

УДК 621.3.013.62

БЕЗЫНЕРЦИОННЫЙ АМПЛИТУДНЫЙ ДЕТЕКТОР

© 2010 г.

*С.С. Зельманов*Волго-Вятский филиал Московского технического университета связи и информатики,
Нижний Новгород

zelmanss@yandex.ru

Поступила в редакцию 02.06.2009

Предлагается и анализируется безынерционный алгоритм энергетического амплитудного детектирования, хорошо работающий при весьма малых соотношениях модулирующей и несущей частот АМ-сигнала. Результаты компьютерного моделирования детектора подтверждают определенные преимущества предлагаемого способа.

Ключевые слова: безынерционный детектор, искажения, остаток, энергетический детектор, многократная обратная связь.

Введение

Операция амплитудного детектирования АМ-сигнала общего вида с модулирующей функцией $U(t)$ может быть представлена следующим образом:

$$U(t) = \frac{u(t)}{\sin(\omega_0 t + \varphi_0)}. \quad (1)$$

Неопределенность этой операции заключается в том, что на приеме всегда неизвестна начальная фаза φ_0 . Это означает, что любому значению начальной фазы φ_k соответствует своя функция огибающей $U(t)$. Однако только одно значение $\varphi_k = \varphi_0$ дает истинную огибающую, то есть переданное сообщение.

Для широко известных АМ-сигналов несущая и модулирующая частоты, как правило, находятся в соотношении вида $\omega_0 \gg \Omega_{\max}$. При этом на функцию $U(t)$ огибающей АМ-сигналов при детектировании традиционными способами накладывалось ограничение, которое было сформулировано как условие «медленности» вида $|\dot{U}(t)| \ll \omega_0 U(t)$. Поэтому техническое решение проблемы детектирования таких сигналов может обходиться без знания величины начальной фазы и осуществляться с помощью детекторов, реализующих операцию вида «нелинейный преобразователь-фильтр нижних частот».

Появление синхронного детектирования потребовало также дополнительной фильтрации, связанной с необходимостью удаления нежелательных «продуктов» параметрического преобразования АМ-сигнала [1]. Однако теоретиче-

ский предел, который устанавливает способ синхронного детектирования, – это соотношение $\omega_0 > 2\Omega_{\max}$. При этом необходимо использовать фильтр нижних частот с достаточно жесткими условиями к величине крутизны частотной характеристики вблизи частоты среза для устранения продуктов параметрического преобразования. Необходимость синхронизации опорного генератора следует также отнести к издержкам синхронного способа детектирования. Тем не менее это был существенный шаг вперед в развитии теории и практики детектирования.

Проблема поиска безынерционного алгоритма детектирования при этом остается как в теоретическом, так и в прикладном смысле. Сближение величин несущей и модулирующей частот в реальных сигналах снимает ограничение, связанное с «медленностью» изменения огибающей. Это прежде всего относится к радиоимпульсным сигналам. Появилась задача детектирования сигналов, в которых соотношение частот стало иметь вид $\omega_0 \approx \Omega_{\max}$. Такие сигналы стали называть обобщенными модулированными колебаниями. Для детектирования обобщенных АМ-колебаний традиционные методы детектирования оказались непригодными. Потребовались новые усилия для решения общей задачи детектирования обобщенных АМ-сигналов.

С точки зрения теоремы отсчетов непригодность традиционных методов для детектирования обобщенных АМ-колебаний объясняется недостаточностью двух отсчетов за период несущей, то есть требуется большее количество выборок. В идеальном случае необходима непрерывная по-

следовательность выборок (безынерционная процедура определения огибающей АМ-сигнала). Эта процедура должна быть инвариантной к начальной фазе АМ-колебания. Все более ясным становилось то, что решение задачи детектирования обобщенного АМ-сигнала должно быть связано с поиском безынерционного алгоритма, который устанавливал бы взаимно-однозначное соответствие между АМ-сигналом $u(t)$ и его огибающей $U(t)$ без явного участия неизвестной начальной фазы φ_0 . В теоретическом плане вопрос о возможности реализации алгоритма (1) без знания начальной фазы остался нерешенным. В связи с этим в настоящей работе сделана попытка частичного решения этой задачи. При этом рассматриваются три последовательных этапа теоретического решения, подтвержденных последовательно двумя авторскими свидетельствами и патентом [2–4]. На всех трех этапах проведено компьютерное моделирование предлагаемого алгоритма. При этом отмечается отсутствие серьезных нарушений каких-либо параметров сигналов, полученных при использовании предлагаемых алгоритмов.

