

УДК 621.382

УСТРОЙСТВО ДЛЯ СНЯТИЯ ФАЗО-ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСИЛИТЕЛЕЙ

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

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

Поступила в редакцию 17.03.2014

В статье рассмотрено устройство для снятия фазочастотной характеристики усилителей. Описаны принципы его работы, приведены эпюры напряжения на выходах блоков, входящих в состав устройства. Рассмотрены процессы изменения фазового сдвига выходного напряжения усилителя, преобразования сигналов и координат. Исследовано формирование ортогональных исходных напряжений и их преобразование из прямоугольной системы координат в полярную. Достоинством представленного устройства является более высокая точность снятия фазочастотной характеристики усилителя.

Ключевые слова: усилитель, фазочастотная характеристика, устройство, эпюры напряжений, фазовый сдвиг

В усилителях, работающих в широком диапазоне частот, при изменении частоты наблюдается изменение выходного напряжения и фазовых сдвигов (разности фаз) между входными $U_{вх}$ и выходными $U_{вых}$ напряжениями. Это связано с комплексным характером коэффициента усиления тока в усилительных каскадах (транзисторах) и присутствием в схемах RC-фильтров, образованных сопротивлениями схемы совместно с внутренними и внешними по отношению к транзистору паразитными емкостями, а также разделительными конденсаторами. Вследствие этого коэффициент усиления по напряжению является комплексным и зависит от частоты f [1]:

$$K(f) = |K(f)| \exp[j\varphi(f)],$$

где $|K(f)|$ – модуль коэффициента усиления на частоте f ; $\varphi(f)$ – фазовый сдвиг между $U_{вх}$ и $U_{вых}$ на частоте f . Зависимость $\varphi(f)$ называется фазочастотной характеристикой (ФЧХ) усилителя.

Широко известны устройства для измерения разности фаз, реализующие компенсационный метод и содержащие установочный и

измерительный фазовращатели и индикатор фиксированного фазового сдвига [2]. Недостатком этого устройства является низкая точность снятия ФЧХ усилителей.

Цель работы: создание устройства для повышения точности снятия ФЧХ усилителей.

Состав и принцип работы устройства. Для повышения точности снятия ФЧХ усилителей было разработано устройство, блок-схема которого приведена на рис. 1. Оно содержит блок формирования квадратурных сигналов 1, формирователь прямоугольных импульсов 2, испытуемый усилитель 3, управляемый фазовращатель 4, генератор пилообразного напряжения 5, элемент НЕ 6, управляемый аттенуатор 7, устройство автоматической регулировки коэффициента передачи 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 и двухпороговый компаратор 20.

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 управляемый фазовращатель 4 и устройство автоматической регулировки коэффициента передачи 8, двухпороговый компаратор 20 и генератор пилообразного напряжения 5, выход которого связан с управляющим входом управляемого

Пиганов Михаил Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры конструирования и технологии электронных систем и устройств. E-mail: piganov@ssau.ru

Шопин Геннадий Павлович, кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и технологии электронных систем и устройств. E-mail: kipres@ssau.ru

Тюлевин Сергей Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и технологии электронных систем и устройств

Кочкина Алёна Викторовна, аспирантка

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. Сигнальный вход управляемого аттенюатора 7 подключен к выходной клемме испытуемого усилителя 3, а его управляющий вход – к выходу устройства автоматической регулировки коэффициента передачи 8, второй вход которого и первый вход блока преобразования координат 10 объединены и подключены к выходу управляемого аттенюатора 7. Второй вход блока преобразования координат 10 и вход амплитудного детектора 11 объединены и также подключены к выходу

управляемого фазовращателя 4. 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 20. Сигнальный вход последнего подключен к первому (амплитудному) выходу блока преобразования координат 10, второй (фазовый) выход которого подключен к первому входу компаратора 13, второй вход которого связан с выходом второго источника опорного напряжения 16, а выход – со вторым входом RS-триггера 12.

