

## **Пороговые сигналы при линейных видах модуляции**

О.А. Большов

*В данной статье представлены результаты исследований, направленных на обеспечение информационной безопасности радиоканалов связи, по которым передаются речевые сообщения. На основании эмпирических данных о порогах слуховой чувствительности человека определены некоторые пороговые соотношения сигнал/шум на входе разведывательного приемника, при которых оператор разбирает сообщения слабо, на пределе возможного.*

*Полученные данные предназначены для разработки норм защищенности аналоговых радиоэлектронных средств и систем связи.*

Информационная революция, происшедшая в мире за последние годы привела к интенсивному развитию средств связи и вычислительной техники. Однако, наряду с интенсивным развитием средств и систем передачи все более значимой становится проблема защиты информации. Защита информации в системах связи - весьма важная составляющая обеспечения гарантий безопасности личности. Но не только этого. Различные системы и сети связи всегда использовались для передачи информации конфиденциального характера и с более или менее высоким эффектом применяли разнообразные способы защиты от ущерба, который может быть причинен несанкционированным доступом к циркулирующим в системах сведениям. Разнообразие средств и способов защиты информации в системах едва ли меньше, чем способов информационной агрессии против таких систем. Но целесообразность применения средств и методов обеспечения информационной безопасности должна определяться качеством речи в акустическом канале разведывательного приемника. До тех пор пока оператор средств перехвата не разбирает речевые сообщения нет необходимости в противодействии радиоэлектронной разведки противника. Но разбирает речевые сообщения - и уже требуется разрабатывать специальные методы и обосновывать оптимальные мероприятия по маскировке речевых сообщений от технических средств оппонента. Сказанное позволяет утверждать, что актуальной является проблема определения пороговых уровней безопасных мощностей сигналов как в акустических, так и в радио- каналах утечки речевой информации.

Анализ современного рынка систем и средств телекоммуникаций, научных, технических и прочих публикаций, условий работы национальных, региональных и корпоративных систем связи и передачи данных показывает следующее. Наряду с интенсивным развитием средств и систем передачи все более актуальной становится проблема обеспечения защиты радиоэлектронных средств телекоммуникаций от несанкционированного доступа к информации. Для этого много разных причин. Но, прежде всего, в этой связи особенно важно отметить следующее. Во – первых,

многообразии средств и способов защиты информации в системах связи едва ли меньше, чем способов информационной агрессии против таких систем. При этом вопрос о целесообразности применения средств и методов обеспечения информационной безопасности решался и сейчас решается на основе инженерной ситуации, на практическом опыте. Поэтому представляет интерес разработать методический аппарат оценки степени опасности угроз утечки речевой информации в процессе функционирования связных систем. Во – вторых, целью защищаемой системы является организация линии передачи или извлечения информации с требуемым уровнем показателя качества (скоростью и достоверностью передачи информации, разборчивостью в акустическом канале приемника абонента и т.п.). Последнее положение необходимо особенно подчеркнуть. Условия, при выполнении которых возможно качественное выделение речевого сообщения, известны. Однако, эти условия были определены не строго, упрощенно и в основном для области сильных сигналов (особых помех). А для систем и средств защиты речевой информации от перехвата, напротив, интересна оценка пороговых, минимальных по мощности сигналов, исключающих возможность доступа постороннего пользователя к передаваемым сообщениям.

Качество и даже возможность выделения аналогового речевого сообщения приемником средства разведки определяется соотношением сигнал/шум в полосе сигнала, то есть в полосе акустического канала, оканчивающегося слуховым аппаратом оператора средства радиоразведки. Критерием качества приема при этом считается вероятность правильного узнавания слога оператором. Эта вероятность нелинейно зависит от соотношения сигнал/шум. Экспериментальная зависимость разборчивости речи, измеренной как вероятность правильного узнавания слога, от соотношения сигнал/шум в канале приведена на рис.1 [1].

