

Система автоматической регулировки усиления цифровых систем передачи

АРУ

Напряжение (мощность) сигналов, поступающих на вход приёмника, как правило значительно меняется во времени:

- из-за различия передаваемой мощности передатчиков и расстояний их от места приёма;
- замираний сигналов при распространении;
- резкого изменения расстояний и условий приёма между передатчиком и приёмником, установленными на движущихся объектах (самолётах, автомобилях и т. д.), и других причин.

Это приводит к недопустимым колебаниям или искажениям сигналов в приёмнике.

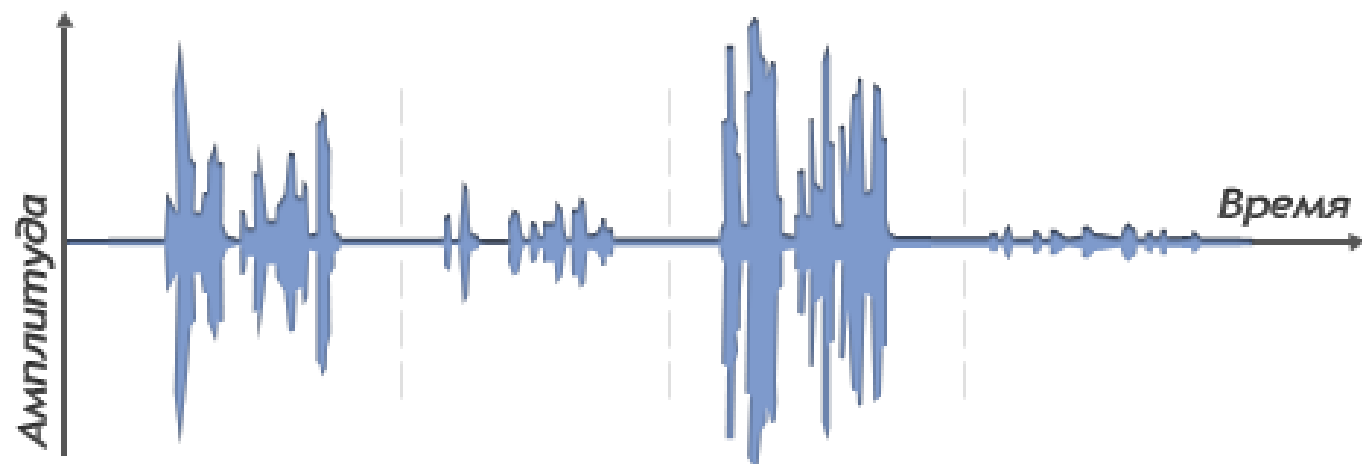
Автоматическая регулировка усиления, АРУ — процесс, при котором выходной сигнал какого - либо устройства автоматически поддерживается постоянным по некоторому параметру (по амплитуде или мощности), независимо от амплитуды (мощности) входного сигнала.

АРУ поддерживает уровень выходного сигнала приемного устройства вблизи некоторого номинального значения, что исключает перегрузки выходных каскадов приёмников при больших входных сигналах и обеспечивает компенсацию затухания при малых.

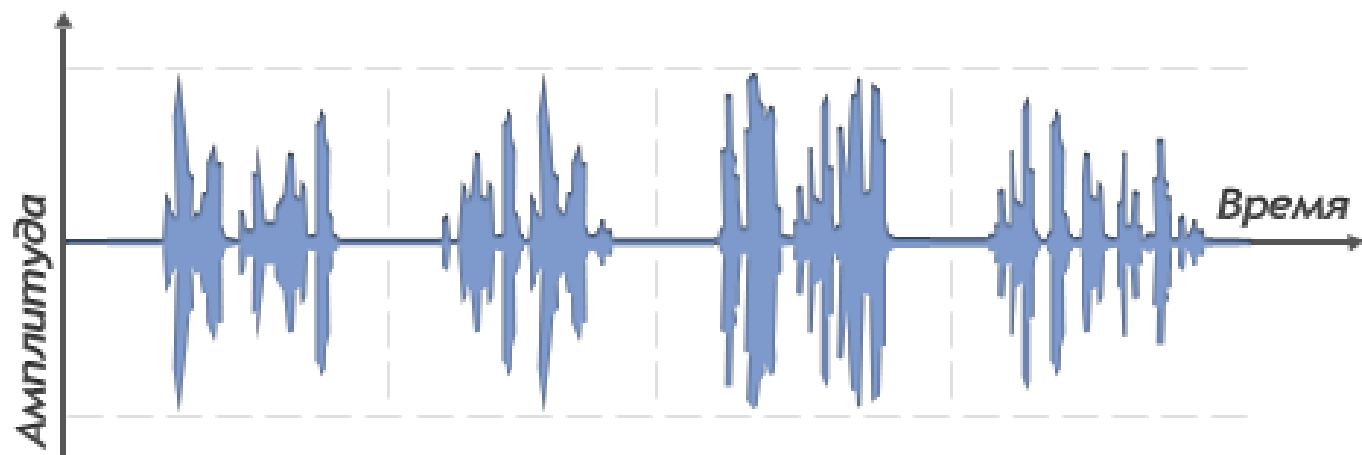
Автоматическое выполнение этой функции необходимо потому, что изменение уровня входного сигнала могут происходить хаотически и достаточно быстро.

Ручная регулировка используется для установки выходного сигнала, который должен поддерживаться системой АРУ.

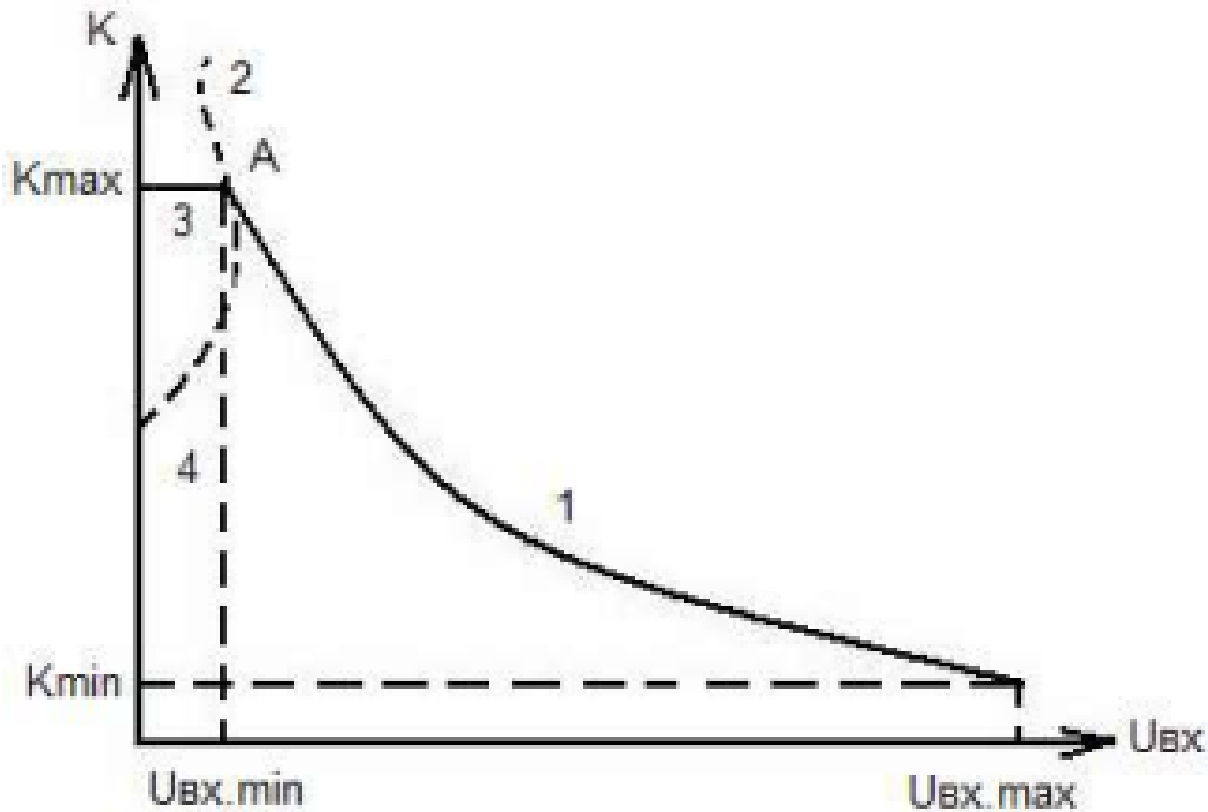
1. АРУ выключено



2. АРУ включено



Задача АРУ состоит в изменении коэффициента усиления радиотракта в зависимости от уровня входного сигнала



Сигналы, напряжение которых на выходе усилителя приемника менее $U_{вх.min}$, не могут быть нормально приняты, так как будут искажены шумами. Поэтому увеличение усиления левее точки «А» (участок 2) лишено смысла и система АРУ обычно отключается. Коэффициент усиления левее точки «А» в этом случае будут оставаться постоянным (участок 3). Другими словами, включение АРУ «задерживается» до достижения входным напряжением значения $U_{вх.min}$. Такая система называется «задержанной АРУ».

