $R2R1$, на входе масштабного усилителя — 4,1 мВ.

Для калибровки вертикального отклонения луча переключатель *S2* («Измерение» — «Калибровка») устанавливается в положение «Калибровка». При этом вход масштабного усилителя 6 подключается к выходу генератора 1 через делитель напряжения, образованный резисторами *R1, R3*. Оценку нелинейных помех производят по масштабу калибровочной трассы. Это позволяет избежать погрешности, связанной с нестабильностью выходного напряжения генератора U_1 .

Принципиальная схема (рис. 2). Генератор измерительного синусоидального сигнала выполнен на базе микросхемы *A1* (операционный усилитель К1УТ531Б). Резисторы *R5* и *R6* образуют цепь положительной обратной связи, а резисторы *R1, R2* и конденсаторы *C1, C2* входят в цепь отрицательной обратной связи. Рабочая частота генератора — 1 кГц — определяется параметрами цепи *RIC1R2C2***. Коэффициент гармоник выходного напряжения генератора — не более 0,03%. Миниатюрная лампочка накала *H1* является

** При необходимости уменьшить (увеличить) частоту колебаний, добиваемых генератором, нужно пропорционально увеличивать (уменьшать) емкость конденсаторов *C1* и *C2*.

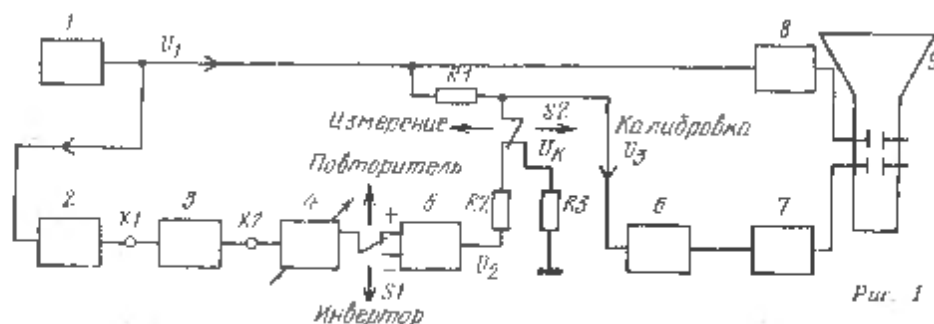


Рис. 1

* Все составляющие выходного сигнала, отличающиеся от частоты измерительного сигнала, при дальнейшем изложении для краткости будем называть помехой.