Результаты и их обсуждение

Предложенный первый вариант алгоритма детектирования под названием «энергетический амплитудный детектор» основан на определении закона изменения полной мгновенной энергии колебательной системы, находящейся под воздействием АМ-сигнала [2].

Рассмотрим систему, функциональная блок-схема которой представлена на рис. 1.

Напряжения, снимаемые с конденсатора C и с резистора R подаются на входы квадраторов 1 и 2 соответственно. Напряжения, снимаемые с выходов квадраторов, пропорциональные величинам электрической и магнитной энергий контура, подаются на вход сумматора 3 и далее на вход устройства извлечения квадратного корня 4.

Выражение для полной энергии контура имеет вид

$$W(t) = \frac{C}{2} \left[u_c(t)^2 + \frac{1}{\omega_0^2} \dot{u}_c(t)^2 \right],$$

где $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$. (2)

На входе контура действует АМ-сигнал с огибающей $E(t)$. С выхода контура, с емкости, снимается АМ-сигнал

$$u_c(t) = U(t) \sin(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (3)$$

Будем считать, что модулирующая функция $U(t)$ пропорциональна закону изменения огибающей $E(t)$ сигнала, действующего на входе контура. Выражение (2) после подстановки в него (3) будет иметь вид:

$$W(t) = \frac{C}{2} \left[U(t)^2 + \frac{\dot{U}(t)^2}{\omega_0^2} \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0) + \frac{U(t)\dot{U}(t)}{\omega_0} \sin 2(\omega_0 t + \varphi_0) \right]. \quad (4)$$

С выхода блока 4 снимается напряжение, пропорциональное квадратному корню выражения (4):

$$\sqrt{W} = \sqrt{\frac{C}{2}} U(t) \left\{ 1 + \frac{\dot{U}(t)}{\omega_0 U(t)} \sin 2(\omega_0 t + \varphi_0) + \left[\frac{\dot{U}(t)}{\omega_0 U(t)} \right]^2 \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0) \right\}^{1/2}. \quad (5)$$

Наличие второго и третьего слагаемых в выражениях (4) и (5) свидетельствует о том, что устранить полностью зависимость результата детектирования от условия «медленности» изменения огибающей в рамках этого алгоритма полностью не удастся. Вместе с тем необходимо заметить, что уже на этом этапе достигается безынерционность алгоритма, т.к. фильтр нижних частот и процедура его работы не являются составной частью алгоритма детектирования. Процесс детектирования осуществляется непрерывно над мгновенными значениями АМ-сигнала. При этом использование ФНЧ после детектирования возможно только для устранения «остатка», представленного вторым и третьим слагаемыми в выражениях (4) и (5). На рис. 2 представлены осциллограммы результата

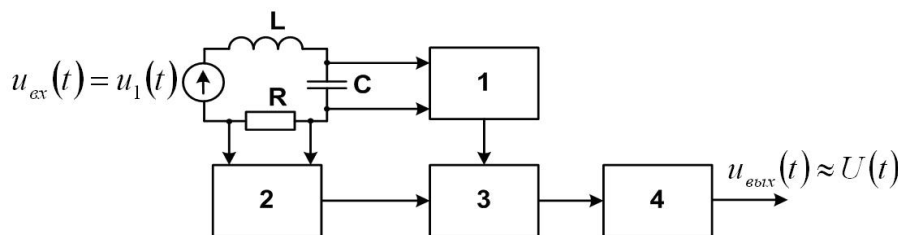


Рис. 1. Функциональная блок-схема энергетического детектора

натурного эксперимента. Совершенно очевидно, что при сближении частот ω_0 и Ω требования к крутизне частотной характеристики ФНЧ будут возрастать. Поэтому был избран иной путь решения задачи.

Этот путь предполагает компенсацию «остатка», представленного вторым и третьим членами выражений (4) и (5), что потребовало усложнения алгоритма детектирования [3].

Обратимся вновь к выражению (1), которое содержит два неизвестных: $U(t)$ и φ_0 . Необходимо определить вид такого уравнения, которое связывало бы функции $U(t)$ и $u(t)$, но начальная фаза φ_0 не должна входить в него в явном виде. Это уравнение должно удовлетворяться только при подстановке в него модулирующей функции $U(t)$, соответствующей переданному сообщению.

