

## УСТРОЙСТВО ДЛЯ СНЯТИЯ АМПЛИТУДНО – ЧАСТОТНОЙ И ФАЗОЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИК УСИЛИТЕЛЕЙ

© 2014 С.В. Тюлевин, М.Н. Пиганов, Г.П. Шопин, С.В. Елизаров

Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Предложено устройство контроля амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик усилителей. Рассмотрен принцип его работы. Описаны блоки, входящие в его состав. Приведены эпюры выходных напряжений. Исследовано формирование ортогональных выходных напряжений и их преобразование из прямоугольной системы координат в полярную.

Данное устройство имеет более широкие функциональные возможности, более высокую точность контроля и снятия амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик.

*Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ), фазочастотная характеристика (ФЧХ), усилитель, устройство контроля, преобразование напряжений, точность.*

### Введение

Наиболее распространённым является устройство для измерения разности фаз, реализующее компенсационный метод и содержащее установочный и измерительный фазовращатели и индикатор фиксированного фазового сдвига [1].

Недостатком этого устройства является низкая точность снятия фазочастотной характеристики и невозможность снятия амплитудно-частотной характеристики усилителей.

В данной работе поставлена задача расширить функциональные возможности устройства, а также повысить точность контроля и снятия амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик усилителей.

### Состав и принцип работы устройства

Для решения поставленной задачи было разработано устройство, структурная схема которого приведена на рис. 1.

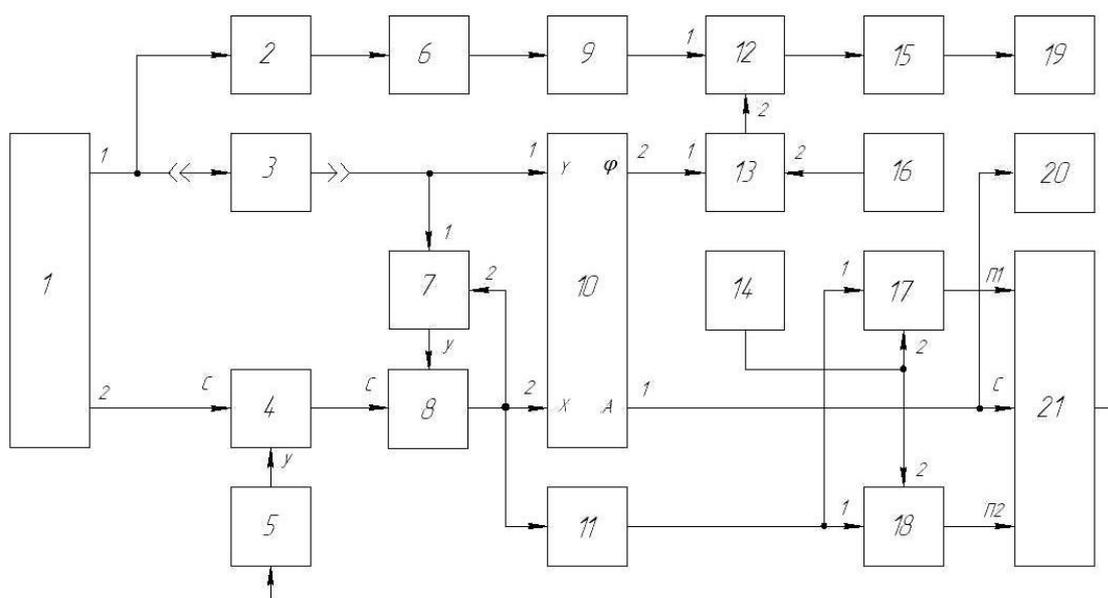


Рис. 1. Устройство для снятия амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик усилителей

На рис. 2 приведены эюры, поясняющие принцип работы устройства для контроля АЧХ и ФЧХ.

Устройство содержит блок формирования квадратурных сигналов 1, формирователь прямоугольных импульсов 2, испытуемый усилитель 3, управляемый фазовращатель 4, генератор пилообразного напряжения 5, элемент НЕ 6, устройство автоматической регулировки коэффициента передачи 7, управляемый аттенюатор 8, формирователь импульсов малой длительности 9, блок преобразования координат 10, амплитудный детектор 11, RS-триггер 12, компаратор 13, первый источник опорного напряжения 14, блок определения фазы 15, второй источник опорного напряжения 16, суммирующее устройство 17, вычитающее устройство 18, индикатор фазы 19, индикатор ам-

плитуды 20 и двухпороговый компаратор 21 [2].