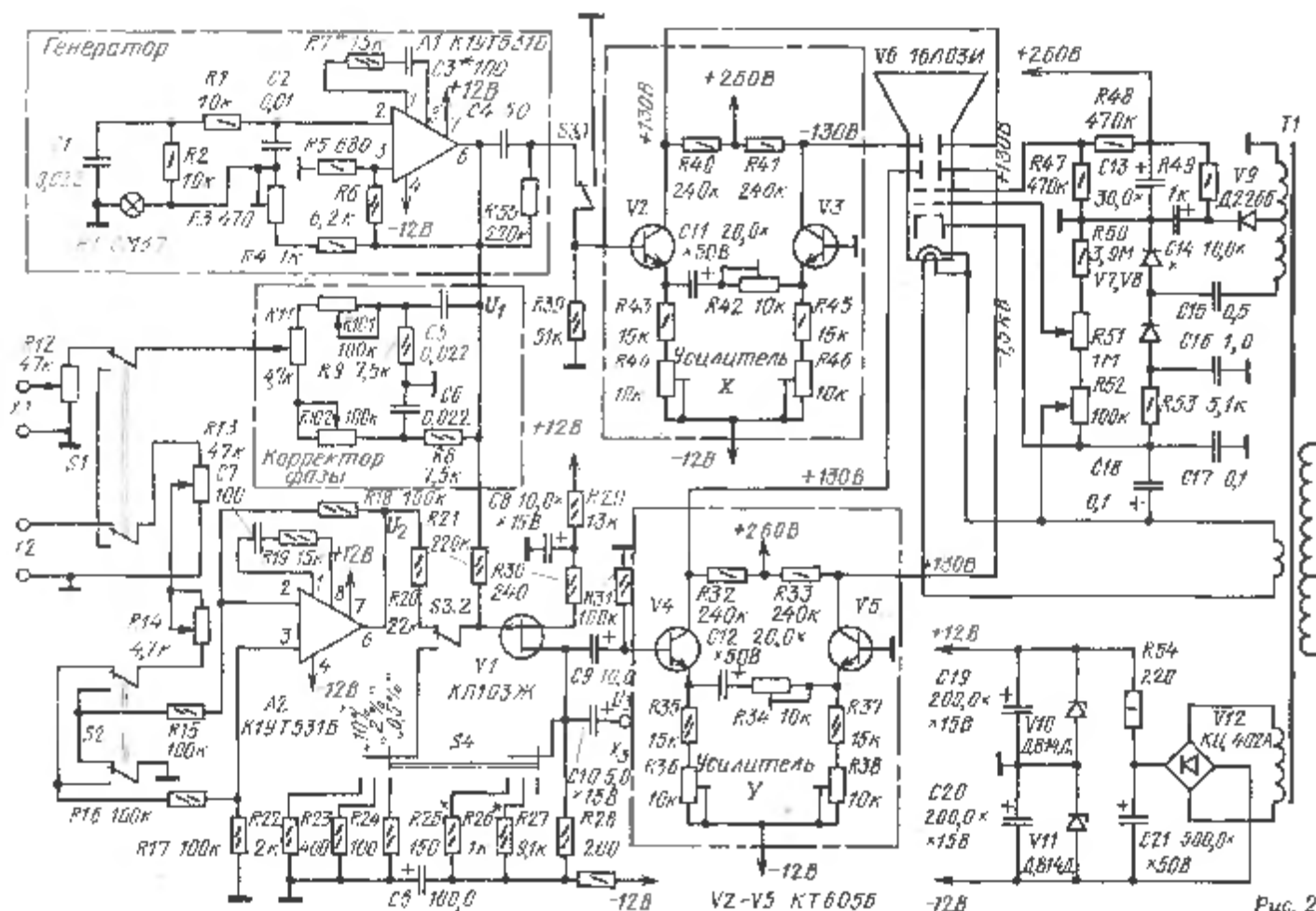


Рис. 2

элементом стабилизации выходного напряжения генератора. Коррекцию фазового сдвига, выносимого контролируемым усилителем и соединительными проводами, осуществляют перемычки $C5R9$ и $C6R8$. Пределная коррекция ($\pm 85^\circ$) достигается сдвинутым переменным резистором $R10$, а точная — переменным резистором $R11$.

Вход контролируемого усилителя подключают к зажимам (гнездам) $X1$, а его выход — к зажимам (гнездам) $X2$. Напряжение, подаваемое с корректора фазового сдвига на вход контролируемого усилителя, можно изменять в пределах от 0 до 2 В с помощью переменного резистора $R12$.

В зависимости от положения переключателя $S2$ операционный усилитель $A2$ работает либо как неинвертирующий, либо как инвертирующий усилитель.

Переменный резистор $R13$ по входной цепи операционного усилителя позволяет изменять настройку селектора в широких пределах (при выходном напряжении контролируемого усилителя от 1 до 20 В), а с помощью переменного резистора $R14$ можно точно подстроить селектор.

Переключателем $S1$ контролируе-

мый усилитель можно отключить и производить самоконтроль индикатора. При этом вход операционного усилителя подключается к выходу корректора фазового сдвига, чем обеспечивается возможность проверки работы этого усилителя и генератора.

Масштабный усилитель на полевом транзисторе $V1$ практически полностью устраняет обратную реакцию на селектор. Масштаб вертикального размера векторграммы на экране трубки изменяют с помощью переключателя $S4$. При различных его положениях в цепь стока транзистора $V1$ включены резисторы с различными сопротивлениями ($R25...R27$), вследствие чего изменяются усиление масштабного усилителя и размах напряжения помехи, поступающего с выхода усилителя Y на пластины электроннолучевой трубки. Обозначения «0,5%», «2%» и «10%» соответствуют наибольшему значению коэффициента гармоник, которое можно измерить при данном положении переключателя.