Представим обобщенный АМ-сигнал в следующем виде:

$$u(t) = U(t) \sin \psi(t), \quad (6)$$

где $\psi(t) = \arcsin \frac{u(t)}{U(t)}$.

Продифференцируем обе части выражения (6) с учетом того, что $\omega(t) = d\psi(t)/dt$:

$$\omega(t) = \frac{\dot{u}U(t) - u\dot{U}(t)}{U(t)^2 \sqrt{1 - \frac{u^2}{U(t)^2}}}. \quad (7)$$

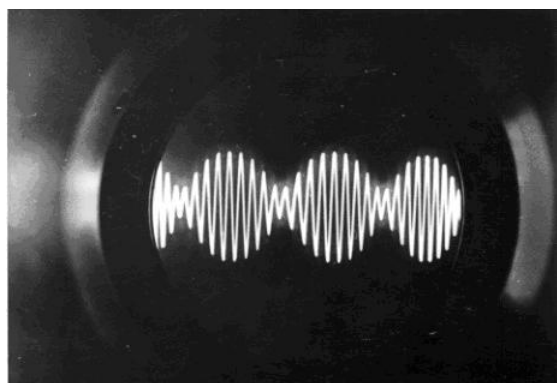
После проведения преобразований с учетом того, что $\omega(t) = \omega_0$, уравнение (7) примет вид:

$$\left[\frac{\dot{U}(t)}{U(t)} \right]^2 \frac{u^2}{\omega_0^2} - \left[\frac{\dot{U}(t)}{U(t)} \right] \frac{2u\dot{u}}{\omega_0^2} - U(t)^2 + \frac{\dot{u}^2}{\omega_0^2} + u^2 = 0. \quad (8)$$

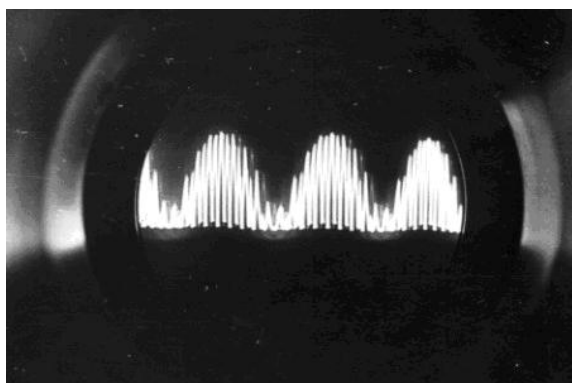
Полученное нелинейное уравнение (8) содержит неизвестную модулирующую функцию $U(t)$ и ее производную $\dot{U}(t)$. В качестве известных функций в это уравнение входят АМ-сигнал $u(t) = u$ и его производная $\dot{u}(t) = \dot{u}$.

Представим уравнение (8) в следующей форме:

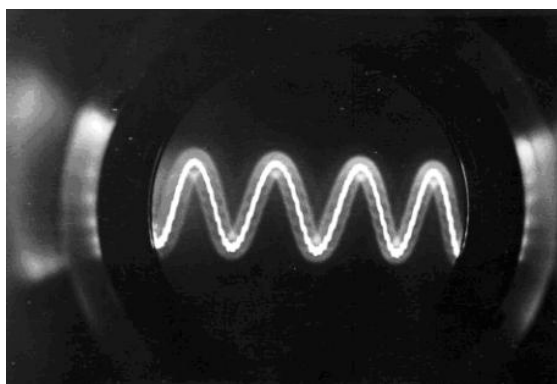
$$U(t) = \sqrt{u^2 + \frac{\dot{u}^2}{\omega_0^2} - \frac{2u\dot{u}}{\omega_0^2} \left[\frac{\dot{U}(t)}{U(t)} \right] + \frac{u^2}{\omega_0^2} \left[\frac{\dot{U}(t)}{U(t)} \right]^2}. \quad (9)$$



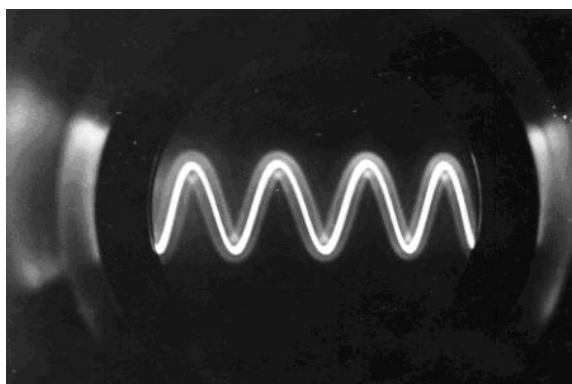
а



б



в



г

Рис. 2. Напряжения в различных точках схемы энергетического детектора: а – на входе детектора; б – на выходе одного из квадратов; в – на выходе сумматора детектора; г – на выходе фильтра нижних частот