Когда сигнал на входе приемника отсутствует, коэффициент усиления максимален и поэтому максимально усиливаются собственные шумы приёмника и внешние помехи. В связи с этим целесообразно коэффициент усиления, левее точки «А» понижать (участок 4). Такая АРУ называется «бесшумной».

В процессе приема амплитуда сигнала на входе приемника может изменяться по двум причинам:

- 1) при приеме амплитудно-модулированных сигналов;
- 2) из-за замираний в канале прохождения.

Цепь АРУ должна устранять влияние только второго фактора, но не должна реагировать на полезные изменения амплитуды АМ сигнала. Это обеспечивается путем правильного выбора постоянной времени фильтра АРУ. В качестве фильтра обычно используются простые RC цепи.

В общем случае цепь АРУ должна содержать следующие элементы:

- каскады УРЧ или УПЧ в радиотракте приемника, приспособленные для регулировки усиления;
- детектор для получения регулирующего напряжения;
- усилитель регулирующего напряжения;
- цепь, обеспечивающую пороговое напряжение для получения АРУ с задержкой;
- фильтр нижних частот для подавления переменных составляющих модулированного напряжения.

Классификация

1. По принципу действия системы АРУ могут быть:

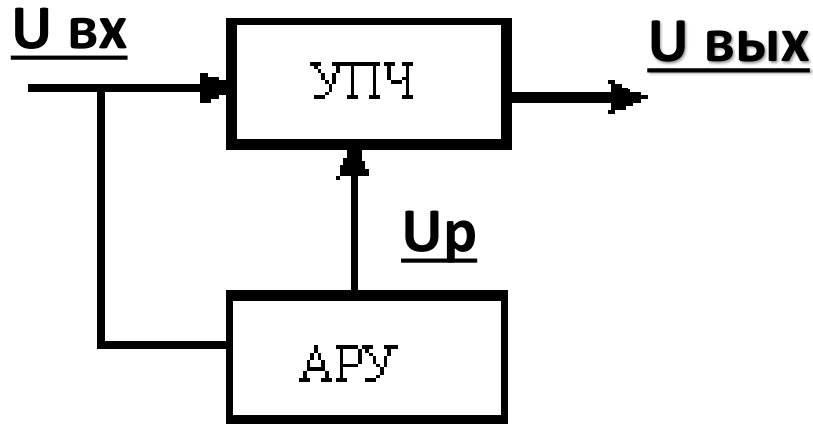
- а. с обратной связью(обратные);
- б. без обратной связи (прямые);
- с. комбинированные.

2. По принципу формирования регулирующего напряжения АРУ подразделяются на:

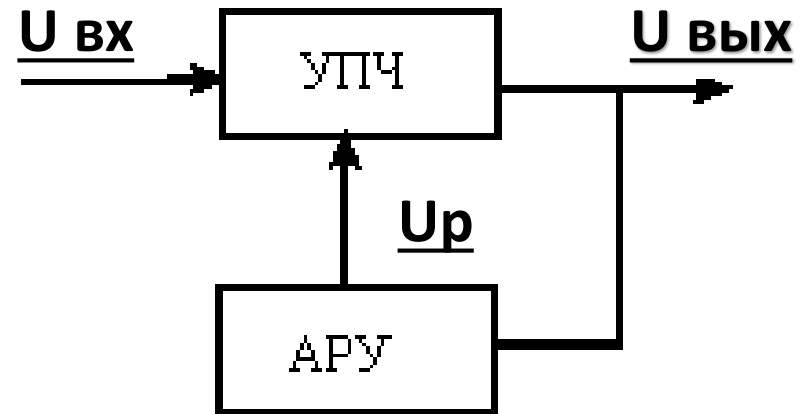
- а. аналоговые (непрерывные);
- б. цифровые (дискретные).

Прямые АРУ – без обратной связи, в котором регулирующее напряжение поступает со входа регулируемого каскада.

Обратное АРУ – это АРУ с обратной связью, в которой регулирующее напряжение подается с выхода регулируемого каскада.