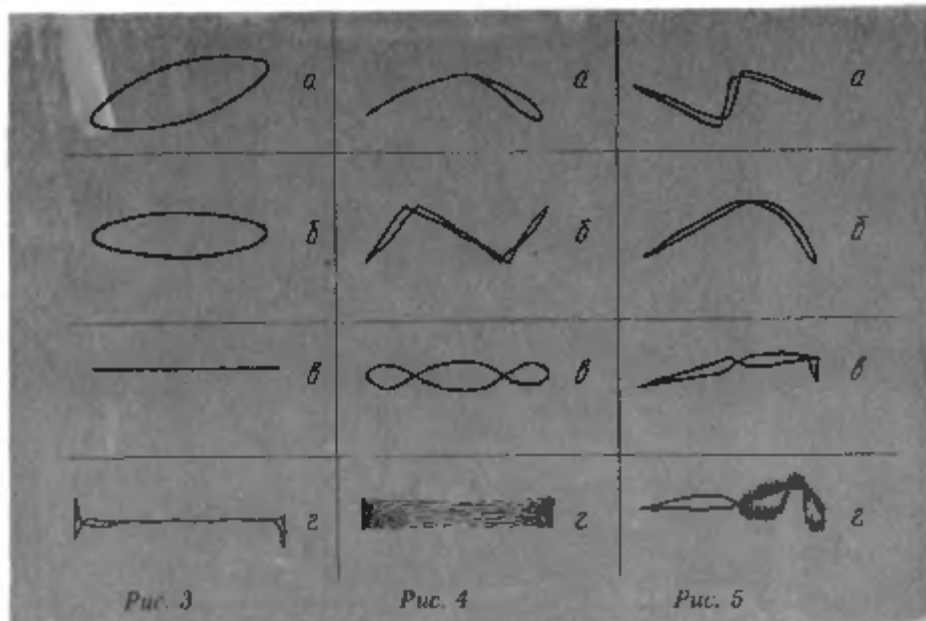
Калибровочное напряжение поступает на вход масштабного усилителя через контакты переключателя $S3.2$, при этом его контакты $S3.1$ отключают синусоидальную развертку.

Усилители вертикального и горизонтального отклонений одноклассовые, выполнены по схеме с парафазным выходом на транзисторах $V2—V5$. Подстроечные резисторы в эмиттерных цепях ($R44$, $R46$, $R48$, $R48$) служат для установок напряжений на отклоняющих пластинах электроннолучевой трубки.

Допускаемое отклонение от номинальных сопротивлений для резисторов $R20...R24$ должно быть не более $\pm 0,5\%$ (следует применять резисторы типа УЛИ или С2-13).

Настройка прибора. Горизонтальное отклонение луча на весь экран при номинальном выходном напряжении генератора устанавливают подстроечным резистором $R42$, а вертикальное — резистором $R34$ при подключенном напряжении калибровки. Если растяжка калибровочного напряжения будет разной при переключении уроней контроля, может понадобиться подобрать сопротивления резисторов $R25$, $R26$.

Генератор синусоидального напряжения легко наладить при помощи осциллографа или вольтметра переменного тока. При действующем значении выходного напряжения более 7 В воз-



никают значительные искажения синусоиды. Поэтому значение выходного напряжения генератора не должно быть более 6—6,5 В. Практически единственной причиной неустойчивости работы генератора может быть неправильный выбор параметров цепочки С8R7.

Нормальная работа фазового корректора характеризуется возможностью сжатия эллиптической векторной трассы до полного уплотнения без заметного поворота в плоскости экрана.

Измерить фазовый сдвиг и отградуировать шкалу переменного резистора R10 (обычно при среднем положении движка переменного резистора R11) можно фазометром, подключенным между выходом генератора измерительного сигнала и выходным проводом прибора. Однако оценку фазового сдвига, вносимого контролируемым усилителем, следует производить от нуля в режиме самоконтроля. Полученное при этом значение фазового сдвига, за счет влияния соединительных цепей и регулировок, может отличаться от полученного при помощи фазометра примерно на 10%.

Операционный усилитель А2 проверяют в режиме самоконтроля, устанавливая переключатель S4 в положение «0,5%». Даже едва заметные искажения или «выбуксывания» векторной трассы максимального сжатого эллипса можно устранить подбором параметров цепочки C7R19 (по рекомендации паспорта на операционный усилитель). Точная и устойчивая установка векторограммы по горизонтали экрана может быть достигнута лишь при условии, что подвижные части переменных резисторов R13 и R14 не имеют люфтов.

