

УДК 621.3.013.62

С.С. Зельманов

## СОГЛАСОВАННЫЙ АКТИВНЫЙ ФИЛЬТР ДЛЯ РАДИОИМПУЛЬСА С ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ОГИБАЮЩЕЙ

В статье рассматривается резонансная система с обратным управлением по затуханию, выполняющая функцию фильтра, согласованного с прямоугольным радиоимпульсом. Цепь обратной связи с низкочастотным узлом управления обеспечивает соответствующую форму импульсной характеристики системы. Согласованный фильтр, работающий по низкочастотной огибающей радиоимпульса, более прост в реализации, так как отличается от традиционных фильтров отсутствием ряда функциональных высокочастотных узлов.

Радиоимпульс; обратное управление; импульсная характеристика; согласованный фильтр.

S.S. Zelmanov

## COORDINATED ACTIVE FILTER FOR THE RADIO IMPULSE WITH RECTANGULAR ENVELOPE

The paper examines a resonant system with reversed attenuation control carrying out the function of the filter coordinated with a rectangular radio impulse. The feedback with the low-frequency control unit provides an appropriate form of the pulse characteristic of the system. The coordinated filter working with use of the signal envelope is simpler to realization since it differs from the traditional ones by absence of some functional high-frequency units.

Reversed control; pulse characteristic; coordinated filter; radio impulse.

В работе [1] было показано, что в резонансной системе с обратным управлением по затуханию можно получить необходимую форму её эквивалентной амплитудно-частотной характеристики (ЭАЧХ) в зависимости от параметров низкочастотного узла управления.

На рис. 1 представлена колебательная система с автоматически управляемым затуханием, не вносящая искажений в спектр амплитудно-модулированной ЭДС, действующей на входе контура. Это означает, что напряжение на выходе детектора 1 соответствует закону амплитудной модуляции входного сигнала. Напряжение огибающей АМ-сигнала с выхода амплитудного детектора через цепь управления 2 подается на активный элемент 3, управляющий затуханием системы под действием девиации амплитуды напряжения на выходе системы. При этом роль цепи управления состоит в том, чтобы за счет изменения затухания системы изменить соотношение между амплитудами частотных составляющих спектра АМ-сигнала, а вследствие этого управлять формой ЭАЧХ системы.

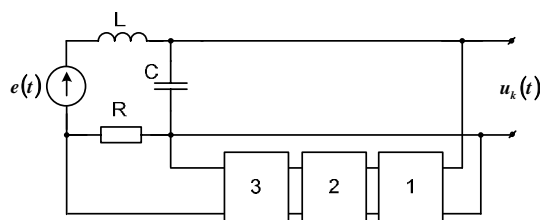


Рис. 1. Колебательная система с автоматически управляемым затуханием:  
1 – амплитудный детектор, 2 – цепь управления, 3 – активный элемент

Определим выражение для эквивалентной амплитудно-частотной характеристики системы и его связь с параметрами цепи управления.

Эквивалентное затухание системы  $\alpha_{\mathcal{D}}$  должно изменяться по закону, связанному определенным образом с амплитудой ЭДС в системе.

При наличии модуляции уравнение системы будет иметь вид

$$\frac{d^2}{dt^2}(q_0 + q_1) + 2\Gamma(q_0 + q_1)\frac{d}{dt}(q_0 + q_1) + \omega_0^2(q_0 + q_1) = \frac{1}{L}[e_0(t) + e_1(t)], \quad (1)$$

где  $[e_0(t) + e_1(t)] = E_0 \cos \omega_0 t + \underline{E}_m e^{j\Omega t}$ .

Будем считать приращения ЭДС  $\Delta E_m$  при модуляции достаточно малыми. Можем считать также, что достаточно малыми будут приращения напряжения на выходе системы  $\Delta U_m$ . То же самое можно сказать об уровне  $q_1$  по сравнению с  $q_0$ ,  $\alpha_{\mathcal{D}} = \alpha_0 + \alpha_{\Delta}$ , где  $\alpha_{\Delta}$  – приращение затухания системы. Комплексная амплитуда отклонения амплитуды напряжения ЭДС  $\Delta \underline{E}_{mk} = E_m e^{j\Omega t}$ . Ей соответствует на выходе системы отклонение амплитуды напряжения  $\Delta \underline{U}_{mk} = \frac{Q}{C} e^{j\Omega t}$ . Их отношение (2),

$$\underline{k}_A(\Omega) = \frac{\Delta \underline{U}_{mk}}{\Delta \underline{E}_{mk}} = \frac{Q}{E_m C}, \quad (2)$$

т.е. зависимость  $\underline{k}_A(\Omega)$  мы будем называть **эквивалентной амплитудно-частотной характеристикой (ЭАЧХ) системы** по отношению к малым гармоническим отклонениям амплитуды ЭДС.