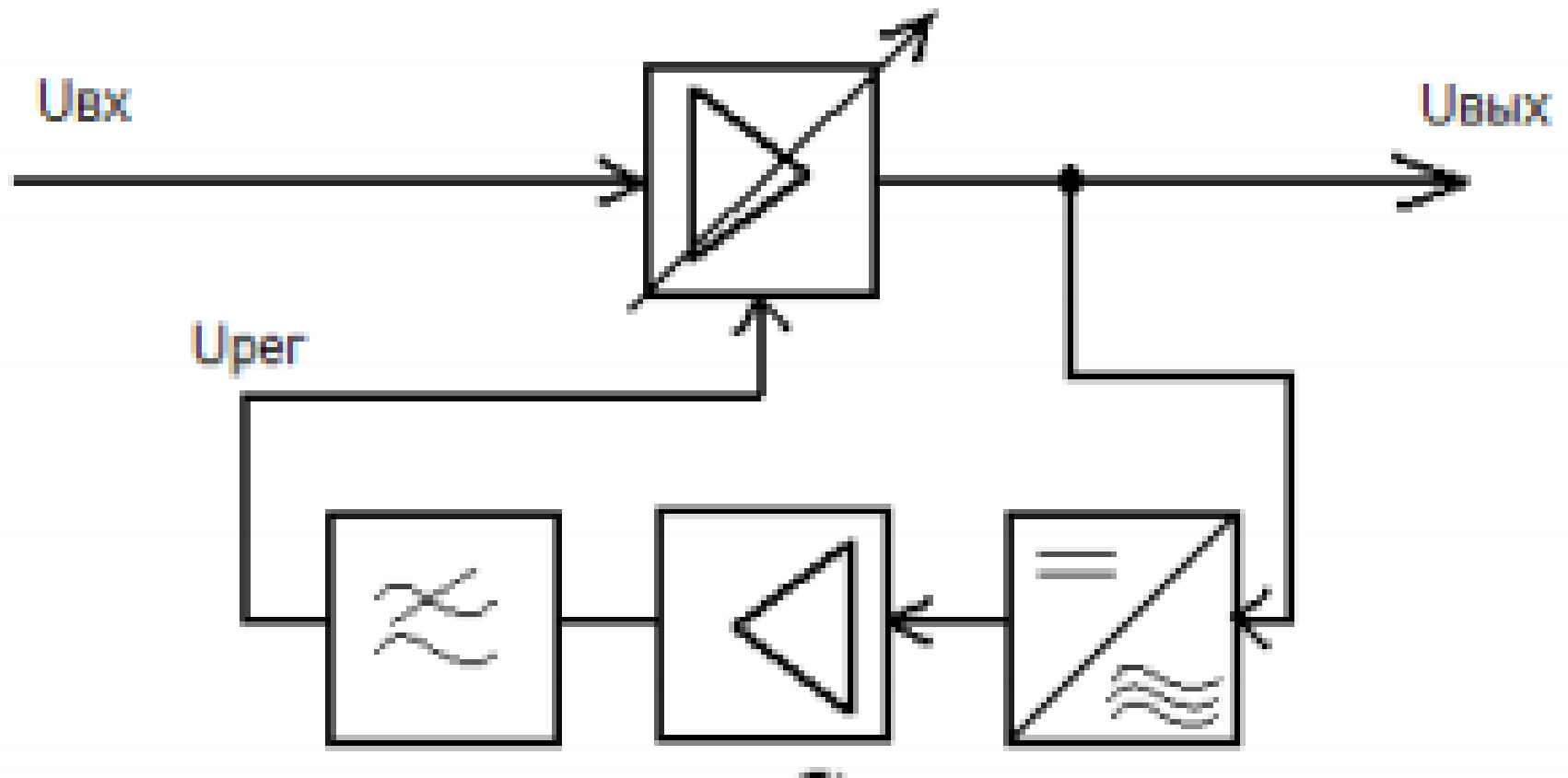
Прямая АРУ



Обратная АРУ

УПЧ - Усилитель промежуточной частоты

АРУ с обратной связью

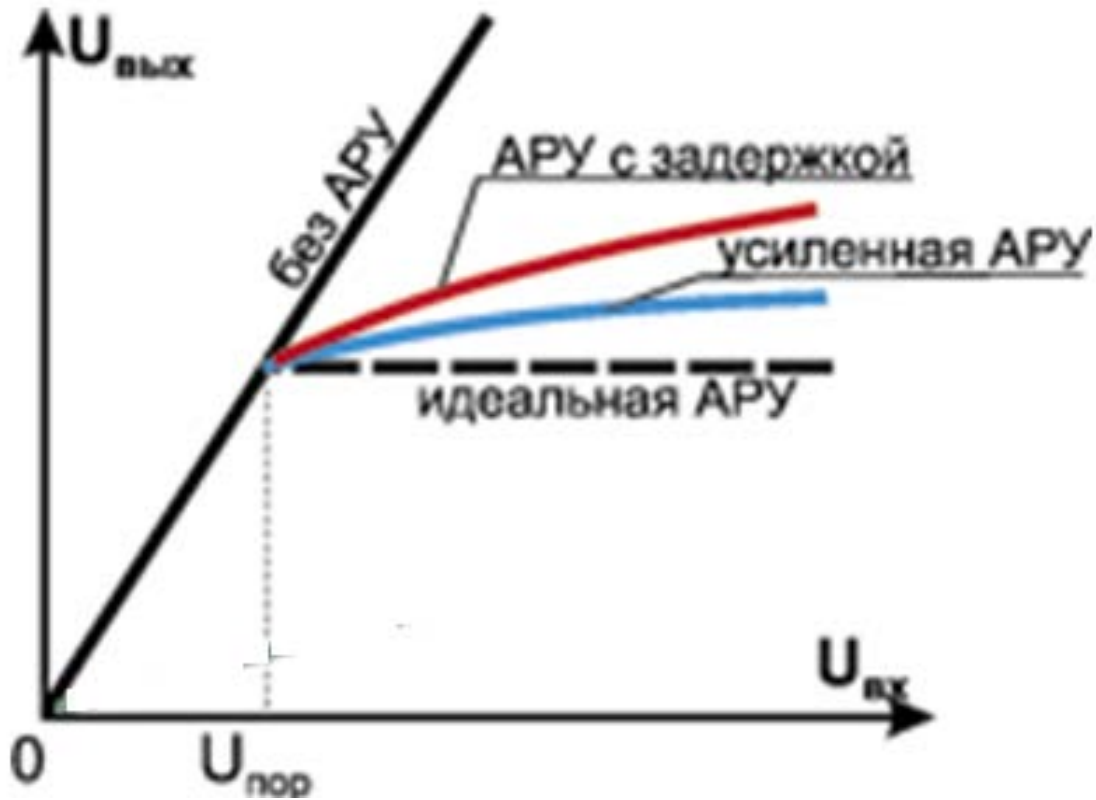


Детектор АРУ – предназначен для преобразования амплитудно-модулированных колебаний, полученных с выхода УПЧ, в колебания низкой частоты, среднее значение которых, выделяемое фильтром АРУ, пропорционально амплитуде напряжения несущей частоты.

Усилитель постоянного тока (УПТ) – увеличивает амплитуду выпрямленного (детектированного) напряжения.

ФНЧ в АРУ выделяет из продетектированного сигнала среднее напряжение пропорциональное амплитуде колебаний несущей частоты.

Амплитудная характеристика АРУ с обратным регулированием



в результате действия системы АРУ выходное напряжение усилителя изменяется в значительно меньшей степени, чем входное.

Достоинства обратной системы АРУ:

- система АРУ защищает от перегрузок все каскады приемника, расположенные дальше от входа, чем точка приложения регулирующего воздействия, а сами цепи АРУ находятся под воздействием сигнала со сжатым динамическим диапазоном и также не подвержены перегрузкам.
- система нечувствительна к изменениям коэффициента усиления системы, связанных со старением активных элементов.

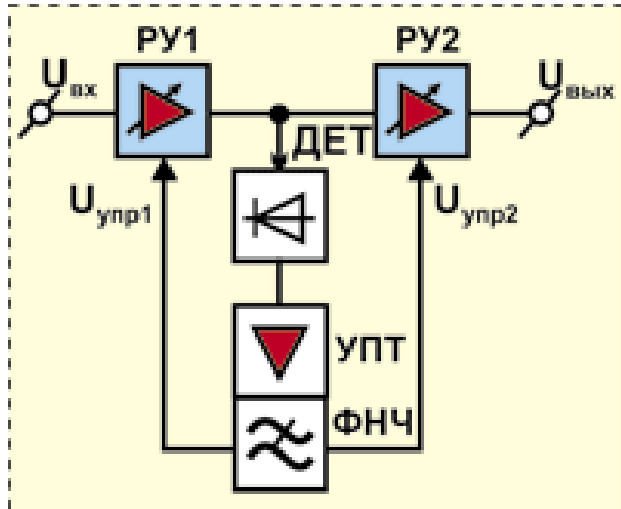
Недостатки обратной АРУ:

- не могут дать полного постоянства выходного напряжения, т.к, оно является входным для системы АРУ и должно содержать информацию для соответствующего изменения регулирующего напряжения.
- не может обеспечить одновременно большую глубину регулирования (стремление к идеальной амплитудной характеристике) и высокое быстродействие.

- Несмотря на теоретическую возможность приближения к идеальному случаю, прямая АРУ не получила широкого распространения ввиду сложности ее реализации.
- Напряжение на входе регулируемого усилителя может изменяться в тысячи раз. Чтобы регулирующее напряжение могло воздействовать на регулируемый усилитель, начиная со слабых сигналов на входе, коэффициент усиления собственного усилителя АРУ должен быть значительным. Но при сильном входном сигнале в таком усилителе неизбежно возникает перегрузка, поэтому он должен иметь свою АРУ.

Очевидно, лучшие результаты может дать применение комбинированной системы АРУ, включающей в себя цепи прямой и обратной связи, с превалирующим влиянием обратной цепи АРУ.

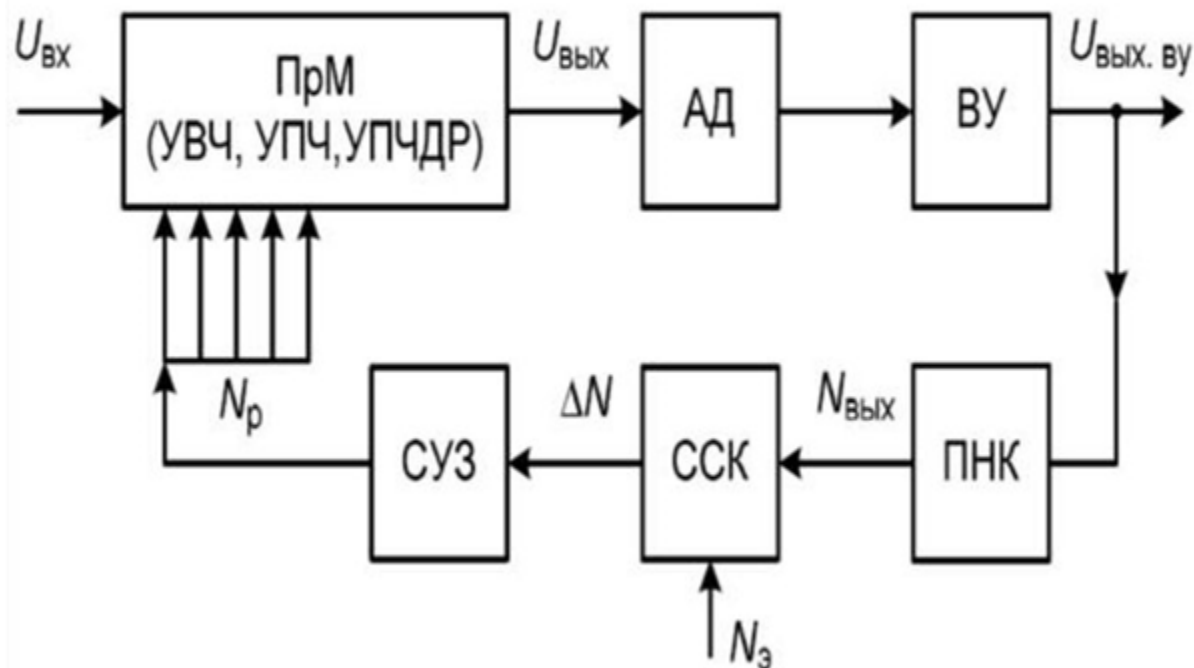
Функциональная схема комбинированной АРУ



Рациональное использование преимуществ обеих схем АРУ: стабильность обратной АРУ и возможность получения идеальной характеристики в прямой АРУ.