Первоначальное согласование век-

торного индикатора с контролируемым усилителем производят при установке переключателя S4 в положение «10%»; при необходимости корректируют положение векторограммы при положениях этого переключателя «2%» и «0,5%».

Анализ причин возникновения нелинейных искажений и помех. На рис. 3 представлены векторограммы при самоконтроле векторного индикатора: а — селектор не настроен как по значению сопоставляемых напряжений, так и по их фазовому сдвигу; б — нет настройки только по фазе; в — идеальная векторная трасса; г — значительные ограничения амплитуды выходного напряжения генератора (нужно уменьшить выходное напряжение резистором R3).

На рис. 4 показаны типичные векторограммы, полученные при физическом моделировании нелинейных искажений и помех: а — незначительное нарушение фазовой динамики в усилителе с междукаскадными RC связями в отсутствие отрицательной обратной связи; б — почти чистая амплитудная нелинейность получена при помощи встречно-параллельного включения кремниевых диодов и резистора 12 кОм между входом и выходом прибора; в — амплитудно-фазовые искажения, возникающие при таком же влиянии индуктивности; г — шумы и помехи.

На рис. 5 показаны векторограммы, наблюдаемые при контроле бестрансформаторных усилителей, работающих в режиме В: а — искажения типа «ступенька»; б — амплитудные искажения при отключенной цепи вольтодобавки в предоконечном каскаде усилителя; в — односторонние амплитудные ограничения при нарушении

функциональной симметрии плеч усилителя; г — векторограмма недоброкачественного усилителя (наблюдается значительное нарушение функциональной симметрии, одно плечо усилителя склонно к самовозбуждению).

Общие принципы оценки нелинейных искажений по векторограмме следующие: перегрузка усилителя, при которой возникает ограничение амплитуды, характеризуется односторонним или двусторонним выбросом трассы; помехи, вызванные пульсациями напряжения питания или наводок, создаваемых электромагнитными полями, размывают векторограмму на множество трасс (это часто затрудняет оценку малых значений нелинейных искажений); преимущественно амплитудная нелинейность дает серпообразные искривленные векторограммы, а если при этом нарушена фазовая динамика — наблюдается «выбуксывание» трассы и перекресты на ней.

В случае, если преобладает вторая гармоника, получается один перекрест, если преобладает третья — два и т. д.

Поскольку при векторографии нейтральная и полярная оси проходят по диагонали экрана электроннолучевой трубки, легко производится распознавание наметенных в различных плечах двухтактных или дифференциальных усилителей, хотя при контроле инвертирующих и неинвертирующих усилителей они разнонаправлены.

Полярность подключения отклоняющих пластин электронной трубки выбрана такой, что вращение ручек переменных резисторов R13 и R14 создает однозначное движение векторограммы в плоскости экрана.

Применение векторного индикатора можно рекомендовать при разработке усилителей мощности, способных качественно работать при минимальных нагрузках. При контроле предусилителей-корректоров, а также усилителей с частотными и шумовыми ограничениями можно выделить качественные потери, которым оппонируется достигаемый эффект.

Описанный векторный индикатор оказался весьма полезным при отработке усилителя НЧ с обратной связью по току (при этом частота генератора синусоидального сигнала была уменьшена до 50 Гц путем увеличения в 20 раз емкости конденсаторов C1, C2, C3 и C4 в цепи обратной связи генератора и фазового корректора).

с. Архангельской
Московской обл.

Примечание редакции. Входной операционный и масштабный усилитель рекомендуется защитить от возможных перегрузок диодами, включенными встречно-параллельно.



ПРИСТАВКА К ОСЦИЛЛОГРАФУ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА УСИЛИТЕЛЕЙ

И. АКУЛИНЧЕВ

Время, прошедшее после публикации в журнале описания векторного индикатора нелинейных искажений (см. «Радио», 1977, № 6, с. 42—44), дало мне неоднократно приходилось слышать пожелания о целесообразности постройки бесфильтрового селектора нелинейности в виде приставки к осциллографу. По-видимому, это объясняется тем, что искажения и помехи, невидимые на экране осциллографа при контроле выходного напряжения обычным способом, во сто крат заметнее на векторной сетке, поэтому радиолюбитель получает возможность более глубокого осмысления физических процессов в усилителе. Напомним, что суть принципа бесфильтровой селекции составляющих нелинейности заключается в непосредственном выделении входного сигнала усилителя НЧ из выходного.