Нелинейное уравнение (9) должно удовлетворяться только при подстановке в него модулирующей функции $U(t)$ и ее производной. Особенностью этого уравнения является то, что неизвестная функция $U(t)$ входит в обе части уравнения. Это приводит к некоторым проблемам, связанным с нарушением причинно-следственной связи. Алгоритм, следующий из уравнения (9), может быть представлен в виде математической модели, реализуемой функциональной блок-схемой, изображенной на рис. 3. Основой функциональной схемы, ее «ядром», является энергетический детектор. Он представлен блоками 1–6. Блоки 1 и 9 – дифференциаторы; блоки 2, 5, 14 – квадраторы; блоки 7, 11, 13 – перемножители; 10 – инвертор; 12 – оператор деления функций; 4 – сумматор; 6 – блок извлечения квадратного корня; 3 и 8 – масштабные операторы.

В действительности работа системы будет происходить следующим образом. При действии АМ-сигнала на входе энергетического детектора с замкнутой цепью обратной связи на его выходе в блоке 6 будет формироваться напряжение огибающей $U(t)$ с некоторым «остатком». Это напряжение поступает в цепь обратной связи, то есть на входы блоков 9 и 12. При этом цепь обратной связи вырабатывает напряжение, подаваемое на сумматор 4, которое обеспечивает существенную, но неполную компенсацию «остатка» в блоке 4. Покажем это.

На входе детектора действует обобщенный АМ-сигнал вида:

$$u(t) = U(t) \sin(\omega_0 t + \varphi_0).$$

Этот сигнал поступает на входы блоков 1 и 5. На выходе блока 5 (квадратора) сигнал имеет вид:

$$u_5(t) = U(t)^2 \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0) = \frac{U(t)^2}{2} - \frac{U(t)^2}{2} \cos 2(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (10)$$

Далее сигнал (10) поступает на один из входов сумматора 4. На выходе блока 1 (дифференциатора) сигнал представлен выражением

$$u_1(t) = \dot{U}(t) \sin(\omega_0 t + \varphi_0) + U(t) \omega_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (11)$$

Этот сигнал поступает на вход блока 2 (квадратора) и через масштабный блок 3, где умножается на величину $1/\omega_0^2$, поступает на вход сумматора 4 в следующем виде:

$$u_3(t) = \frac{\dot{U}(t)^2}{2\omega_0^2} - \frac{\dot{U}(t)^2}{2\omega_0^2} \cos 2(\omega_0 t + \varphi_0) + \frac{U(t)^2}{2} + \frac{U(t)^2}{2} \cos 2(\omega_0 t + \varphi_0) + \frac{U(t)\dot{U}(t)}{\omega_0} \sin 2(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (12)$$

С учетом поступивших на вход сумматора 4 с блоков 3 и 5 напряжений результирующий сигнал на выходе сумматора 4 будет иметь вид:

$$u_4(t) = U(t)^2 - \frac{\dot{U}(t)^2}{2\omega_0^2} \cos 2(\omega_0 t + \varphi_0) + \frac{U(t)\dot{U}(t)}{\omega_0} \sin 2(\omega_0 t + \varphi_0) + \frac{\dot{U}(t)^2}{2\omega_0^2}. \quad (13)$$