Для первого РУ это обратная, а для второго – прямая АРУ. Основная регулировка происходит в первом усилителе. Второй регулируемый усилитель обычно однокаскадный, его основная задача — скомпенсировать возрастающее напряжение на выходе первого усилителя.

Аналого-цифровая АРУ (ЦАРУ)



Функциональная схема обратной ЦАРУ

где АД – амплитудный детектор;
 ВУ – видеоусилитель;
 ПНК – преобразователь напряжение-код;
 ССК – схема сравнения кодов, цифровое пороговое устройство;
 СУЗ – схема усреднения и запоминания;
 УПЧДР – УПЧ с дискретной регулировкой.

Сигналы с усилителя поступают на АЦП системы АРУ. Далее цифровой сигнал сравнивается с эталонным значением $N_э$ и на выходе системы сравнения кодов появляется цифровой сигнал рассогласования подается на ЦАП. На выходе ЦАП формируется аналоговый сигнал управления усилением приемника.

Цифровые системы АРУ имеют ряд преимуществ перед обычными аналоговыми системами:

- независимость длительности установления требуемого усиления от уровня входного сигнала;
- независимость регулировочных характеристик от разброса и конкретных свойств цепи АРУ и регулируемого усилителя;
- возможность установления требуемого усиления после приема первого импульса;
- астатизм (независимость от прихода импульса) и сохранения установленного усиления при перерывах в приеме сигналов.

МАРУ

Эффективным методом защиты от перегрузки приемника импульсной помехой большой амплитуды является так называемая мгновенная автоматическая регулировка усиления (МАРУ). Схема МАРУ отличается от обычной схемы АРУ тем, что скорость действия МАРУ значительно больше, поэтому она реагирует на каждый поступающий импульс.

Система МАРУ почти мгновенно срабатывают под воздействием помехи, уменьшая на время ее действия коэффициент усиления нескольких каскадов УПЧ. Сразу после исчезновения помехи чувствительность приемника полностью восстанавливается, и он может принимать слабые сигналы.

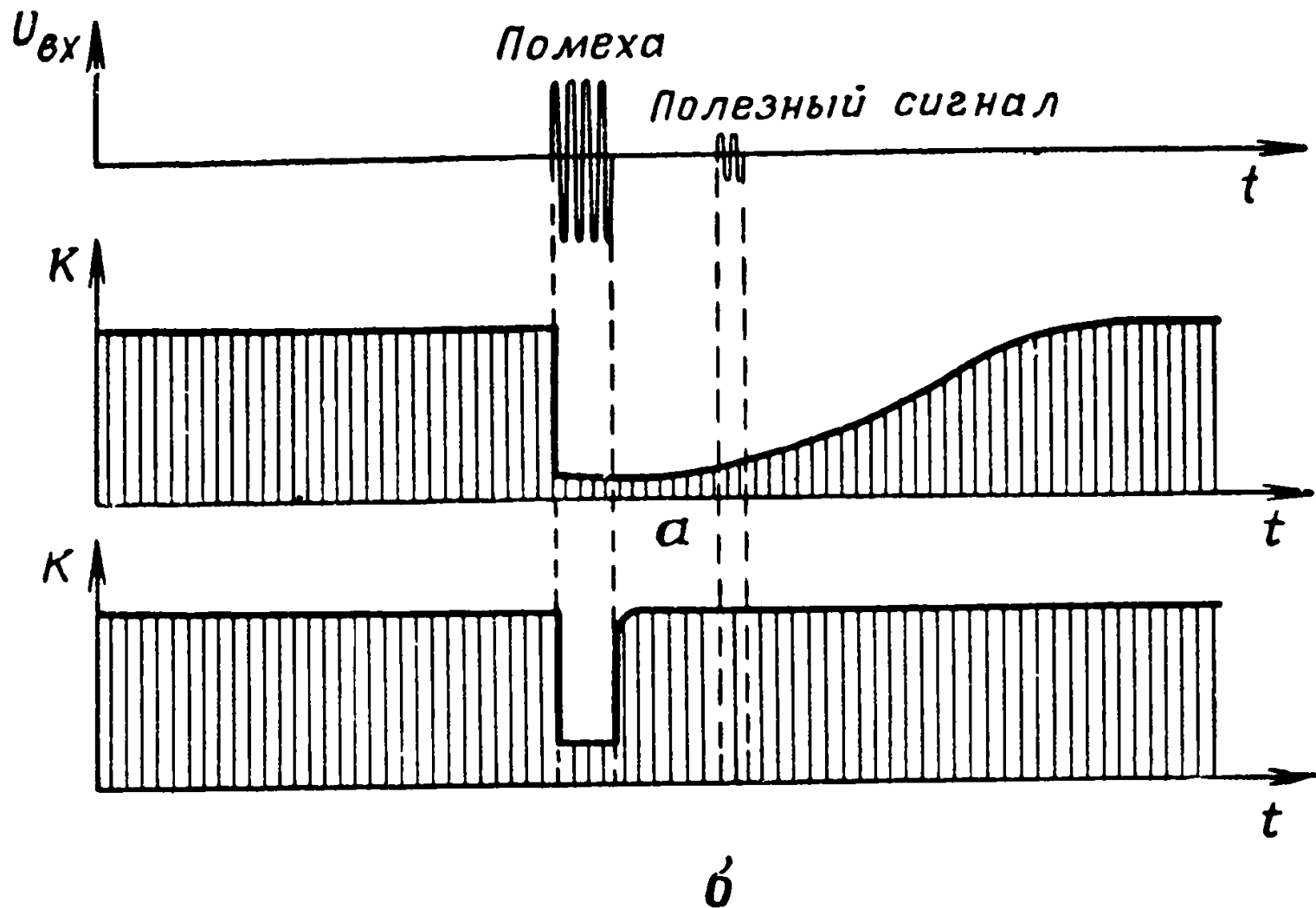


Рис. 2.229. Изменение коэффициента усиления радиолокационного приемника под воздействием импульсной помехи с большой амплитудой:
 a — без системы МАРУ; $б$ — при наличии системы МАРУ

Шумовая АРУ (ШАРУ)

Схема шумовой автоматической регулировки усиления (ШАРУ) предназначена для поддержания неизменным среднего уровня шумового напряжения на выходе приемного устройства при значительном изменении интенсивности активной шумовой помехи (АШП) на его входе.

ШАРУ является разновидностью инерционной автоматической регулировки усиления непрерывного действия. Особенность ее состоит в том, что входным возмущением цепи ШАРУ является не сигнал, а шум. Поэтому в цепь ШАРУ включается селектор (детектор) шума, обеспечивающий подачу на ее вход выборки шума.

Основные параметры систем АРУ:

- Динамический диапазон (дБ) — это глубина изменения входного сигнала (разница между минимальным и максимальным сигналом), при котором выходной сигнал ещё находится в допустимых пределах;
- Время срабатывания АРУ (дБ/с) — отражает скорость реакции АРУ на скачок входного сигнала.

Основным показателем цепи с регулируемым коэффициентом усиления служит коэффициент регулирования γ , равный отношению максимального коэффициента усиления к минимальному:

$$\gamma = \frac{K_{\max}}{K_{\min}}$$

Если обозначить

$$\frac{U_{\text{ex max}}}{U_{\text{ex min}}} = \alpha \quad \text{и} \quad \frac{U_{\text{вых max}}}{U_{\text{вых min}}} = \beta$$

то с учетом того, что в приемнике с АРУ

$$K_{\max} = \frac{U_{\text{вых min}}}{U_{\text{ex min}}}, \quad K_{\min} = \frac{U_{\text{вых max}}}{U_{\text{ex max}}}, \quad \gamma = \frac{\alpha}{\beta}$$

Какова должна быть величина коэффициента γ ? Если, например, приемник должен принимать слабые сигналы с $U_{вхmin}=1\text{мкВ}$, а при настройке на ближайшую мощную станцию должен обеспечивать без искажений прием сильных сигналов, например,

$$U_{вхmax}=20\text{мВ}, \text{ то получим } \alpha = \frac{20 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-6}} = 2 \cdot 10^4$$

Пусть при этом допустимый коэффициент изменения напряжения на выходе

$$\beta = 2. \text{ Тогда } \gamma = \frac{2 \cdot 10^4}{2} = 10^4$$

В одном усилительном каскаде сложно получить изменение коэффициента усиления более чем в несколько десятков раз. При более значительных изменениях появляются заметные нелинейные искажения. Поэтому регулирование осуществляют в нескольких каскадах, расположенных ближе к входу усилительного тракта, где сигналы еще малы.