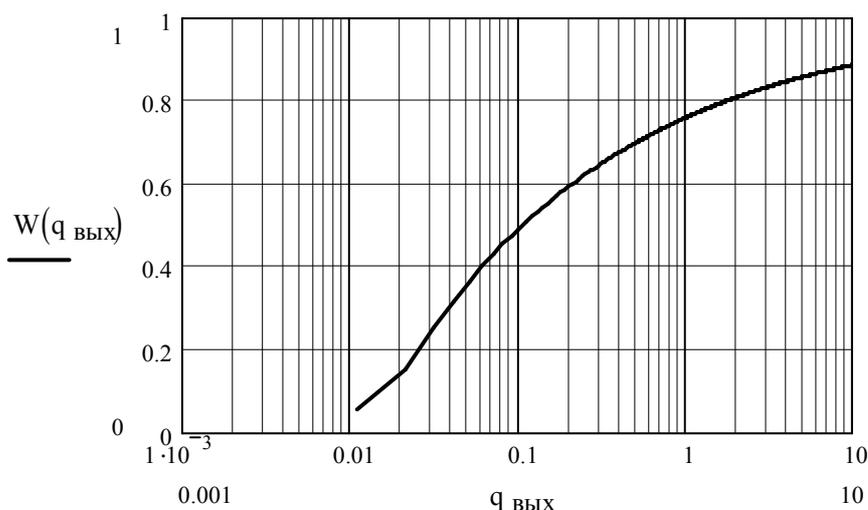


Рис.1. Зависимость вероятности правильного узнавания слога от соотношения сигнал/шум в акустическом канале.

Аппроксимация кривой разборчивости речи рис.1, дается соотношениями:

$$W(q_{\text{ВЫХ}}) = \begin{cases} 1 - 0.242 \cdot q_{\text{ВЫХ}}^{-0.325} & ; q_{\text{ВЫХ}} \geq 0.025 \\ 50 \cdot q_{\text{ВЫХ}}^{1.5} & ; q_{\text{ВЫХ}} < 0.025 \end{cases} \quad (1)$$

Считается, что для удовлетворительной разборчивости речи необходимо обеспечить  $W=0,2$ . Как видно из рис.1, этому условию отвечает соотношение сигнал/шум на уровне  $q_{\text{ВЫХ}}=0,026$ . В дальнейшем для определения порогового сигнала используются обе величины: пороговая вероятность для разборчивости  $W=0,2$  и пороговое соотношение сигнал/шум  $q_{\text{ВЫХ}}=0,026$ . В радиоканале утечки информации (перехвата) действует сигнал  $s(t)$ , модулированный сообщением  $x(t)$ . Считается, что сообщение (модулирующая функция) нормировано к единице  $|x(t)| < 1$ . Спектр сообщения сосредоточен в полосе  $f_x \in (0; F_{\text{max}}]$ . Это сообщение модулирует несущее колебание частоты  $f_0$ . Модулированный сигнал  $S(x(t))$ . Ширина спектра сигнала не уже полосы сообщения. Средняя мощность сигнала на входе приемника средства разведки  $P_c$ , мощность шума –  $P_{\text{ш}}$ . Так, что соотношение сигнал/шум, приведенное ко входу приемника  $q_{\text{ВХ}} = P_c / P_{\text{ш}}$ . Кроме того считается, что шум имеет равномерную спектральную плотность  $N_0 = P_{\text{ш}} / \Delta f$  в полосе  $\Delta f$ , занятой спектром сигнала. Относительно способа модуляции считается, что сигнал  $s(t)$  модулирован сообщением по амплитуде.

При обычной АМ:

$$S(t) = a[1 + m_{\text{ам}} \cdot x(t)] \cdot \cos 2\pi f_0 t \quad (2)$$

Ширина спектра сигнала в два раза больше ширины спектра модулирующей функции:

$$\Delta f_{\text{ам}} = 2F_{\text{max}} \quad (3)$$

При балансной модуляции (БМ):

$$S(t) = a \cdot x(t) \cdot \cos 2\pi f_0 t \quad (4)$$

а ширина спектра такая же, как и при обычном АМ:

$$\Delta f_{\text{бм}} = \Delta f_{\text{ам}} = 2F_{\text{max}} \quad (5)$$

При амплитудной модуляции с одной боковой полосой (ОБП) спектр сообщений переносится из полосы  $(0; F_{\max}]$  в полосу  $(f_0; f_0 + F_{\max}]$  или  $(f_0; f_0 - F_{\max}]$ , поэтому ширина спектра модулированного сигнала принимается равной ширине спектра сообщения, то есть:

$$\Delta f_{\text{ОБП}} = F_{\max} \quad (6)$$

Считается также, что приемники, для выделения сообщения  $x(t)$ , реализуют оптимальные алгоритмы демодуляции сигнала  $s(t)$ . Оптимальный в том смысле, что любой технически реализуемый, а тем более - реальный приемник - не может обеспечить лучшего воспроизведения сообщения.