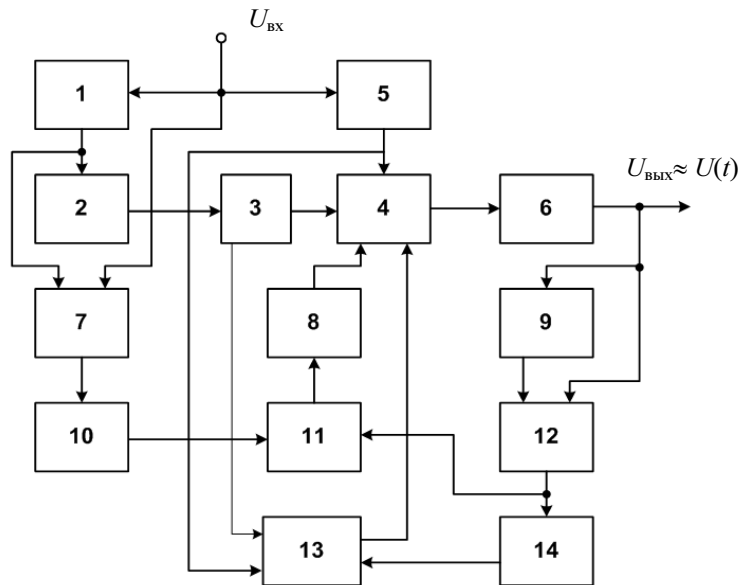


Рис. 3. Функциональная блок-схема энергетического детектора с однократной обратной связью

Из выражения (13) следует, что для получения на выходе линейного энергетического детектора модулирующей функции $U(t)$ необходимо полностью скомпенсировать в этом выражении второе, третье и четвертое слагаемые. Эта задача решается, если на вход цепи обратной связи, то есть на входы блоков 9 и 12 подается напряжение огибающей $U(t)$. В этом случае в блоке 12 происходит деление производной модулирующей функции, вычисленной в блоке 9, на модулирующую функцию, поступающую с выхода блока 6. Это отношение возводится в квадрат в блоке 14 и поступает на вход блока перемножения 13. На другие входы этого блока подаются: множитель $1/\omega_0^2$ с масштабного блока 3 и напряжение с выхода квадратора 5. В результате с выхода блока 13 на сумматор 4 поступает напряжение вида:

$$u_{13}(t) = \frac{\dot{U}(t)^2}{2\omega_0^2} - \frac{\dot{U}(t)^2}{2\omega_0^2} \cos 2(\omega_0 t + \varphi). \quad (14)$$

Одновременно на входы перемножителя 7 подается напряжение входного АМ-сигнала и напряжение с выхода дифференциатора 1. После инвертирования в блоке 10 напряжение имеет вид:

$$u_{10}(t) = -\frac{U(t)\dot{U}(t)}{2} + \frac{U(t)\dot{U}(t)}{2} \cos 2(\omega_0 t + \varphi_0) - \frac{U(t)^2 \omega_0}{2} \sin 2(\omega_0 t + \varphi_0).$$

Сигналы с выходов блоков 10 и 12 после перемножения в блоке 11 и умножения в блоке 8 на масштабный коэффициент $2/\omega_0^2$ поступают с выхода блока 8 на сумматор 4 в следующем виде:

$$u_8(t) = -\frac{\dot{U}(t)^2}{\omega_0^2} + \frac{\dot{U}(t)^2}{\omega_0^2} \cos 2(\omega_0 t + \varphi_0) - \frac{\dot{U}(t)U(t)}{\omega_0} \sin 2(\omega_0 t + \varphi_0).$$

В блоке 4 происходит суммирование напряжений, снимаемых с выходов блоков 5, 3, 8, 13. В результате в блоке 4 имеет место полная компенсация «остатка», полученного в результате квадратичного энергетического детектирования. Тогда на выходе блока 4 окончательно получим:

$$u_{\Sigma}(t) = u_5(t) + u_3(t) + u_8(t) + u_{13}(t) = U(t)^2. \quad (15)$$

В этом случае на выходе блока 6 (блок извлечения квадратного корня) формируется напряжение модулирующей функции $U(t)$, что подтверждает справедливость уравнения (9) в том смысле, что при подстановке в него выражения модулирующей функции входного АМ-

сигнала это уравнение удовлетворяется. Напряжение, имеющее вид какой-либо другой функции огибающей, поданное на вход блоков 9 и 12, не приведет к аналогичному результату, так как эта функция не удовлетворяет уравнению (9). С учетом последовательности действий, которые производятся в функциональной блок-схеме детектора, можно заключить, что для компенсации «остатка», то есть второго, третьего и четвертого членов выражения (13), необходимо, чтобы с блока 6 в цепь обратной связи подавалось напряжение огибающей $U(t)$. Однако для этого требуется, чтобы упомянутая компенсация уже ранее имела место. В этом и состоит нарушение причинно-следственной связи в этой модели детектора, не позволяющей абсолютно точно решить задачу выделения огибающей.