Проблемы реализации квадратурной обработки

Различие в значениях модуля и фазы коэффициентов передачи элементов квадратурных каналов (демодулятора и усилителей), приводят к асимметрии амплитуд и постоянных составляющих квадратурных компонент комплексной огибающей.

Единственным выходом является программная коррекция квадратурных компонент демодулированного сигнала.

Лучше это делать по простому тестовому сигналу в начале передачи.

Амплитудная коррекция квадратур

$$AI_{\max} = \frac{1}{K} \sum_{m=1}^K \max I_m(\tau)$$

$$AI_{\min} = \frac{1}{K} \sum_{m=1}^K \min I_m(\tau)$$

$$AQ_{\max} = \frac{1}{K} \sum_{m=1}^K \max Q_m(\tau)$$

$$AQ_{\min} = \frac{1}{K} \sum_{m=1}^K \min Q_m(\tau)$$

Вычисление средних амплитуд и постоянных смещений

$$A_I = \frac{AI_{\max} - AI_{\min}}{2}$$

$$U_I = \frac{AI_{\max} + AI_{\min}}{2}$$

$$A_Q = \frac{AQ_{\max} - AQ_{\min}}{2}$$

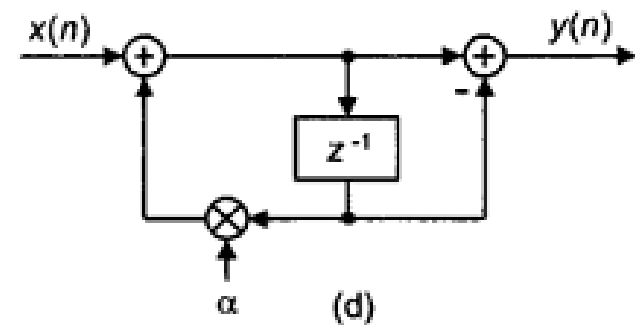
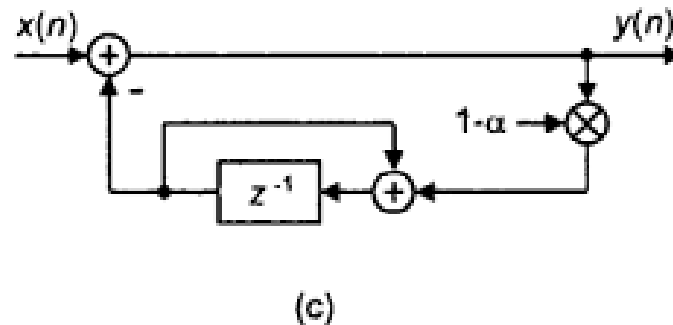
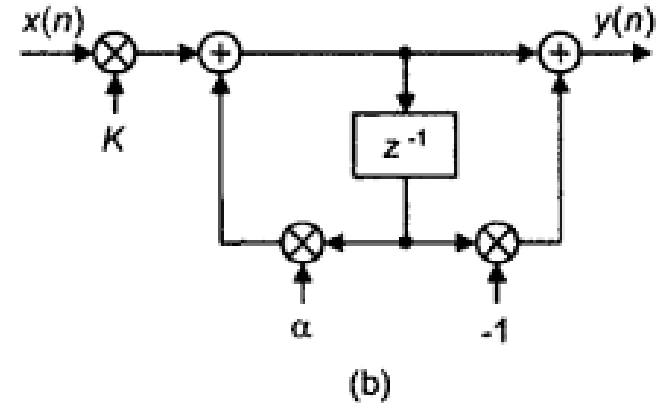
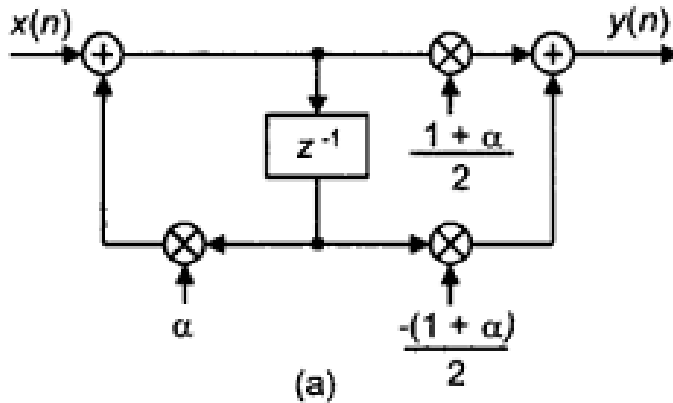
$$U_Q = \frac{AQ_{\max} + AQ_{\min}}{2}$$

Модификация всех последующих отсчетов квадратур

$$\tilde{I}(t) = \frac{I(t) - U_I}{A_I}$$

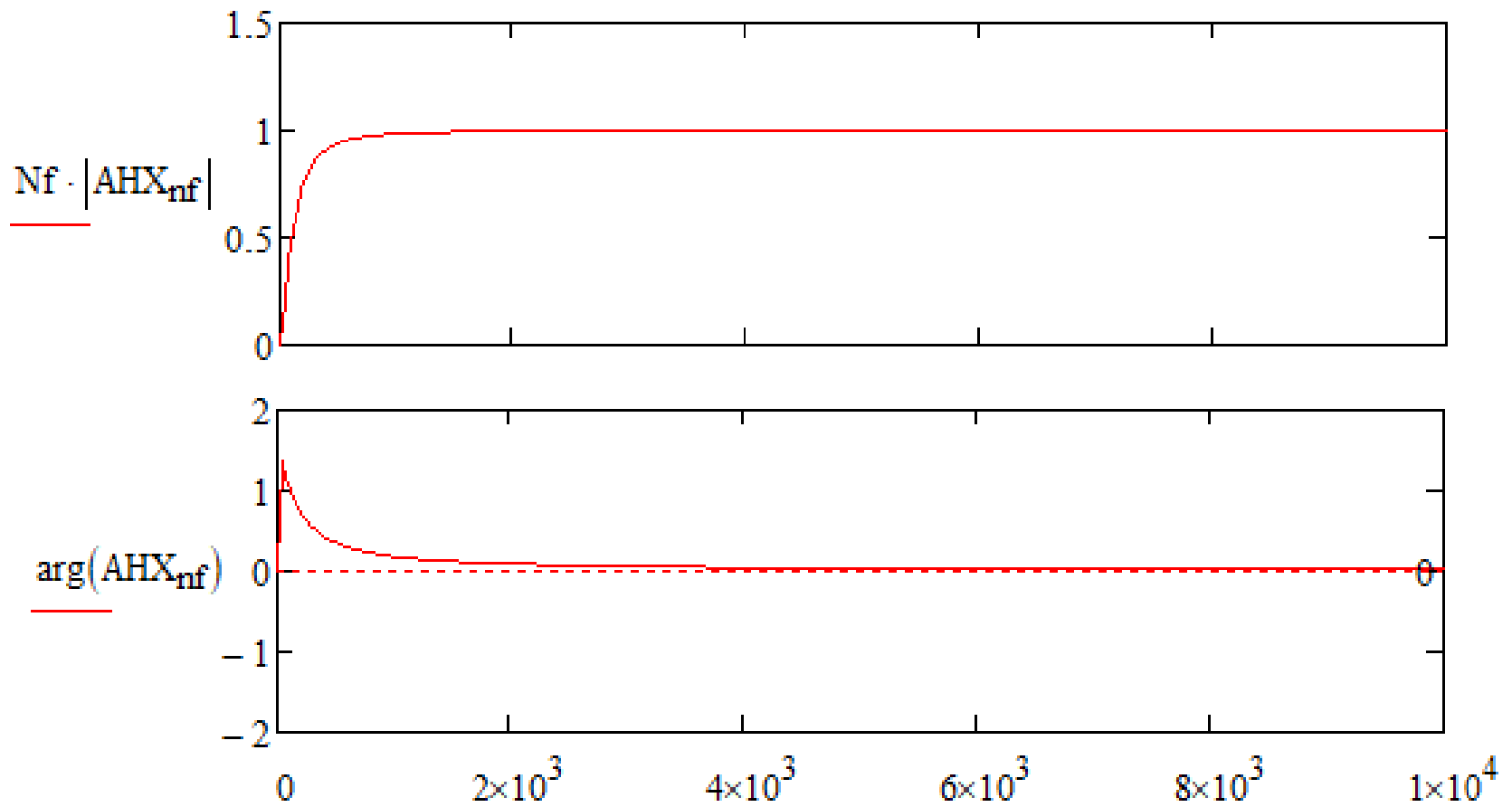
$$\tilde{Q}(t) = \frac{Q(t) - U_Q}{A_Q}$$