В устройстве последовательно соединены формирователь прямоугольных импульсов 2, элемент НЕ 6, формирователь импульсов малой длительности 9, RS-триггер 12, блок определения фазы 15 и индикатор фазы 19, а также двухпороговый компаратор 21 и генератор пилообразного напряжения 5, выход которого связан с управляющим входом управляемого фазовращателя 4. Первый выход блока формирования квадратурных сигналов 1 подключен к входной клемме испытуемого усилителя 3 и входу формирователя прямоугольных импульсов 2. Второй выход блока формирования квадратурных сигналов 1 подключен к сигнальному входу управляемого фазовращателя 4.

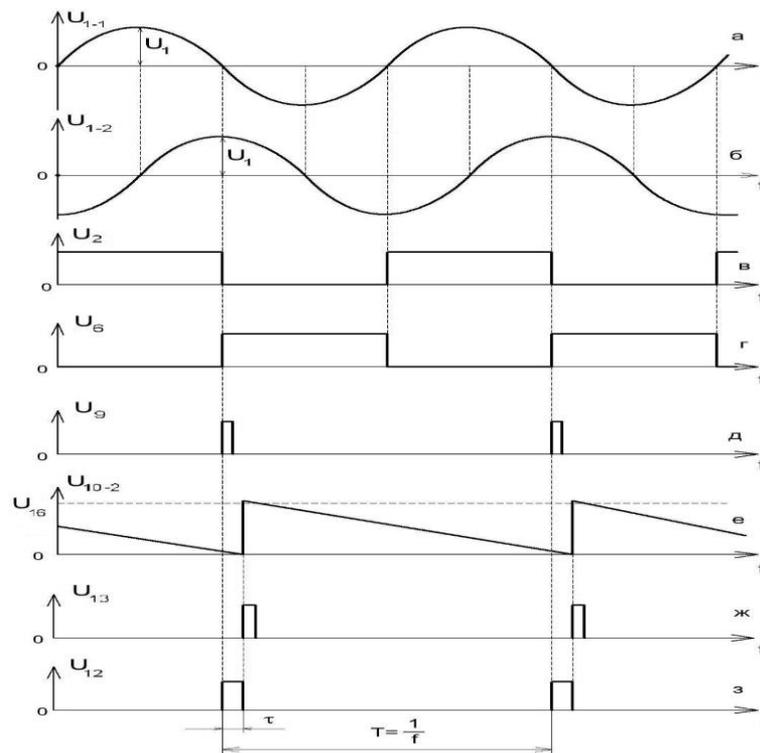


Рис. 2. Эюры, поясняющие принцип работы устройства для контроля АЧХ и ФЧХ:

а – эюры напряжения на первом выходе блока формирования квадратурных сигналов; б – эюры напряжения на втором выходе блока формирования квадратурных сигналов; в – эюры напряжения на выходе формирователя прямоугольных импульсов; г – эюры напряжения на выходе элемента НЕ; д – эюры напряжения на выходе формирователя импульсов малой длительности; е – эюры напряжения на втором (фазовом) выходе блока преобразования координат; ж – эюры напряжения на выходе компаратора; з – эюры напряжения на выходе RS – триггера

Первый вход устройства автоматической регулировки коэффициента передачи 7 подключён к выходной клемме испытуемого усилителя 3. Сигнальный вход управляемого аттенюатора 8 подключён к выходу управляемого фазовращателя 4. Управляющие вход и выход управляемого аттенюатора 8 подключены, соответственно, к выходу и ко второму входу устройства автоматической регулировки коэффициента передачи 7.

Первый и второй входы блока преобразования координат 10 также подключены к выходам соответственно испытуемого усилителя 3 и управляемого аттенюатора 8. Вход амплитудного детектора 11 также связан с выходом управляемого аттенюатора 8. Первые входы суммирующего устройства 17 и вычитающего устройства 18 объединены и подключены к выходу амплитудного детектора 11, а их вторые входы объединены и подключены к выходу первого источника опорного напряжения 14. Выходы суммирующего устройства 17 и вычитающего устройства 18 связаны соответственно с первым и вторым пороговыми входами двухпорогового компаратора 21. Сигнальный вход последнего и вход индикатора амплитуды 20 объединены и подключены к первому (амплитудному) выходу блока преобразования координат 10. Второй (фазовый) выход блока 10 подключён к первому входу компаратора 13, второй вход которого связан с выходом второго источника опорного напряжения 16, а выход – со вторым входом RS-триггера 12.