Действительно, напряжение огибающей с выхода блока 6, из которого формируется компенсирующее напряжение в начале работы детектора, будет содержать некоторый «остаток». Поэтому сформированное из него компенсирующее напряжение, поданное в блок сумматора 4, лишь частично скомпенсирует «остаток». Результат компьютерного моделирования этого алгоритма показывает, что частота напряжения «остатка» возрастает в четыре раза по сравнению с частотой ω_0 , а его величина уменьшается в два раза. Увеличение частоты напряжения «остатка» весьма существенно с точки зрения обеспечения его дополнительной фильтрации с помощью фильтра нижних частот, включенного каскадно и никак не влияющего на работу детектора.

Напряжение, компенсирующее «остаток», формируется цепью обратной связи, в которую входят блоки 9, 12, 14, 13, 11. Поэтому на формирование компенсирующего напряжения будет расходоваться время, определяемое длительностью выполнения вычислительных операций в этих блоках. Это обстоятельство привело логически к введению в схему энергетического детектора с обратной связью блока задержки t , реализующего запаздывание входного АМ-сигнала на время, соответствующее длительности выполнения вычислительных операций в цепи обратной связи (рис. 4). Это обеспечивает своевременность поступления компенсирующего напряжения на вход сумматора 4 нижней части схемы детектора, так как напряжение огибающей на выходе блока 6 верхней схемы формируется с опережением t . Результат компьютерного моделирования этого варианта показывает возможность некоторого дополнительного уменьшения величины «остатка» в выходном сигнале детектора.

тами. Традиционные методы детектирования в этом случае работают весьма плохо, т.к. фильтрация несущей становится затруднительной ввиду значительной близости несущей и модулирующей частот. При использовании энергетического детектора с многократной обратной связью происходит разнесение величин этих частот, что облегчает задачу фильтрации «остатка» несущего колебания. На рис. 6 в качестве примера приведены результаты компьютерного моделирования работы энергетического детектора с двукратной обратной связью для случая АМ-сигнала при $\omega_0/\Omega = 3$ с помощью Math Cad. Для сравнения

здесь же представлены напряжения на выходе детектора без обратной связи (рис. 6б) и на выходе детектора с однократной обратной связью (рис. 6в).

При компьютерной реализации алгоритма энергетического детектирования не наблюдалось каких-либо искажений сигнала, связанных с большим количеством операций, проводимых в режиме пакетной обработки или в непрерывном режиме с группами точек. Производная модулирующей функции рассчитывалась методом параболической интерполяции по трем непрерывно идущим точкам. При этом рассчи-