Полученные при таких условиях оценки качества воспроизведения сообщения оказываются верхними, пессимистическими для системы противодействия: реальный приемник средства разведки может работать только хуже оптимального.

Полная мощность сигнала распределена между зависящими от сообщения (информационными) компонентами и спектральной составляющей на частоте несущего колебания:

$$P_c = \frac{1}{T} \int_0^T s^2(t) dt \quad (7)$$

При АМ из (2) и (7) следует, что:

$$P_{\text{сам}} = \frac{a^2}{2} (1 + m_0^2) \quad P_{\text{ам}} = P_0 + P_0 \cdot m^2 \quad (8)$$

где  $P_0$  – мощность на несущей, равная мощности немодулированного колебания (сигнала при  $x(t)=0$ );

$P_{\text{сам}}; m^2$  - суммарная мощность в боковых полосах – именно эта мощность переносится на выход демодулятора АМ колебания.

При балансной модуляции:

$$P_c = \frac{a^2}{2} = P_0 \quad (9)$$

это отражает очевидный факт, состоящий в том, что при БМ мощность на несущей равна нулю (если только модулирующая функция не содержит постоянной составляющей, как это имеет место, например, при передаче речи) и вся мощность сигнала сосредоточена в боковых полосах спектра.

При передаче с ОБП вся мощность сигнала приходится на информационные спектральные компоненты, как и при БМ. Но ширина спектра сигнала при ОБП в два раза уже, чем при простой

АМ и при БМ. То есть ширина спектра сигнала равна (примерно) ширине спектра сообщения. Поскольку спектр шума в полосе приемника равномерный, при фиксированной мощности передатчика соотношение сигнал/шум на выходе демодулятора сигнала с ОБП будет в 2 раза больше, чем при БМ и в  $2/m_{ам}^2$  раз больше, чем при обычной АМ. Но если нормируется не мощность передатчика, а соотношение сигнал/шум на входе приемника, то следует считать, что соотношение сигнал/шум на выходе демодулятора при БМ и при ОБП будет одинаковым. Линейность связи  $x(t)$  и  $s(t)$  принципиально допускает линейность оператора демодуляции. Именно так строятся оптимальные демодуляторы сигналов с АМ, БМ и ОБП. Поскольку при линейных преобразованиях не происходит подавление сигнала шумом, в результате оптимальной демодуляции (в принципе) не изменяется соотношение сигнал/шум. Следовательно, учитывая (8) и (9), можно построить обменную диаграмму между входом приемника радиоразведки и коэффициентом глубины АМ при фиксированном соотношении сигнал/шум на выходе демодулятора  $q_{вых}$ . Эта диаграмма в координатах  $q_{вх} - m_{ам}$  там представлена на рис.2. для определенного выше порогового соотношения  $q_{вых} = 0,026$ .

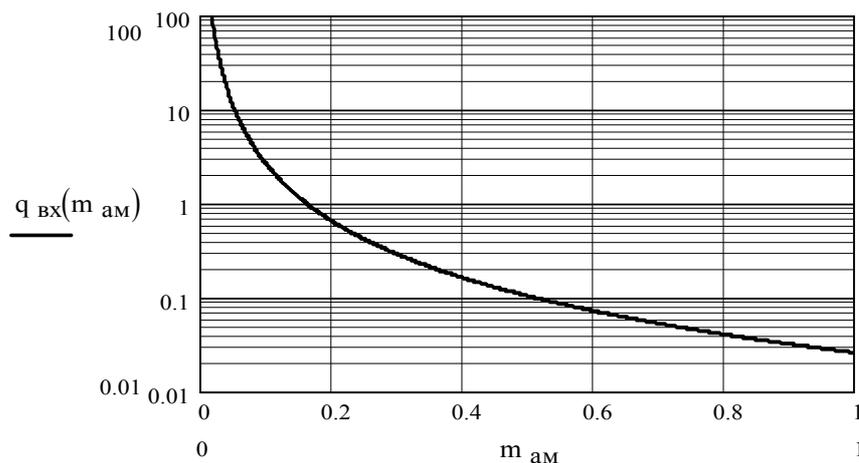


Рис.2. Диаграмма для определения порогового соотношения сигнал/шум в полосе приемника радиоразведки, при котором обеспечивается сигнал/шум в акустическом канале  $q_{вых}=0.026$  (разборчивость  $W=0.2$ ).