Решая уравнение системы (1), можно показать, что оно определяет переход от комплексной амплитуды гармонической составляющей отклонения амплитуды ЭДС к комплексной амплитуде гармонической составляющей отклонения амплитуды напряжения на контуре (или заряда) в виде соотношения

$$\underline{k}_A(\Omega) = \frac{\omega_0}{2} \frac{1}{\left[ \left( \alpha_0 + \frac{2k_y}{C} Q_0 \right) + j\Omega \right]}, \quad (3)$$

где  $Q_0 = \frac{E_0}{2\alpha_0\omega_0 L}$ ,  $\underline{k}_y = k_{yR} + jk_{yx} = k_y e^{j \arctg \frac{k_{yx}}{k_{yR}}}$  коэффициент чувствительности управляющего тракта. Выражение (3) для модуля ЭАЧХ системы может иметь различный характер в зависимости от вида схемы четырехполюсника в цепи управления, т.е. от его коэффициента передачи.

$k(j\Omega) = k_R + jk_X$ . С учетом этого его можно представить в виде (4):

$$k_A = \frac{Q}{\sqrt{(1 + 2k_R)^2 + \left( \frac{\Omega}{\alpha_0} + 2k_X \right)^2}}. \quad (4)$$

Из рассмотренной теории системы с автоматически управляемым затуханием следует:

1. Выбор параметров цепи управления позволяет изменять форму ЭАЧХ системы.

2. Форма ЭАЧХ системы является динамичной. Она существенно зависит от закона амплитудной модуляции в сигнале и от характера спектра этого сигнала.

Все это позволяет предположить возможность создания на базе системы с управляемым затуханием согласованного активного фильтра для радиосигналов с различной формой огибающей. Рассмотрим подробно эту возможность на примере активного фильтра, согласованного с прямоугольным радиоимпульсом.

Известно, что импульсная характеристика  $h_{\delta}(t)$  согласованного фильтра является зеркальным отображением сигнала  $u(t)$ , с которым этот фильтр согласован:

$$h_{\delta}(t) = aU(t_0 - t)\cos \omega_0(t_0 - t), \tag{5}$$

где  $a = const$ ;  $t_0$  – длительность сигнала.

Схема такого фильтра для одиночного прямоугольного радиоимпульса в соответствии с [2] представлена на рис. 2.

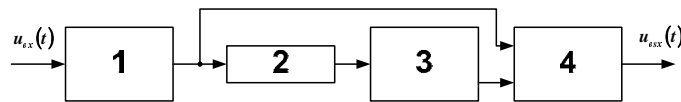


Рис. 2. Функциональная блок-схема согласованного фильтра:

1 – высокоизбирательный резонансный усилитель; 2 – задерживающее устройство на время  $\tau$ , равное длительности импульса; 3 – фазовращатель на угол  $\varphi(\tau)$ ; 4 – вычитающее устройство

Определенным недостатком такой схемы является конструктивная сложность реализации ряда функциональных операций с высокочастотным сигналом в блоках 2, 3, 4.

Этот недостаток может быть устранен, если согласованный фильтр построить на основе колебательной системы с обратным управлением [3]. Функциональная блок-схема согласованного фильтра с управлением по огибающей радиоимпульса представлена на рис. 3.

При подаче  $\delta$ -импульса на вход высокоизбирательного резонансного усилителя 1 напряжение на его выходе будет иметь вид

$$h_{\delta C}(t) = \omega_0 e^{-\alpha t} \sin \omega_0 t, \tag{6}$$

где  $\alpha \ll 1$ .

Напряжение с выхода резонансного усилителя подается на амплитудный детектор 2. Поскольку фильтр обладает высокой добротностью, то огибающая напряжения (6) на выходе детектора достаточно близка по форме к скачку напряжения вида  $u_g(t) = \omega_0 1(t)$ .