Устройство работает следующим образом. На первом и втором выходах блока формирования квадратурных сигналов 1 формируются гармонические сигналы одинаковой амплитуды напряжения  $U_1$  и одинаковой частоты  $f$ , но сдвинутые по фазе друг относительно друга на  $90^\circ$ . Синусоидальный сигнал ( $U_1 \sin \omega t$ , где  $\omega = 2\pi f$ ) с первого выхода блока 1 ( $U_{1-1}$ , рис. 2, а) поступает на вход испытуемого усилителя 3. Косинусоидальный сигнал со второго выхода блока 1 ( $U_{1-2}$ , рис. 2, б) поступает на сигнальный вход управляемого фазовращателя 4.

С изменением частоты блока формирования квадратурных сигналов 1, из-за неравномерности амплитудно-частотных характеристик испытуемого усилителя 3 и управля-

емого фазовращателя 4, изменяются амплитуды их выходных напряжений, причём неодинаково. Для исключения этого, выходное напряжение управляемого фазовращателя 4 поступает на сигнальный вход управляемого аттенюатора 8, а выходные напряжения испытуемого усилителя 3 и управляемого аттенюатора 8 подают, соответственно, на первый и второй входы устройства автоматической регулировки коэффициента передачи 7. Последнее сравнивает амплитуды этих выходных напряжений и формирует на своём выходе постоянное напряжение, которое поступает на управляющий вход аттенюатора 8 и поддерживает амплитуду выходного напряжения управляемого аттенюатора 8 ( $U_8$ ) равной амплитуде выходного напряжения испытуемого усилителя 3

( $U_8 = U_3$ ) независимо от частоты.

С изменением частоты блока формирования квадратурных сигналов 1 меняется также фазовый сдвиг выходного напряжения испытуемого усилителя 3 (относительно его входного напряжения). При этом нарушается ортогональность выходных напряжений испытуемого усилителя 3 и управляемого аттенюатора 8. Необходимое изменение фазы напряжения на втором выходе блока формирования квадратурных сигналов 1, равное фазовому сдвигу  $\varphi$  выходного напряжения испытуемого усилителя 3 на частоте  $f$  и восстанавливающее указанную ортогональность, осуществляется управляемым фазовращателем 4. Для этого генератор пилообразного напряжения 5 (на основе последовательно соединённых генератора прямоугольных импульсов, элемента и счетчика, а также ЦАП и компаратора) формирует пилообразный сигнал. Он поступает на управляющий вход фазовращателя 4, увеличивая фазовый сдвиг его выходного напряжения до тех пор, пока напряжения на выходе испытуемого усилителя 3 и управляемого аттенюатора 8 не станут ортогональными. Эти напряжения одинаковой амплитуды ( $U = U_8 = U_3$ ) поступают соответственно на первый и второй входы блока преобразования координат 10, который осуществляет их перевод из прямоугольной системы координат в полярную. На первом (амплитудном) выходе блока 10 формируется постоянное напряжение

$$U_A = \sqrt{U^2 \sin^2(\omega t + \varphi) + U^2 \cos^2(\omega t + \varphi)} = U,$$

которое несёт информацию об измеряемой амплитуде выходного сигнала усилителя 3. Оно поступает на сигнальный вход двухпорогового компаратора 21 и вход индикатора амплитуды 20.

Одновременно с этим амплитудный детектор 11 преобразует амплитуду выходного переменного напряжения аттенюатора 8 в постоянное напряжение, равное  $U$ , которое поступает на первые входы суммирующего устройства 17 и вычитающего устройства 18. На вторые входы этих устройств поступает напряжение небольшой величины с выхода первого источника опорного напряжения 14.

На выходах суммирующего устройства 17 и вычитающего устройства 18 образуются постоянные напряжения, задающие соответственно верхнюю и нижнюю границы области допустимых значений напряжения, формирующегося на первом (амплитудном) выходе блока преобразования координат 10 в момент восстановления ортогональности напряжений на его входах. Необходимость введения такой зоны допуска связана с тем, что напряжение на первом (амплитудном) выходе блока 10 в указанный момент времени может приближаться к искомому  $U$  по уровню как сверху, так и снизу.