Модуляциям ОБП и БМ соответствует точка  $m_{ам} = 1, q_{вх} = 0,026$  на диаграмме рис.2.

По диаграмме рис.2, для известного значения коэффициента глубины модуляции  $m_{ам}$  определяется пороговое соотношение сигнал/шум на входе (в полосе приемника радиоразведки), при котором обеспечивается выходное соотношение сигнал/шум не ниже минимального для обеспечения разборчивости речи.

Все полученные результаты справедливы в предположении о линейности демодулятора, работающего без подавления, то есть не увеличивающего уровень выходного шума по сравнению со входным. Это утверждение является довольно сильной идеализацией по следующим причинам:

1. Линейный демодулятор - это синхронный детектор, использующий перемножение входного принятого сигнала, наблюдаемого в аддитивной смеси с шумом, опорным колебанием, когерентным составляющей на несущей частоте. Для формирования такого когерентного колебания необходим следящий фильтр. Обычно в качестве такого фильтра используют ФАПЧ. Но система ФАПЧ не может иметь бесконечно узкую полосу. Следовательно, сформированное им опорное колебание непременно будет содержать шумовую компоненту с мощностью:

$$P_{\text{ш оп}} = N_0 \Delta f_{\text{ш}} \quad (10)$$

где  $\Delta f_{\text{ш}}$  – эквивалентная шумовая полоса системы ФАПЧ.

Этот шум статистически независим от выходного шума демодулятора и, следовательно, складывается с ним по мощности, уменьшая тем самым выходе соотношение сигнал/шум:

$$q'_{\text{вых}} = \frac{P_{\text{сшоп}}}{P_{\text{ш}} + P_{\text{шоп}}} \cong q_{\text{швх}} \cdot \left(1 + \frac{P}{P_{\text{ш}}}\right) = q_{\text{швх}} \cdot \left(1 + \frac{\Delta f_{\text{ш}}}{F_{\text{max}}}\right) \quad (11)$$

2. Сам синхронный детектор технически невозможно выполнить в виде идеального перемножителя. Обычно перемножитель двух колебаний  $u_1(t)$  и  $u_2(t)$  работает в соответствии с правилом:

$$u_1(t) \cdot u_2(t) = 0.25 \cdot [(u_1(t) + u_2(t))^2 - (u_1(t) - u_2(t))^2] \quad (12)$$

то есть по схеме:

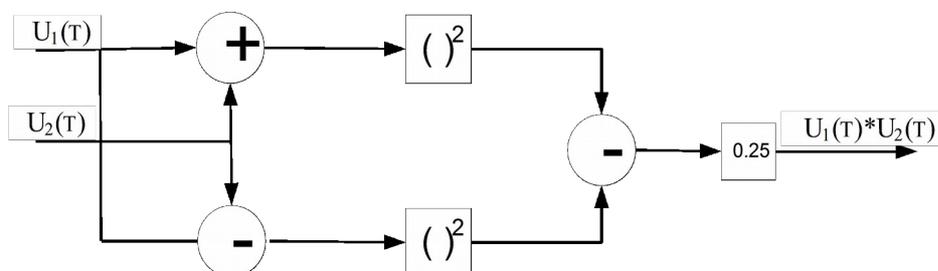


Рис.3. Схема перемножителя для построения синхронного детектора.

В частности, подобные технические решения применяют при использовании в качестве фазовых детекторов балансных перемножителей, фазовых детекторов, интегральных перемножителей на основе дифференциальных каскадов.

Если схемы возведения в квадрат неидентичны, после выходного вычитающего устройства не будет полной компенсации случайных (шумовых) компонент, образованных биениями сигнала с шумом на нелинейностях квадраторов. Этот эффект проявляется тем сильнее, чем меньше соотношение сигнал/шум на входе. Если считать, что обычная инструментальная точность возведения в квадрат составляет порядка 5% (это характерный уровень приведенной погрешности хорошего квадратичного вольтметра), то разница погрешностей двух независимых квадраторов будет в  $\sqrt{2}$  раз больше - примерно 7%. На эти 7% увеличится мощность флюктуационной составляющей шума на выходе перемножителя (синхронного детектора). Соответственно на эту же величину уменьшится выходное соотношение сигнал/шум.