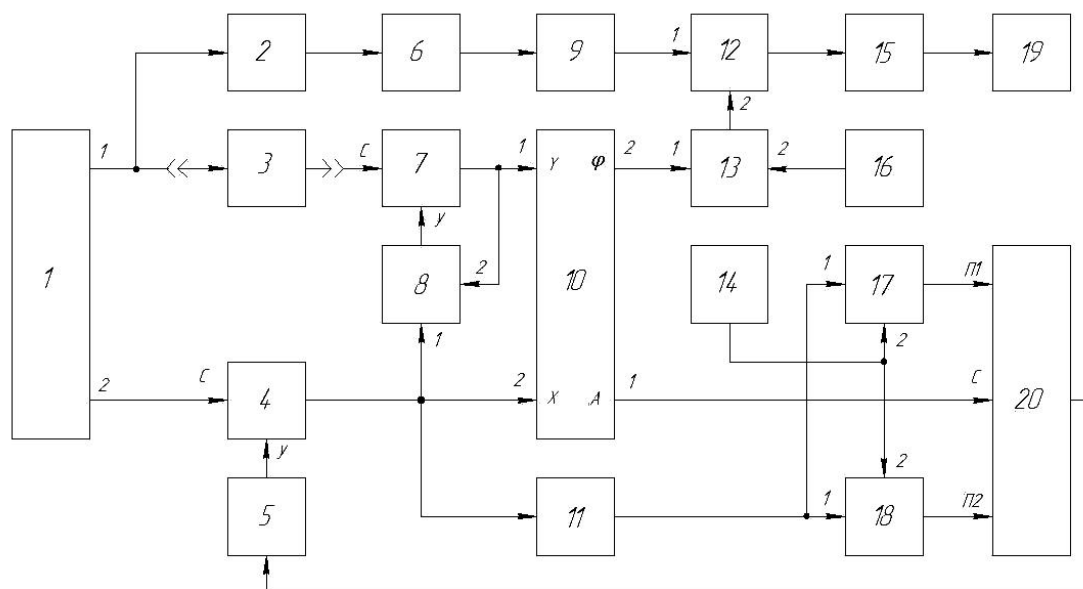


Рис. 1. Устройство для снятия ФЧХ усилителей

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 управляемый фазовращатель 4 и устройство автоматической регулировки коэффициента передачи 8, двухпороговый компаратор 20 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. Сигнальный вход управляемого аттенюатора 7 подключен к

выходной клемме испытуемого усилителя 3, а его управляющий вход — к выходу устройства автоматической регулировки коэффициента передачи 8, второй вход которого и первый вход блока преобразования координат 10 объединены и подключены к выходу управляемого аттенюатора 7. Второй вход блока преобразования координат 10 и вход амплитудного детектора 11 объединены и также подключены к выходу управляемого фазовращателя 4. 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 20. Сигнальный вход последнего подключен к первому (амплитудному) выходу блока преобразования координат 10, второй (фазовый) выход которого подключен 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° . Синусоидальный сигнал ($U_1 \sin \omega t$, где $\omega = 2\pi f$) с первого выхода блока 1 (U_{1-1} , рис. 2а) поступает на вход испытуемого усилителя 3. Косинусоидальный сигнал ($-U_1 \cos \omega t = U_1 \sin(\omega t - 90^\circ)$) со второго выхода блока 1 (U_{1-2} , рис. 2б) 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 управляемого фазовращателя 4 изменяются амплитуды их выходных напряжений, причем неодинаково. Для исключения этого выходное напряжение испытуемого усилителя 3 поступает на сигнальный вход управляемого аттенюатора 7, а выходные напряжения управляемого фазовращателя 4 и управляемого аттенюатора 7 подают соответственно на первый и второй входы устройства автоматической регулировки коэффициента передачи 8. Последнее сравнивает амплитуды этих выходных напряжений и формирует на своем выходе постоянное напряжение. Оно поступает на управляющий вход аттенюатора 7 и поддерживает амплитуду выходного напряжения управляемого аттенюатора 7 (U_7), равной амплитуде выходного напряжения управляемого фазовращателя 4 ($U_7 = U_4$) 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 управляемого аттенюатора 7 и управляемого фазовращателя 4. Необходимое изменение фазы напряжения на втором выходе блока формирования квадратурных сигналов 1, равное фазовому сдвигу φ 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 соединенных генератора прямоугольных

импульсов, элемента И 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 управляемого аттенюатора 7 и управляемого фазовращателя 4 не станут ортогональными. Эти напряжения одинаковой амплитуды ($U = U_7 = U_4$) поступают соответственно на первый и второй входы блока преобразования координат 10, который осуществляет их перевод из прямоугольной системы координат в полярную.