Для подавления постоянной составляющей можно использовать компенсаторы

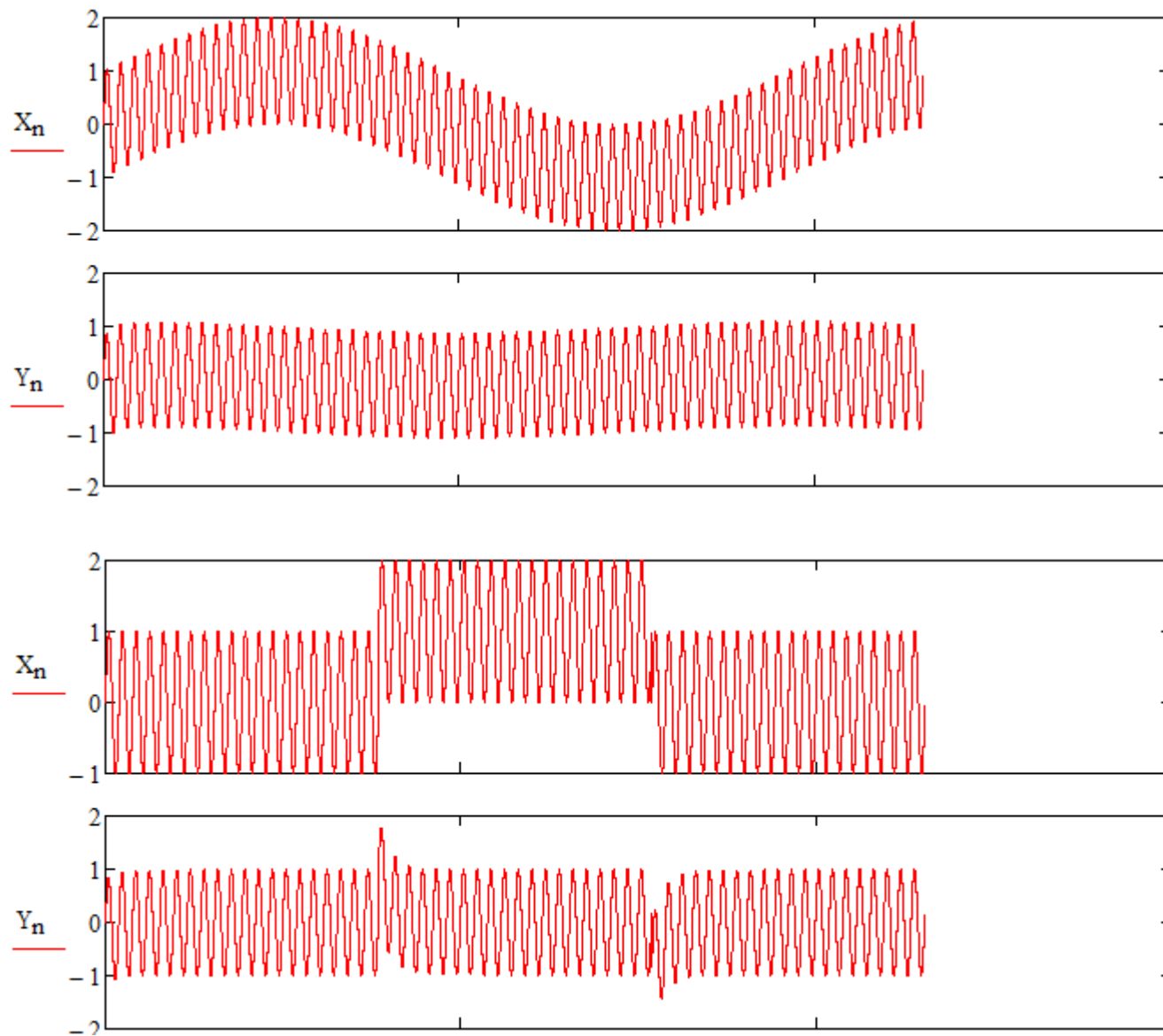


$$\underline{Y1(X, \alpha)} := \left| \begin{array}{l} B \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0.. \text{last}(X) \\ \quad \left| \begin{array}{l} y_i \leftarrow X_i + (\alpha - 1) \cdot B \\ B \leftarrow X_i + \alpha \cdot B \end{array} \right. \\ y \end{array} \right.$$

АЧХ и ФЧХ компенсатора постоянной составляющей



Работа компенсатора постоянной составляющей



Если смещения нет и коэффициенты передачи квадратурных каналов одинаковые АРУ при цифровой передаче можно реализовать так:

Вычисляем мощность текущих комплексных семплов и циклически записываем в окно W.

$$W_{\text{mod}(i,w)} = I_i^2 + Q_i^2$$

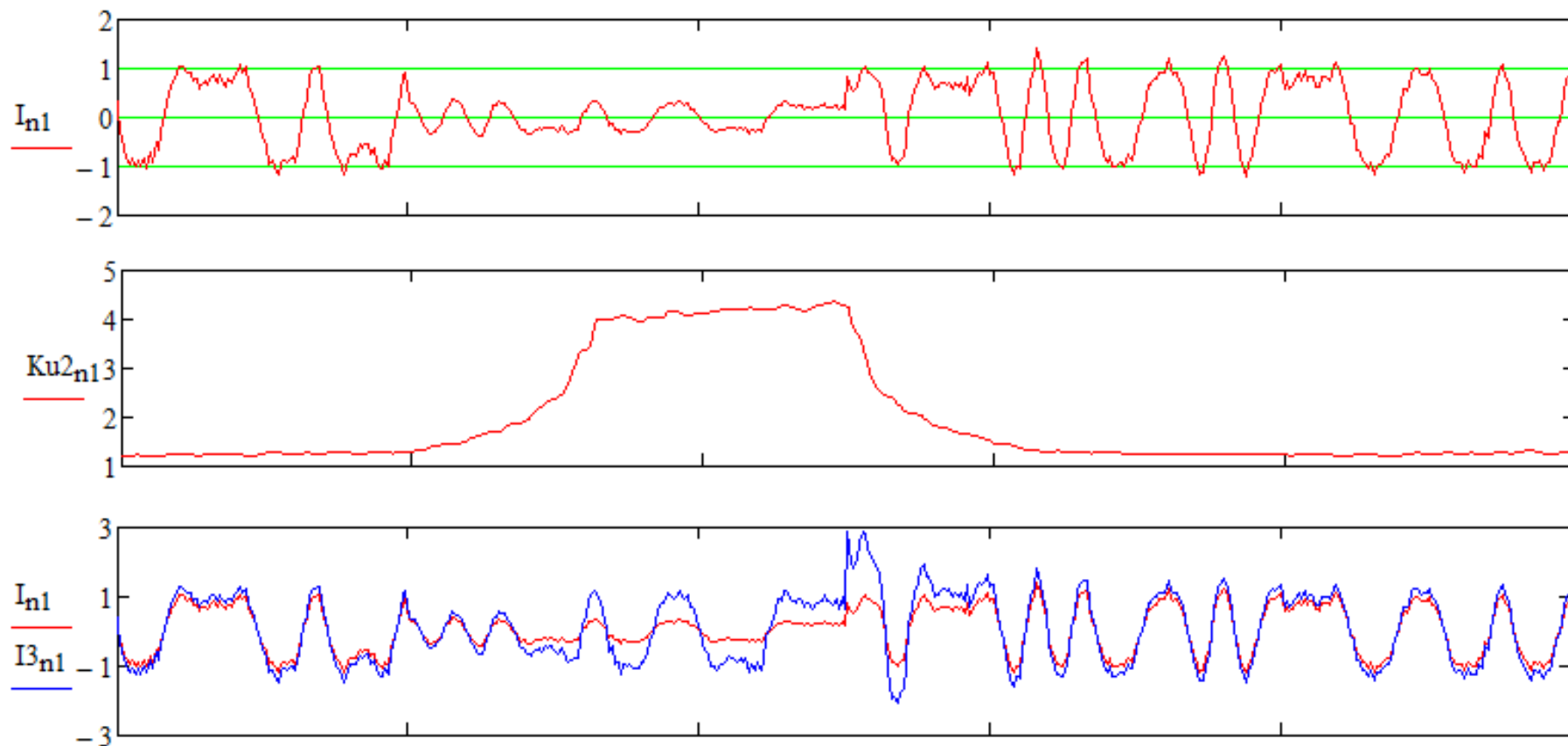
Вычисляем среднее значение мощности отсчета и берем квадратный корень

$$S_w = \sqrt{\frac{\sum W}{w}}$$

Модифицируем значения текущих отсчетов квадратур

$$\tilde{I}(t) = \frac{I(t)}{S_w} \quad \tilde{Q}(t) = \frac{Q(t)}{S_w}$$

Входной сигнал с резким изменением уровня, изменение коэффициента усиления и сигналы на входе и выходе системы АРУ



Экспоненциальное усреднение

Этот метод обеспечивает подавление шума путем умножения входного отсчета на константу и сложения этого произведения с предыдущим значением среднего, умноженным на дополнение константы до единицы.