3. В спектре балансно-модулированного сигнала отсутствует составляющая на несущей частоте. Поэтому для демодуляции такого колебания необходимо применять специальные схемы восстановления несущей. Такие схемы используют нелинейные преобразования входного процесса. Но нелинейные преобразования всегда сопровождаются подавлением сигнала шумом.

4. Демодулятор сигнала с ОБП - это смеситель, переносящий спектр входного колебания из окрестности частоты несущего  $f_0$  в полосу сообщения  $(0; F_{\max}]$ . Для реализации возможности такого переноса обычно в спектре сигнала с ОБП оставляют несущую, пропорционально уменьшая тем самым мощность сигнальных составляющих. Кроме того, при демодуляции колебаний с ОБП возможны подавления слабого сигнала шумом на нелинейностях смесителя. Но эти эффекты поддаются учету только для конкретных схем демодуляторов и структур модулированного сигнала.

5. Если вместо синхронного детектора, оптимального для выделения сигнала с линейной модуляцией из шума, используется амплитудный детектор, демодуляция принципиально будет сопровождаться подавлением слабых сигналов, когда  $q_{\text{вх}} < 1$ . Известно [3], что амплитудный детектор при слабых сигналах хорошо описывается моделью квадратичного преобразования входного колебания. В процессе такого преобразования образуются дополнительные флюктуационные составляющие, мощность которых добавляется к мощности шума и уменьшает выходное соотношение сигнал/шум. В [3] показано, что для квадратичного детектора справедливо соотношение (в наших обозначениях):

$$q_{\text{вых}} = \frac{q_{\text{вх}}^2}{1 + 2q_{\text{вх}}} \quad (13)$$

При слабых сигналах, когда  $q_{ВХ} \ll 1$ , из (13) следует, что  $q_{ВЫХ} = 2q_{ВХ}$ . В противоположной ситуации при  $q_{ВХ} \gg 1$  соотношение (13) дает  $q_{ВЫХ} = q_{ВХ} / 2$ , то есть в 2 раза меньше, чем на выходе линейного (и синхронного) детектора. Этот эффект можно объяснить тем, что при квадратичном детектировании сигнал выносит помеху на участки характеристики с большей крутизной. При этом влияние помехи увеличивается, а выходное соотношение сигнал/шум падает, хотя и не так быстро, как при слабых сигналах.

Соотношение (13) получено в предположении, что на квадратичный детектор вместе с узкополосным нормальным шумом действует немодулированный синусоидальный сигнал. Но его можно полностью и точно распространить на случай детектирования прямоугольных радиоимпульсов. Наличие амплитудной модуляции сигнала, если ее рассматривать как медленные изменения амплитуды входного сигнала, не оказывает существенного влияния на изменение выходного соотношения сигнал/шум. То есть и в этом случае соотношение (13) можно рассматривать как оценочное для соотношения сигнал/шум на выходе амплитудного детектора, используемого для демодуляции колебания с линейной модуляции. Разумеется, для таких оценок в (13) следует учитывать мощность только сигнальных, зависящих от сообщения, составляющих сигнала. С учетом сказанного, а также того, что суммарная мощность информационных составляющих в соответствии с (8) составляет  $m^2 a m P_0$ , соотношение (13) можно преобразовать к виду:

$$q_{ВЫХ} = \frac{q_{ВХ}^2 \cdot m_{ам}^4}{1 + 2q_{ВХ} m_{ам}^2} \quad (14)$$

Диаграмма обмена между мощностью входного сигнала и коэффициентом глубины модуляции, аналогичная рис.2. для оптимального демодулятора, приведена на рис. 4.