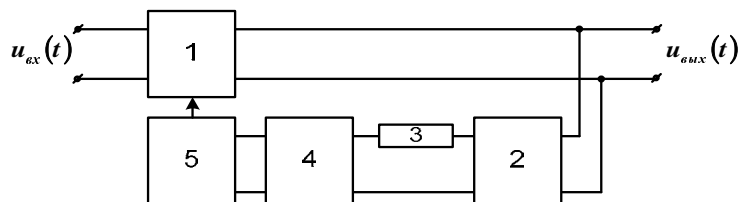


Рис. 3. Функциональная блок-схема согласованного фильтра с обратным управлением по огибающей радиоимпульса: 1 – высокоизбирательный резонансный усилитель; 2 – амплитудный детектор; 3 – устройство задержки; 4 – вычитающее устройство; 5 – активный элемент

Таким образом, высокоизбирательный резонансный усилитель (ВИРУ) вместе с амплитудным детектором представляет собой интегрирующее звено согласованного фильтра. Низкочастотный узел управления фильтром необходимо выполнить так, чтобы его переходная характеристика с точностью до постоянного множителя соответствовала требуемому закону изменения прямоугольной огибающей радиоимпульса  $U(t_0 - t)$ . Поэтому с выхода амплитудного детектора напряжение подается на устройство задержки 3, которое задерживает сигнал на время  $t_0 = \tau$ , равное длительности радиоимпульса. Напряжения с выходов детектора и устройства задержки подается на вычитающее устройство 4. С учетом этого переходная характеристика низкочастотного узла схемы фильтра будет иметь вид

$$h_{\delta}(t) = U(t_0 - t). \quad (7)$$

Напряжение (7) при подаче его на вход управляемого активного элемента 5 обеспечит резкое изменение затухания контура по закону  $U(t_0 - t)$  – огибающей радиоимпульса, что приведет к срыву в контуре колебаний, возникших под действием  $\delta$ -импульса. В результате на выходе контура сформируется напряжение радиоимпульса, то есть импульсная характеристика фильтра, согласованного с радиоимпульсом, обладающим прямоугольной огибающей.

При подаче на вход фильтра радиоимпульса с прямоугольной огибающей высокоизбирательный резонансный усилитель (ВИРУ) обеспечит линейное нарастание амплитуды колебания до максимума в течение времени действия импульса. Низкочастотный узел схемы, включающий детектор, устройство задержки на время действия импульса и вычитающее устройство, обеспечат с момента окончания действия импульса нарастающее по времени управление затуханием контура и соответствующее плавное уменьшение амплитуды колебания на выходе фильтра.

Определим форму ЭАЧХ фильтра, созданного на основе колебательной системы с управляемым затуханием. Пусть сигнал на входе ВИРУ системы имеет вид

$$u(t) = U(t) \cos \omega_0 t, \quad (8)$$

где  $U(t)$  – прямоугольная огибающая радиоимпульса, совпадающая по форме со своим зеркальным отображением. Тогда в соответствии с (3) требуемый комплексный коэффициент передачи цепи управления будет

$$k(j\Omega) = \frac{U(j\Omega)}{U_{1(t)}(j\Omega)} = k_R + jk_X, \quad (9)$$

где  $U(j\Omega) = U(\Omega) e^{-j\varphi(\Omega)}$  – спектр огибающей радиоимпульса;  $U_{1(t)}(j\Omega) = -j1/\Omega$  – спектр единичного скачка напряжения.

Представим выражение (10) для спектра прямоугольной огибающей радиоимпульса:

$$U(j\Omega) = U_m \tau \frac{\sin(\Omega\tau/2)}{(\Omega\tau/2)} e^{-j(\Omega\tau/2)} = U(\Omega) e^{-j\varphi(\Omega)}, \quad (10)$$

где  $U(\Omega) = U_m \tau \frac{\sin(\Omega\tau/2)}{(\Omega\tau/2)}$ ;  $\varphi(\Omega) = \frac{\Omega\tau}{2}$ ,  $U_m$  – амплитуда,  $\tau$  – длительность.

С учетом этого выражение (9) может быть приведено к виду

$$k(j\Omega) = \Omega U(\Omega) \sin \varphi(\Omega) + j\Omega U(\Omega) \cos \varphi(\Omega) = k_R + jk_X. \quad (11)$$

Подставив (11) в формулу (4), получим для модуля ЭАЧХ системы

$$k_A = \frac{Q}{\sqrt{\left[1 + 2\Omega U(\Omega) \sin \varphi(\Omega)\right]^2 + \left[\frac{\Omega}{\alpha_0} + 2\Omega U(\Omega) \cos \varphi(\Omega)\right]^2}}. \quad (12)$$

После подстановки (10) в (12) примем  $\alpha_0 = 1/\tau$ , тогда получим окончательное выражение (13) для модуля ЭАЧХ фильтра, согласованного с прямоугольным радиоимпульсом:

$$k_A = \frac{Q}{\sqrt{\left[1 + 4U_m \left(\sin \frac{\Omega\tau}{2}\right)^2\right]^2 + \left[\Omega\tau + 4U_m \sin \frac{\Omega\tau}{2} \cos \frac{\Omega\tau}{2}\right]^2}}, \quad (13)$$

где  $Q$  – добротность контура. График модуля ЭАЧХ согласованного фильтра при  $Q = 10$  представлен на рис. 4 (кривая 2).