Алгоритм экспоненциального сглаживания представляет собой простое выражение:

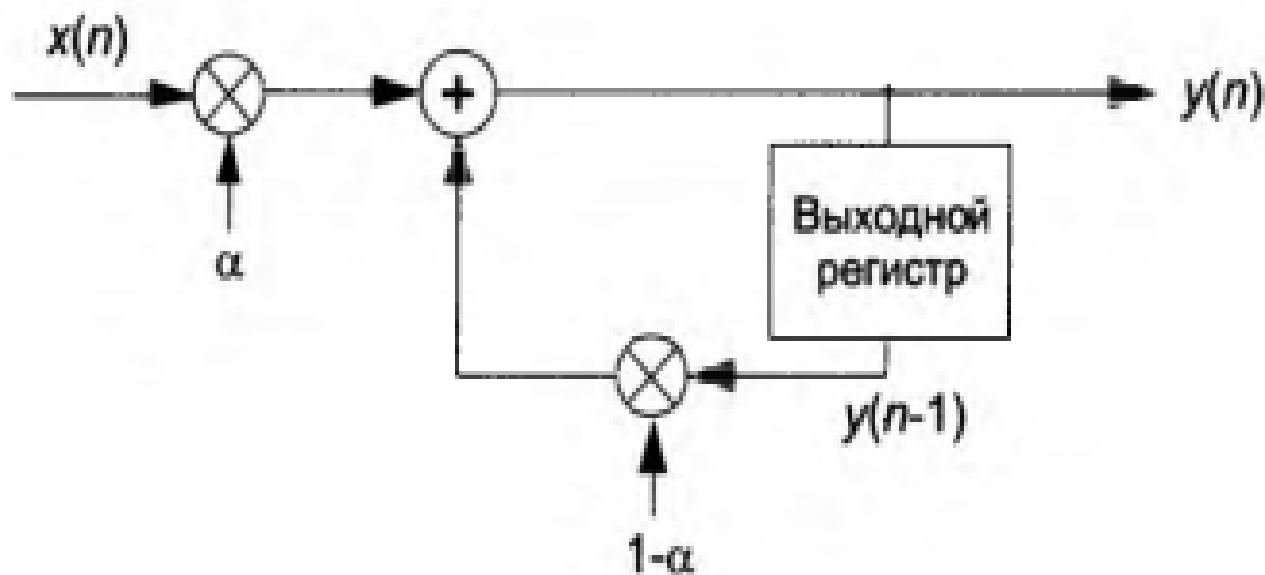
$$y(n) = \alpha * x(n) + (1 - \alpha) * y(n - 1)$$

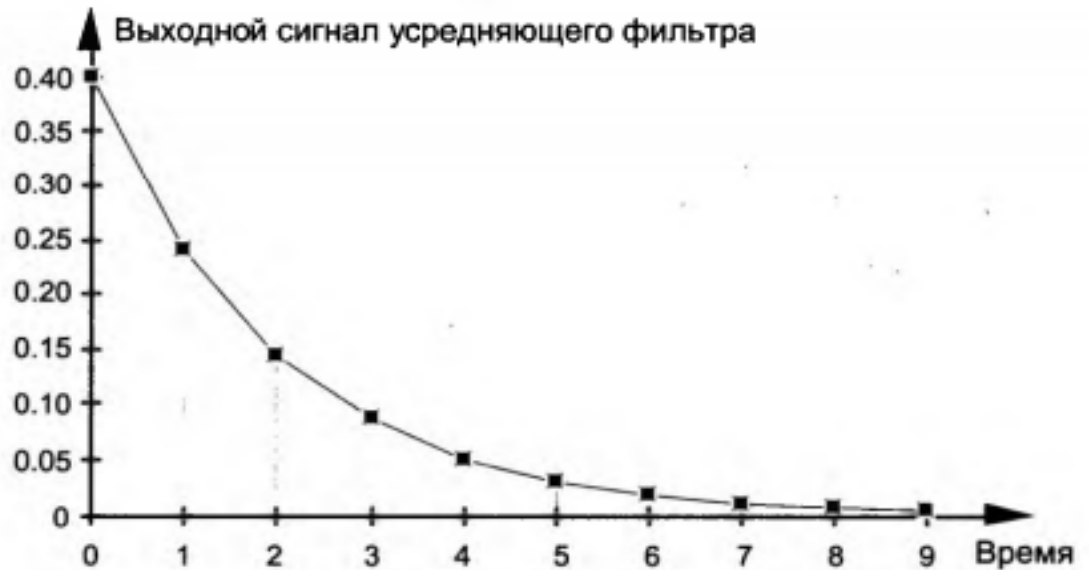
$y(n)$ — текущий выходной отсчет устройства усреднения

$y(n-1)$ — предыдущий отсчет среднего

α — постоянный весовой коэффициент.

Преимущество экспоненциального усреднения в том, что оно требует всего одну ячейку памяти для хранения значения $y(n-1)$ до получения следующего входного отсчета $x(n)$.