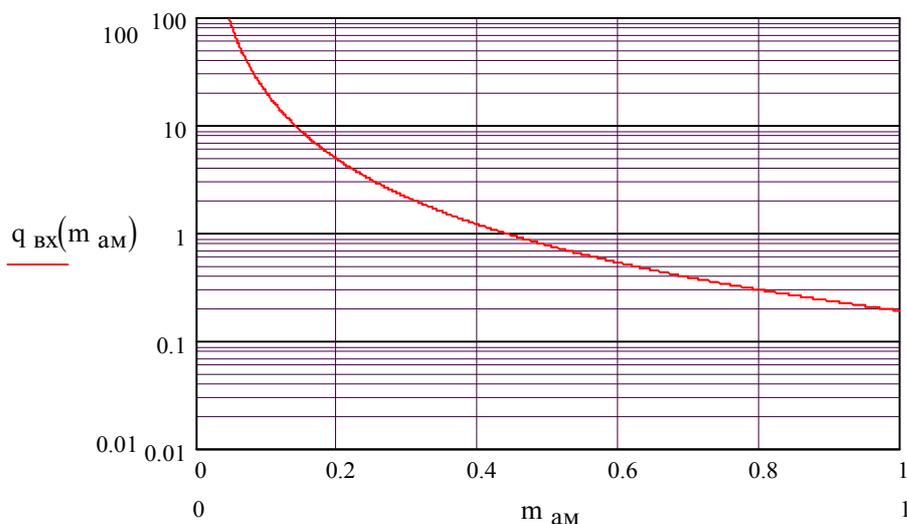


Рис.4. Диаграмма для определения порогового соотношения сигнал/шум на входе квадратичного детектора.

Для сравнения обе диаграммы изображены на одном рис.5 Заштрихованная на рис.5 область содержит все возможные значения для любых практически применимых приемников.

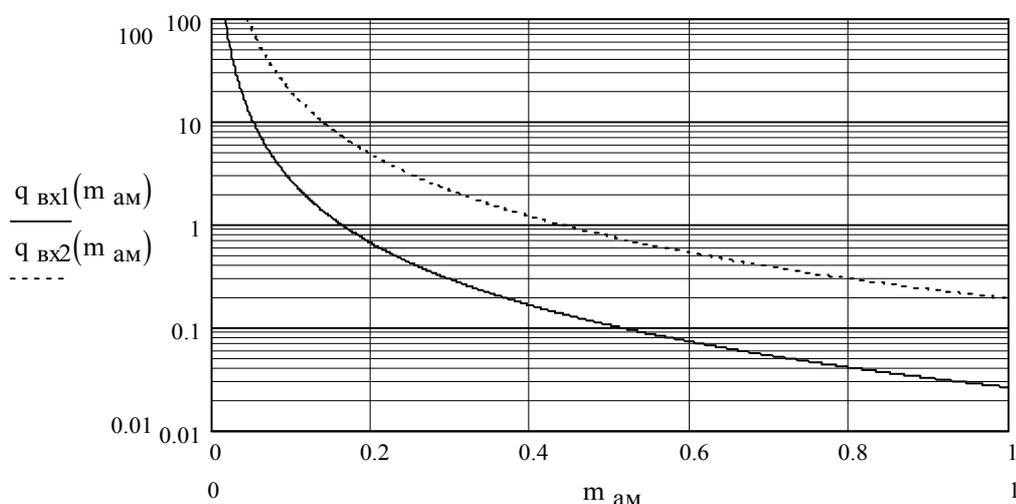


Рис.5. Область разброса пороговых значений сигнал/шум для реальных демодуляторов – от оптимального ( $Q_{вх1}$ ) до квадратичного ( $Q_{вх2}$ , обозначен штриховой линией).

Нижняя граница этой области соответствует оптимальному демодулятору сигнала с линейной модуляции, а верхняя - квадратичному детектору.

Таким образом, заштрихованная на рис.5 полоса дает представление о разбросе оценок порогового соотношения сигнал/шум при линейной модуляции, обусловленном различием моделей процесса демодуляции. Любая реальная схема демодулятора обеспечивает пороговое выходное соотношение сигнал/шум при  $Q_{вх}$  большем, чем нижняя граница заштрихованной на рис.5 области.

Полученные данные могут быть использованы для оценки предельных характеристик защищенности речевого сигнала от перехвата и несанкционированного восстановления сообщения средствами радиоразведки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Покровский Н.Б. Расчет и измерение разборчивости речи. – М.: Радио и связь, 1962. – 392с.
2. Быков Ю.С. Теория разборчивости речи и повышение эффективности радиотелефонной связи. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1959. – 351с.
3. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Радио и связь, 1986. – 612с.
4. Михайлов В.Г. Измерение параметров речи. – М.: Радио и связь, 1987. – 168с.

*Большов Олег Анатольевич, доцент кафедры радиосистем передачи информации и управления Московского авиационного института (государственного технического университета), к.т.н.*