Выходные напряжения суммирующего устройства 17 и вычитающего устройства 18 поступают соответственно на первый и второй пороговые входы двухпорогового компаратора 21.

Если напряжение на первом (амплитудном) выходе блока преобразования координат 10 лежит в заданной зоне допуска (когда формирование ортогональных напряжений на его входах завершено), то на выходе двухпорогового компаратора 21 формируется логическая «1», в противном случае – логический «0». Напряжение с выхода двухпорогового компаратора 21 поступает на вход генератора пилообразного напряжения 5. При наличии логического «0» на входе генератора 5 рост пилообразного напряжения на его выходе продолжается, а при наличии логической «1» – прекращается. В последнем случае изменение разности фаз, вносимое управляемым фазовращателем 4, также прекращается.

Синусоидальный сигнал  $U_1 \sin \omega t$  с первого выхода блока формирования квадратурных сигналов 1 ( $U_{1-1}$ , рис. 2, а) поступает также на вход формирователя прямоугольных импульсов 2, с выхода которого ( $U_2$ , рис. 2, в) на вход элемента НЕ 6 поступает сигнал прямоугольной формы. На выходе элемента НЕ 6 образуется его инвертированный сигнал ( $U_6$ , рис. 2, г). Последний поступает на вход формирователя импульсов малой длительности 9, на выходе которого по фронту входного сигнала формируется прямоугольный импульс малой длительности ( $U_9$ , рис. 2, д). Этот импульс поступает на первый вход ( $S$  – вход)  $RS$  – триггера 12 и устанавливает его в единичное состояние ( $U_{12}$ , рис. 2, з).

Одновременно с получением напряжения на первом (амплитудном) выходе блока преобразования координат 10 (когда формирование ортогональных напряжений на его входах завершено), на его втором (фазовом) выходе формируется спадающее пилообразное напряжение ( $U_{10-2}$ , рис. 2, е). Компаратор 13 сравнивает это напряжение с выходным напряжением второго источника опорного напряжения 16. Последнее выбирается немного меньше максимального напряжения на втором (фазовом) выходе блока преобразования координат 10, соответствующего максимуму спадающего пилообразного сигнала в точке разрыва ( $U_{16}$ , рис. 2, е). На время превышения первым входным напряжением компаратора 13 уровня второго, на его выходе формируется прямоугольный импульс ( $U_{13}$ , рис. 2, ж). Этот импульс поступает на второй вход ( $R$  – вход)  $RS$  – триггера 12 и устанавливает его в нулевое состояние ( $U_{12}$ , рис. 2, з).

При помощи управляемого фазовращателя 4 обеспечивается необходимое изменение разности фаз его входного и выходного напряжений, равное фазовому сдвигу испытуемого усилителя 3. Это эквивалентно восстановлению ортогональности выходных напряжений испытуемого усилителя 3 и управляемого аттенюатора 8. Тем самым создаётся задержка  $\tau$  формирования спадающего пилообразного напряжения на втором (фазовом) выходе блока преобразования координат 10.

ординат  $10$ . Таким образом, на выходе  $RS$ -импульс ( $U_{12}$ , рис. 2, 3), в котором соотношение  $\tau / T$  несёт информацию о фазовом сдвиге испытуемого усилителя 3. Импульсный сигнал с выхода  $RS$ -триггера 12 поступает на вход блока определения фазы 15. Блок 15 формирует постоянное напряжение, пропорциональное измеряемому фазовому сдвигу усилителя ( $\varphi = 2\pi\tau/T$ ), которое снимается с помощью индикатора фазы 19.

В дальнейшем, увеличивая частоту  $f$  блока формирования квадратурных сигналов 1 и сохраняя рост выходного напряжения генератора пилообразного напряжения 5, находят соответствующие значения амплитуды выходного сигнала  $U_A$  и фазового сдвига  $\varphi$  испытуемого усилителя 3 и строят его амплитудно-частотную и фазочастотную характеристики.

Преимуществами устройства, по сравнению с известными, являются расширенные

триггера 12 формируется прямоугольный функциональные возможности устройства и повышенная точность снятия амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик усилителей, что достигается путем выравнивания и формирования ортогональными выходных напряжений испытуемого усилителя и управляемого аттенюатора в широком диапазоне частот с последующим преобразованием их из прямоугольной системы координат в полярную. Это делает процесс снятия амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик усилителя не зависимым от значения его фазового сдвига.