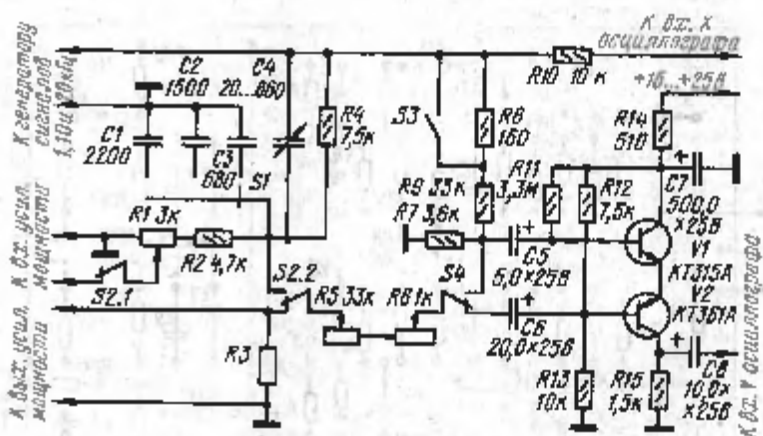
Принципиальная схема приставки показана на рисунке. Ее основой является усилительный каскад на транзисторах равной структуры $V1$ и $V2$. На базу первого из них через делитель напряжения $R7—R9$ подается одна десятая часть выходного напряжения генератора сигналов звуковой частоты. Через узел регулирования амплитуды и фазы (элементы $R1, R2, R4, C1—C4$) напряжение от генератора поступает также на вход рассматриваемого усилителя мощности, а через резистор $R10$ — на вход усилителя горизонтального отклонения луча осциллографа. На базу второго транзистора через делитель напряжения $R5, R6, R13$ подается выходное напряжение усилителя мощности. Выделенное на безындуктивном эквиваленте нагрузки $R3$ результирующий сигнал (при оптимальной компенсации — нелинейная составляющая прошедшего через усилитель мощности сигнала) снимается с резистора $R15$

в коллекторной цепи транзистора $V2$ и поступает на вход усилителя вертикального отклонения луча осциллографа.

В приставке предусмотрена возможность контроля как неинвертирующих, так и инвертирующих усилителей мощности. В первом случае переключатель

соответственно переменными резисторами $R1$ и $R5$ (грубо), $R6$ (точно), в коррекции по фазе — переключением конденсаторов $C1—C3$ переключателем $S1$ (грубо) и изменением емкости КПЕ $C4$ (точно).

Работоспособность приставки проверяют подключением ее через фазокорректирующую цепь $C1—C4, R4$ к выходу генератора сигналов звуковой частоты (переключатель $S2$ в верхнем — по схеме — положении, внутренняя развертка осциллографа выключена). При этом на экране осциллографа должно появиться изображение эллипса. Подбором емкости фазокорректирующей цепи эллипс превращают в прямую линию, в изменении сопротивлений резисторов $R5$ и $R6$ добиваются того, чтобы она стала вертикальной. Затем приставку калибруют — замыкают накоротко выключателем $S3$ резистор $R5$. В результате сопротивление верхнего (по схеме) плеча делителя напряжения $R7—R9$ уменьшается на 0,5%, и линия на экране осциллографа наклоняется. Размер проекции этой линии на горизонталь определяет размах результирующего сигнала, соответствующего коэффициенту гармоник 0,5%. Естественно, это справедливо только в том случае, если в результирующем сигнале будет преобладать



$S4$ устанавливают в положение, показанное на схеме (сигнал с выхода усилителя поступает на базу транзистора $V2$), во втором — в верхнее (по схеме) положение (сигнал поступает на базу транзистора $V1$). Этим достигается алгебраическое сложение напряжений, а выделенная таким путем нелинейная составляющая усиливается транзисторами $V1, V2$. Уравнивание напряжений по амплитуде достигается изменением входного и выходного напряжений контролируемого усилителя

какая-либо одна гармоника. В противном случае описываемая приставка позволит оценить вносимые проверяемым усилителем искажения только качественно.

В остальном методика применения приставки не отличается от описанной в упомянутой выше статье.

с. Архангельское
Московской обл.