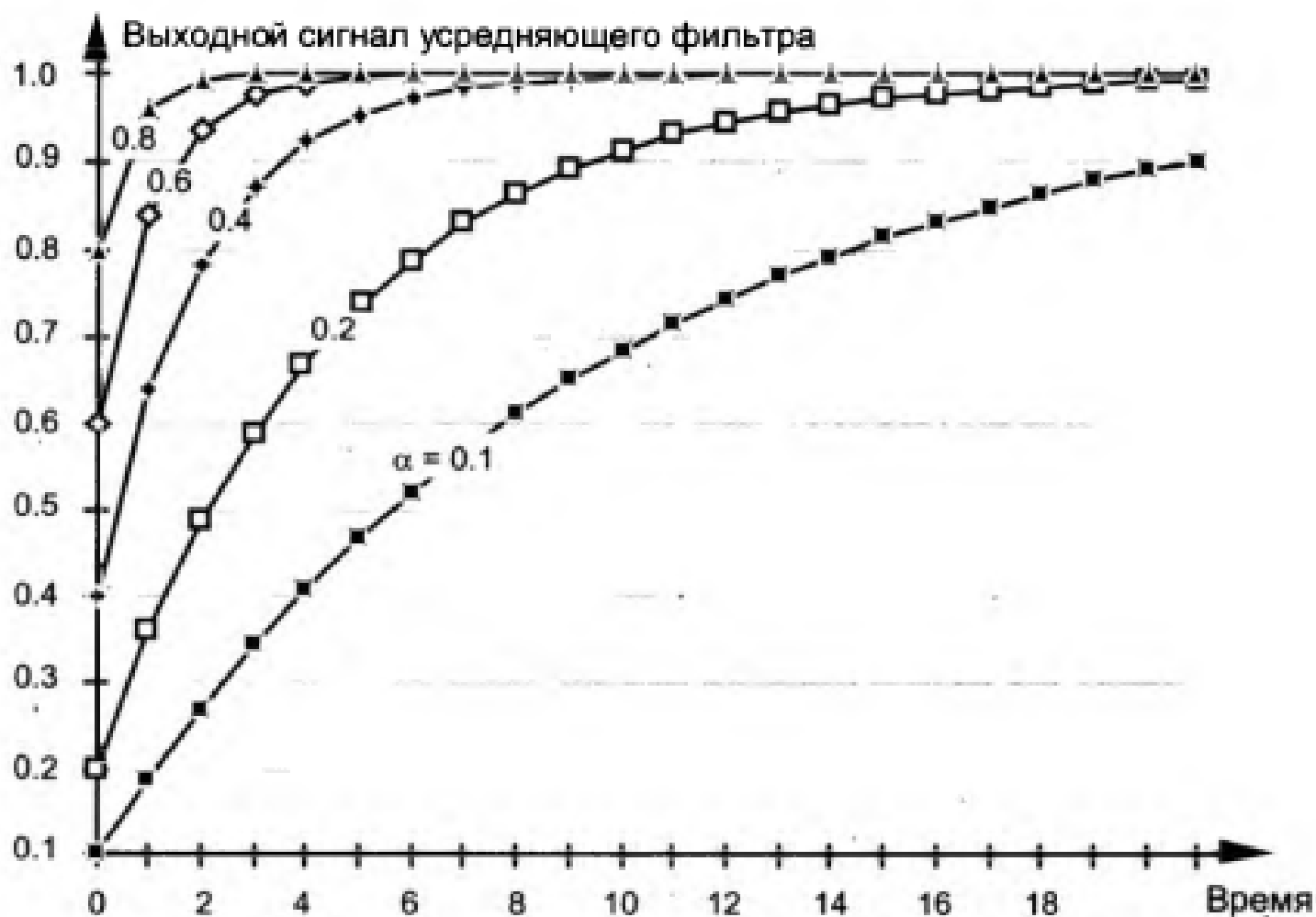




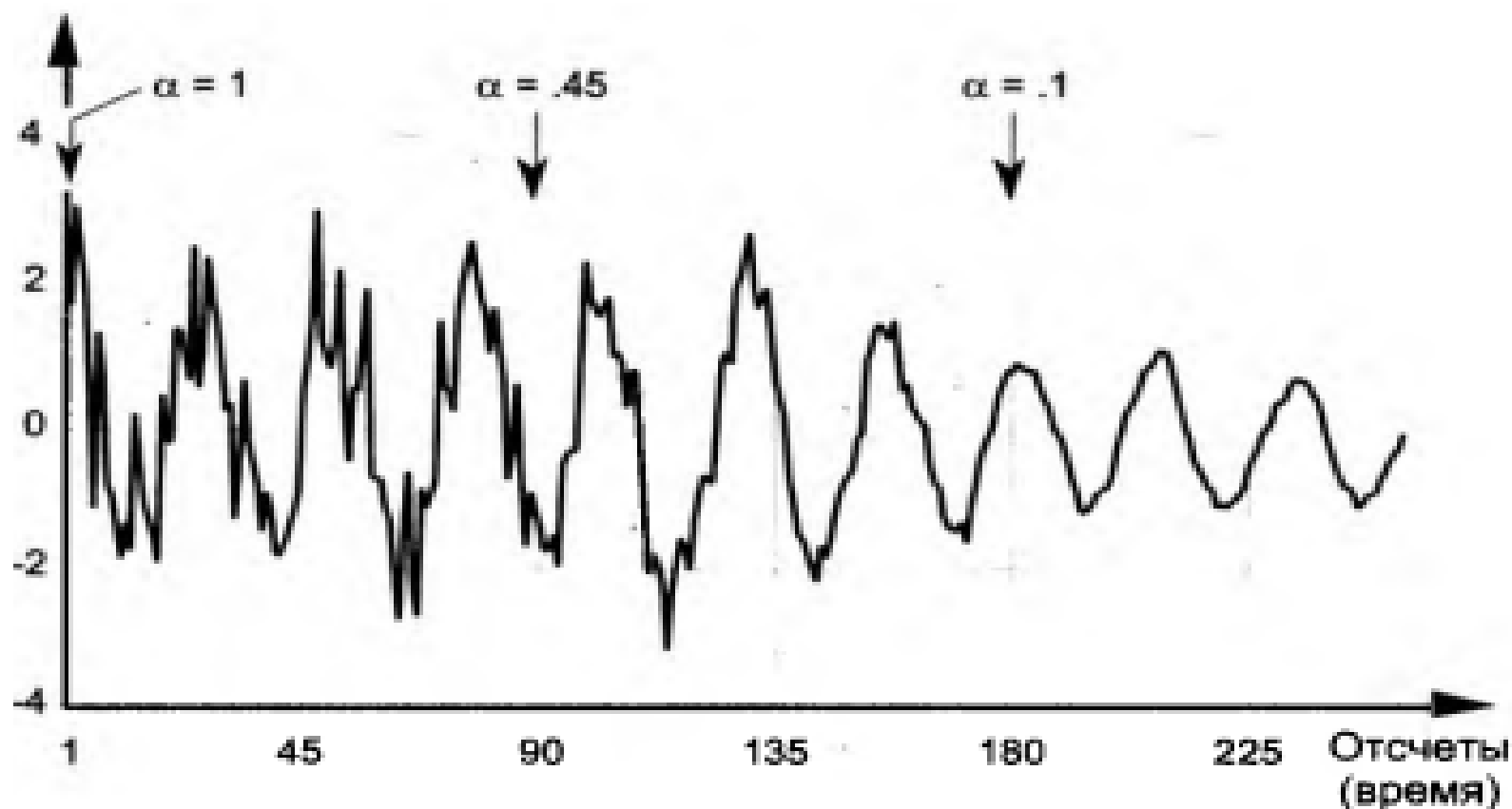
На вход устройства усреднения поступает длинная последовательность нулей.

В момент $t = 0$ входной отсчет умножается на альфа. На следующем такте входной отсчет равен нулю, а старое значение 0.4 умножается на $(1 - 0.4)$, значение выходного отсчета 0.24. Далее выходная последовательность, устройства экспоненциально уменьшается вследствие последовательных умножений на 0.6.

Чем меньше α , тем сильнее подавляется шум. С другой стороны, чем меньше α , тем медленнее устройство реагирует на изменения входного сигнала.



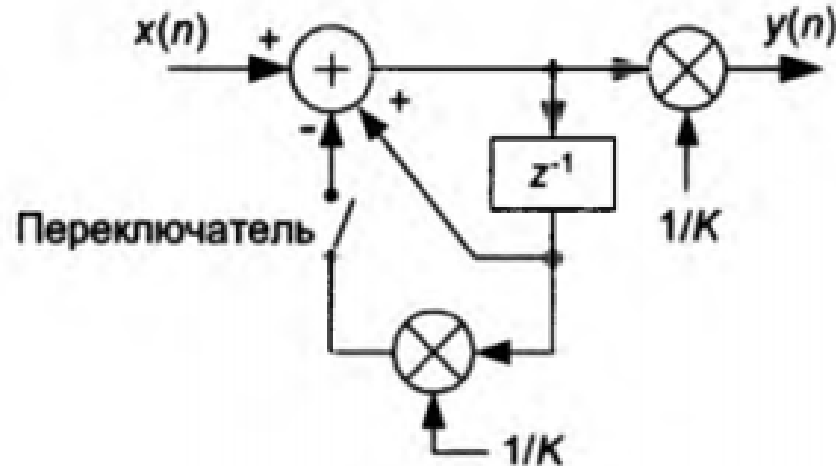
Весовой коэффициент «линейно уменьшается, начиная со значения 1, до значения 0.1 на 180-м отсчете входной последовательности. Амплитуда косинусоиды также уменьшается при маленьких значениях α .



Двухрежимное усреднение

Фильтр усреднения работает следующим образом: переключатель остается разомкнутым при обработке K входных отсчетов, после чего выходной сигнал $y(n)$ оказывается равным среднему $x(n)$ по K отсчетам.

Перед приходом $K + 1$ -го входного отсчета переключатель замыкается, преобразуя фильтр скользящего среднего в фильтр экспоненциального усреднения с коэффициентом обратной связи $(1 - 1/K)$, который обеспечивает управление подавлением шума.



Список используемых ИСТОЧНИКОВ

- Аналого-цифровая АРУ (ЦАРУ) [Электронный ресурс] // poisk-ru.ru. – URL: <https://poisk-ru.ru/s27683t8.html> (дата обращения 14.10.2019)
- Автоматическая регулировка усиления (АРУ) *Automatic Gain Control, AGC* [Электронный ресурс] // audioakustika.ru. – URL: <http://audioakustika.ru/aru> (дата обращения 14.10.2019)
- Автоматическая регулировка усиления (АРУ) *Automatic Gain Control, AGC* [Электронный ресурс] // biograf.academic.ru. – URL: <https://biograf.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/1583971/biograf.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/761600#.D0.9A.D0.BB.D0.B0.D1.81.D1.81.D0.B8.D1.84.D0.B8.D0.BA.D0.B0.D1.86.D0.B8.D1.8F> (дата обращения 14.10.2019)