### Выводы

Предложено новое устройство для контроля амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик усилителей. Приведены его состав, назначение блоков, указаны связи между ними.

### Библиографический список

1. Кукуш, В.Д. Электрорадиоизделия: учеб. пособие для вузов / Москва: Радио и связь, 1985. 368 с.

2. Пиганов М.Н., Шопин Г.П., Тюлевин С.В., Елизаров С.В. Устройство для снятия амплитудно-частотной и фазочастотной ха-

рактеристики усилителей Пат. 2476893. Российская Федерация МПК G01R27/28. /; заявитель и патентообладатель: Самарск. государств. Аэрокосм. ун-т.-№2011128879/28; заявл. 12.07.2011, опубл. 27.02.2013. Бюл. №6.4 с.

### Информация об авторах

**Тюлевин Сергей Викторович**, кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и технологии электронных систем и устройств, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [kipres@ssau.ru](mailto:kipres@ssau.ru). Область научных интересов: контроль, качество и надёжность космической аппаратуры.

**Пиганов Михаил Николаевич**, доктор технических наук, профессор кафедры конструирования и технологии электронных систем и устройств, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [piganov@ssau.ru](mailto:piganov@ssau.ru). Область научных интересов: контроль, управление качеством радиоэлектронной аппаратуры.

**Шопин Геннадий Павлович**, кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и технологии электронных систем и устройств, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [kipres@ssau.ru](mailto:kipres@ssau.ru). Область научных интересов: методы и устройства контроля радиоэлектронной аппаратуры.

**Елизаров Сергей Викторович**, аспирант кафедры конструирования и технологии электронных систем и устройств, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [kipres@ssau.ru](mailto:kipres@ssau.ru). Область научных интересов: программное обеспечение прогнозирования надёжности электронных узлов.

## DEVICE FOR REMOVING PHASE FREQUENCY CHARACTERISTICS AMPLIFIERS

© 2014 S.V. Tyulevin, M.N. Piganov, G.P. Chopin, S.V. Elizarov

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

The article discusses a device for removing the phase response of amplifiers. Describes the principles of its operation are given diagrams voltage outputs blocks that make up the device. The processes of change in the phase shift of the output voltage of the amplifier, signal conversion, and coordinates. Formation of orthogonal initial tension and their conversion from rectangular coordinate system in the polar is probed. The advantage of the device is represented by a high precision removal phase response of the amplifier.

Amplifier, phase-frequency characteristic (PFC), device removal PFC, stress distribution, the phase shift, structure of the device, signal generation, precision removal of PFC.

### References

1. Kukush V.D. Electroradio products: school book for University / Moscow: Radio and communication, 1985. P. 368.
2. Piganov M.N., Chopin G.P., Tyulevin S.V., Elizarov S.V. Ustroystvo dlya snyatiya amplitudno-chastotnoy harakteristiki usiliteley [Device to capture amplitude and phase response of amplifiers]. Pat. 2476893. RF IPC G01R27/28, applicant and patent holder: Samara. States. Aerospace. Univ. № 2011128879/28; (appl. 12.07.2011, publ. 27.02.2013. List № 6. p.4.)

### About the authors

**Tyulevin Sergey Vitorovich**, Candidate of Sciences (Engineering), assistant professor of the Department of Design and Technology of Electronic Systems and Devices, E-mail: [kipres@ssau.ru](mailto:kipres@ssau.ru). Area of research: control, quality and reliability of spacecraft.

**Piganov Mikhail Nikolaevich**, Doctor of Sciences (Engineering), Professor of the Department of Design and Technology of Electronic Systems and Devices, E-mail: [pi-ganov@ssau.ru](mailto:pi-ganov@ssau.ru). Area of research: control, quality control of electronic equipment.

**Shopin Gennady Pavlovich**, Candidate of Sciences (Engineering), associate professor of the Department of Design and Technology of Electronic Systems and Devices, E-mail: [kipres@ssau.ru](mailto:kipres@ssau.ru). Area of research: methods and control device of electronic equipment.

**Elizarov Sergei Nikolaevich**, post-graduate student, Department of Design and Technology of Electronic Systems and Devices, E-mail: [kipres@ssau.ru](mailto:kipres@ssau.ru). Area of research: software reliability prediction of electronic components.