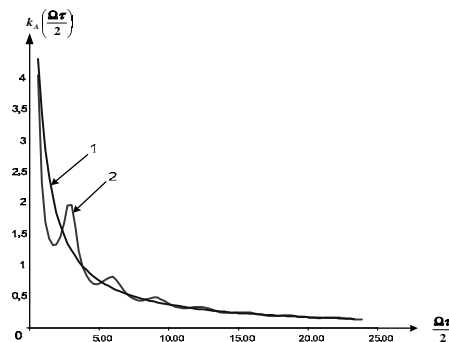


Рис. 4. Эквивалентная АЧХ согласованного фильтра с обратным управлением по огибающей радиоимпульса: 1 – ЭАЧХ фильтра без управления; 2 – ЭАЧХ согласованного фильтра при  $Q = 10$

Таким образом, обработка радиоимпульса с прямоугольной формой огибающей может проводиться согласованным фильтром с обратным управлением по огибающей радиоимпульса.

Совершенно очевидно, что при соответствующем выборе схемы цепи управления в системе такого вида может проводиться обработка радиоимпульсов с произвольной формой огибающей.

Такое техническое решение значительно упрощает реализацию согласованного фильтра.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зельманов С.С. Критерий резонанса и резонансные явления в обобщенном двухполоснике // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 2 (91). – С. 31-38.
2. Лезин, Ю.С. Оптимальные фильтры и накопители импульсных сигналов. – М.: Сов. радио, 1963. – С. 319.
3. Зельманов С.С. Развитие теории резонанса в линейных стационарных и управляемых системах. Детектирование обобщенных АМ и ЧМ-колебаний // Монография // Московский технический университет связи и информатики. Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2007. – С. 199.

**Зельманов Самуил Соломонович**

Московский технический университет связи и информатики (Волго-Вятский филиал).

E-mail: zelmanss@yandex.ru

603011, г. Нижний Новгород, ул. Менделеева, 15.

Тел.: 88312457505.

**Zelmanov Samuil Solomonovich**

Moscow Technical University of Communication and Information Sciens (Volgo-Vyatskiy Branch).

E-mail: zelmanss@yandex.ru.

15, Mendeleev street, Nizhny Novgorod, 603011, Russia.

Phone: +78312457505.

УДК 621.396

**Ю.М. Туляков**

### **ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СОТОВОЙ И «ШИРОКОЗОНОВОЙ» СИСТЕМ СВЯЗИ**

*Дается оценка эффективности дополнения сотовых систем «широкозонными» (радиальными) наземными системами связи по критерию пространственной надежности связи с заданной помехоустойчивостью. Определяется методика оценки повышения пространственной надежности за счет такого дополнения.*

*Помехоустойчивость и надежность связи; сотовая и радиальная связь; вероятность ошибки; интегральная функция распределения вероятности случайной величины.*

**Yu.M. Tulyakov**

### **EFFICIENCY OF INTERACTION OF THE CELLULAR COMMUNICATION SYSTEM AND SYSTEM WITH THE BIG RADIUS OF ACTION**

*The estimation of efficiency of the cellular systems added with radial systems of communications, is made. Criterion of an estimation is spatial reliability of communication with the specified noise stability. The technique of an estimation of increase of spatial reliability at the expense of such addition is defined.*

*Noise stability and reliability of communication; Cellular and radial communication; Probability of an error; Integrated function of distribution of probability of a random variable.*

Сотовые системы подвижной связи обладают рядом преимуществ по сравнению с «широкозонными» наземными системами, строящимися в основном на радиальных или много радиальных принципах. При радиальном построении системы связи базовые станции (БС) работают синхронно с одинаковыми сигналами, каждая из которых обслуживает свою «радиальную зону». Примерами такого способа могут служить системы персонального радиовызова (пейджинг). В таких системах стараются увеличить зону действия каждой БС, например, за счет увеличения мощности ее радиопередатчика, повышения чувствительности радиоприемника (при двусторонней связи) и высоты подвеса антенн.

Из-за того, что все абоненты находятся в такой единой зоне, абонентские трафиковые возможности таких систем весьма ограничены, чего нельзя сказать о системах сотовой связи, в которых ограниченные размеры зоны действия БС (соты), работающих с разными сигналами (или по частоте, или по форме), ограничены, главным образом, способностью обслужить (пропустить трафик) необходимого количества абонентов.