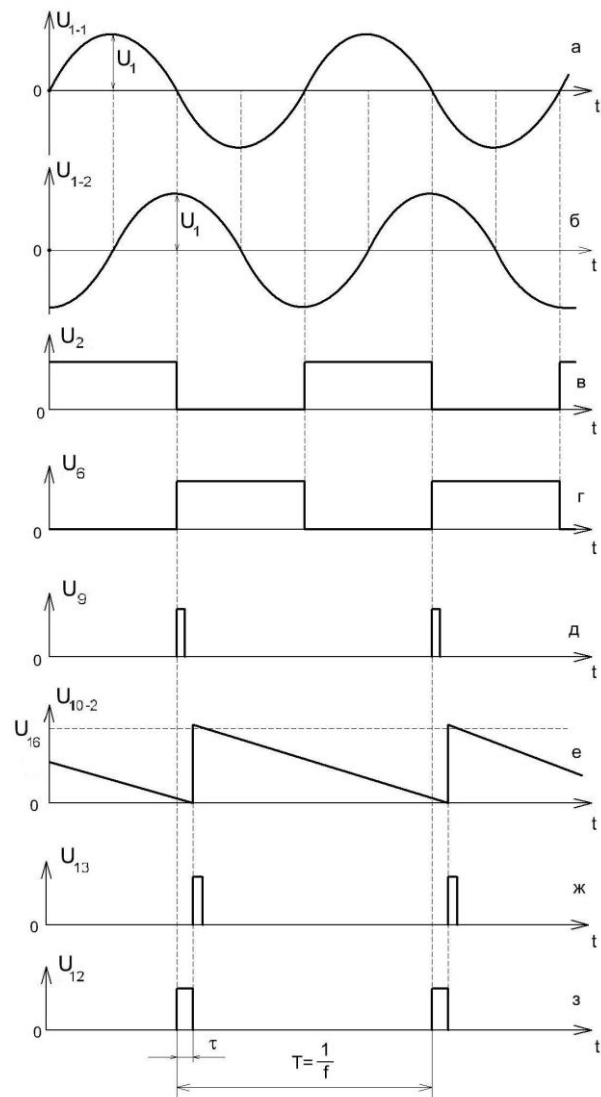


Рис. 2. Эпюры сигналов

На первом (амплитудном) выходе блока 10 формируется постоянное напряжение

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

поступающее на сигнальный вход двухпорогового компаратора 20. Одновременно с этим амплитудный детектор 11 преобразует амплитуду

выходного переменного напряжения управляемого фазовращателя 4 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 связано 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 20. 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 20 формируется логическая «1», в противном случае – логический «0». Напряжение с выхода двухпорогового компаратора 20 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. 2а) поступает также на вход формирователя прямоугольных импульсов 2, с выхода которого (U_2 , рис. 2в) на вход элемента НЕ 6 поступает сигнал прямоугольной формы. На выходе элемента НЕ 6 образуется его инвертированный сигнал (U_6 , рис. 2г). Последний поступает на вход формирователя импульсов малой длительности 9, на выходе которого по фронту входного сигнала формируется прямоугольный импульс малой длительности (U_9 , рис. 2д). Этот импульс поступает на первый вход (S – вход) RS-триггера 12 и устанавливает его в единичное состояние (U_{12} , рис. 2з).

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. 2е). 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. 2е). На время превышения первым входным напряжением компаратора 13 уровня второго на его выходе формируется прямоугольный импульс (U_{13} , рис. 2ж). Этот импульс поступает на второй вход (R – вход) RS-триггера 12 и устанавливает его в нулевое состояние (U_{12} , рис. 2з).

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 управляемого фазовращателя 4 и управляемого аттенюатора 7. Тем самым создается задержка τ формирования спадающего пилообразного напряжения на втором (фазовом) выходе блока преобразования координат 10. Таким образом, на выходе RS-триггера 12 формируется прямоугольный импульс (U_{12} , рис. 2з), в котором соотношение τ/T несет 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 соответствующий фазовый сдвиг φ испытуемого усилителя 3 и строят его ФЧХ.

Выводы: разработано новое устройство для снятия ФЧХ усилителей. Приведены его состав, назначение блоков, связи между ними. Преимуществом устройства по сравнению с известными является повышенная точность снятия ФЧХ усилителя, что достигается путем выравнивания и формирования ортогональными выходных напряжений управляемого фазовращателя и управляемого аттенюатора в широком диапазоне частот с последующим преобразованием их из прямоугольной системы координат в полярную. Это делает процесс снятия ФЧХ усилителя независимым от значения его фазового сдвига.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Ямтурин, Н.П. Электроника: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Н.П. Ямтурин, А.В. Баранова, В.И. Обухов. – М.: Издательский центр «Академия», 2011. 240 с.
2. Кукуш, В.Д. Электрорадиоизмерения: учеб. пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1985. 368 с.
3. Пиганов, М.Н. Пат. 2480775. Российская Федерация, МПК G1R27 /28. Устройство для снятия фазо-частотной характеристики усилителей / М.Н. Пиганов, Г.П. Шопин, С.В. Тюлекин, А.В. Токарева; заявитель и патентообладатель: Самарский государственный аэрокосмический университет. – №2011128883/28; заявл. 12.07.2011, опублик. 27.04.2013. Бюл. №12.

THE DEVICE FOR REMOVING THE PHASE-FREQUENCY CHARACTERISTICS OF AMPLIFIERS

© 2014 M.N. Piganov, G.P. Shopin, S.V. Tyulevin, A.V. Kochkina

Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov
(National Research University)

In article the device for removing the phase-frequency characteristic of amplifiers is considered. The principles of its work are described, provided voltage diagrams on exits of the blocks which are a part of the device. Processes of change of output voltage phase shift of the amplifier, transformation of signals and coordinates are considered. Formation of orthogonal initial voltages and their transformation from rectangular system of coordinates in the polar one is investigated. The advantage of the presented device is higher precision of removing the phase-frequency characteristic of the amplifier.

Key words: *amplifier, phase-frequency characteristic, device, voltage diagrams, phase shift*

Mikhail Piganov, Doctor of Technical Sciences, Professor at the Construction and Technology of Electronic Systems and Devices Department. E-mail: piganov@ssau.ru

Gennadiy Shopin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Construction and Technology of Electronic Systems and Devices Department. E-mail: kipres@ssau.ru

Sergey Tyulevin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Construction and Technology of Electronic Systems and Devices Department

Alyona Kochkina, Post-graduate Student