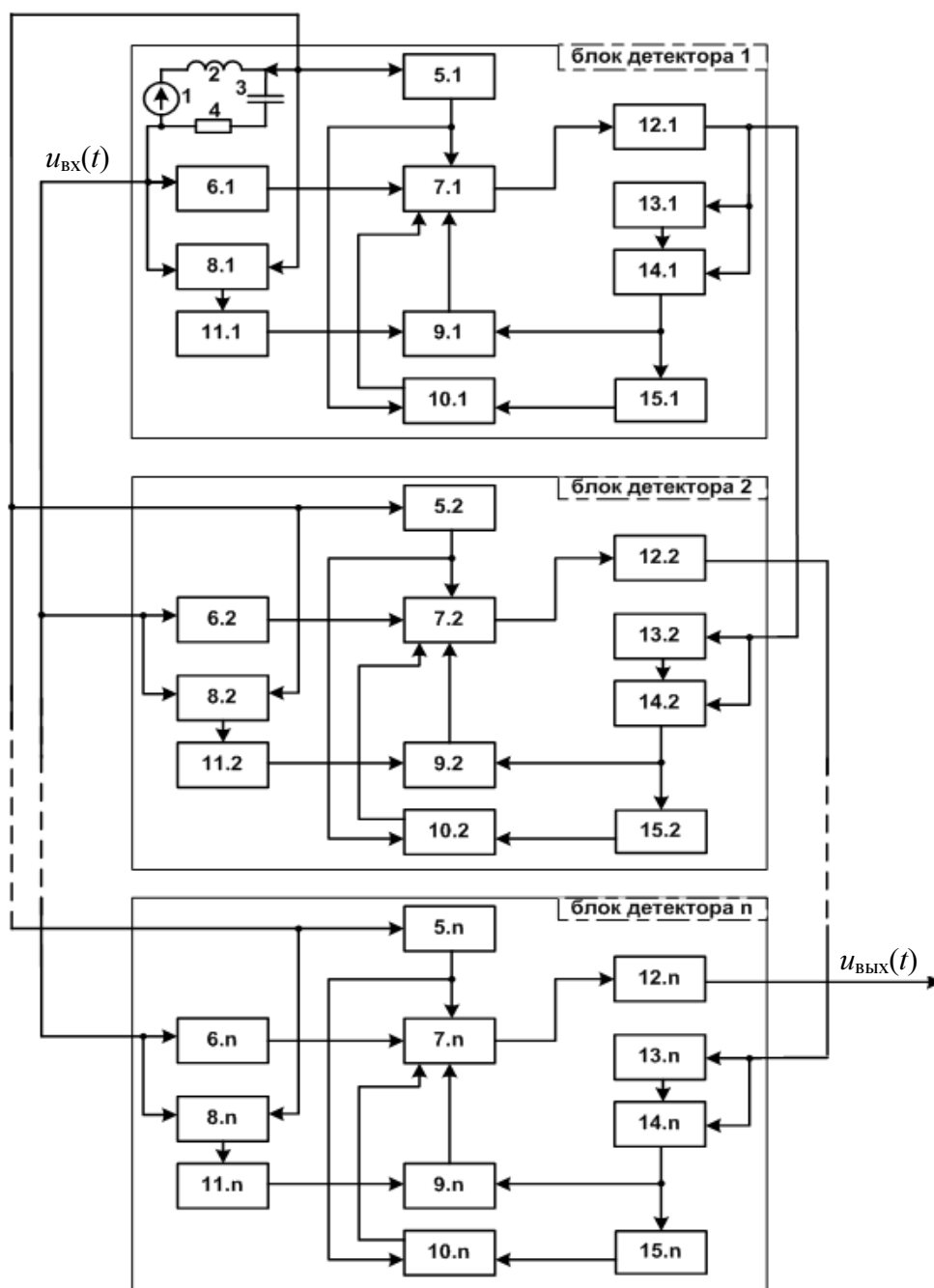


Рис. 5. Функциональная блок-схема энергетического детектора с многократной обратной связью

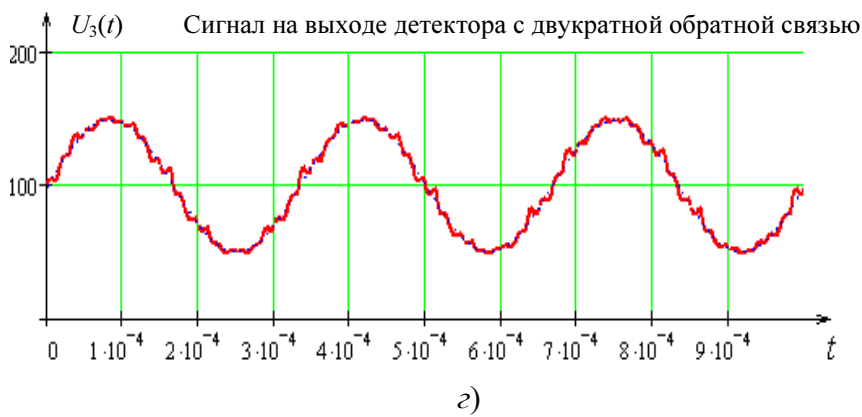
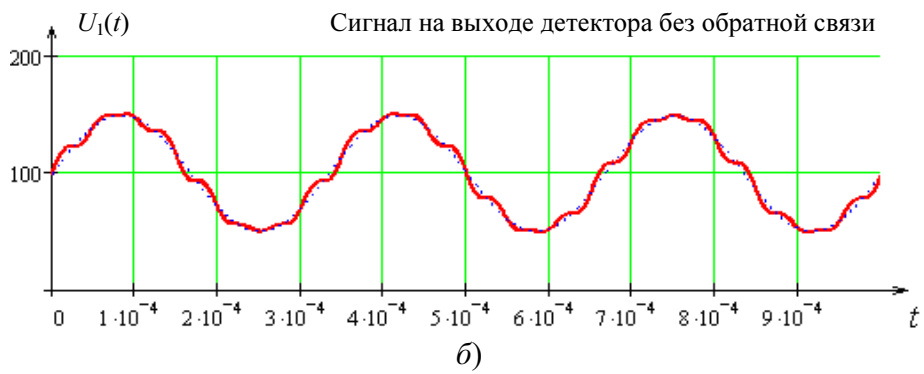
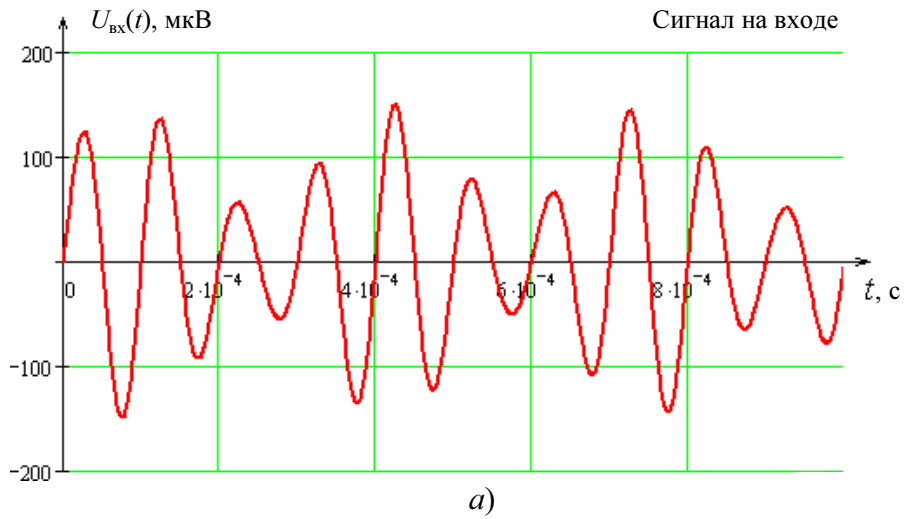


Рис. 6. Сигнал на выходе энергетического детектора при $\omega_0/\Omega = 3$

ывались коэффициенты параболы. В процессе последовательно выполнялся ряд операций, предусмотренных алгоритмом. Так как скорости выполнения различных операций могут не совпадать, то перед некоторыми элементами устанавливалась задержка в виде очереди. Для получения одного выходного значения требуется некоторое число отсчетов. Поэтому возможна непрерывная обработка без использования внешнего ОЗУ с запоминанием отсчетов и промежуточных результатов в регистрах процессора. После получения очередного значения модулирующей функции отбрасывается самый старый отсчет, получаем новый и выполняем алгоритм с изменившимися данными.

Заключение

Из полученных результатов следует, что энергетический детектор с обратной связью обладает определенными преимуществами не только по сравнению с энергетическим детектором без обратной связи, но также и по сравнению с диодным и синхронным детектором. Эти преимущества заключаются, прежде всего, в безынерционности детектора, а также в более высоком качестве формы выходного сигнала при достаточно малом отношении несущей и модулирующей частот АМ-сигнала. Возрастание уровня «остатка» обусловлено сближением

частот ω_0 и Ω , при котором происходит рост производной $\dot{U}(t)$ огибающей АМ-сигнала. Однако за счет возрастания частоты колебаний «остатка» обеспечивается лучшая возможность его устранения, то есть фильтрации без какого-либо влияния фильтра нижних частот на работу детектора. Таким образом, введение однократной и многократной обратной связи в функциональную модель энергетического детектора позволило уменьшить величину «остатка» в выходном сигнале по сравнению со случаем отсутствия обратной связи в детекторе.

Список литературы

1. Момот Е.Г. Проблемы и техника синхронного прием. М.: Связьиздат, 1961.
2. А.С. 171027 СССР. МПК Н 03d. Энергетический амплитудный детектор / С.С. Зельманов, Д.В. Агеев. № 871214; заявл. 19.12.1963; опубл. 11.05.1965. Бюл. № 10.
3. А.С. 1385243 СССР, Н 03 Д1 / 06. Энергетический амплитудный детектор / С.С. Зельманов. № 4043505; заявл. 27.03.1986; опубл. 30.03.1988. Бюл. № 12.
4. Патент на изобретение «Энергетический амплитудный детектор с многократной обратной связью» / С.С. Зельманов. № 2351059. Зарегистрирован в государственном реестре изобретений Российской Федерации 27 марта 2009 г. с приоритетом от 03 сентября 2007 г. по заявке № 2007133057.

INERTIALESS PEAK DETECTOR

S.S. Zelmanov

In traditional peak detectors nonlinear or parametric transformation of an AM signal is followed by filtering. This results in detection lag effect and distortions that increase as modulation and carrier frequencies approach each other. We offer and analyze an inertialess algorithm of energy peak detection which performs quite well at rather small ratios of AM signal modulation and carrier frequencies. Computer simulation results confirm certain advantages of the detector proposed.

Keywords: inertialess detector, distortions, energy peak detection, multiple feedback.