Энергетический расчёт РРЛ

Рассмотрим принципы энергетических расчётов аналоговой радиорелейной линии связи.

Используются понятия:

- *ВТ* – волноводный тракт – антенно-фидерное устройство;

- *А* – антенна;

- *РT* – мощность передатчика;

- *η* – КПД волноводного тракта (включая потери в системе объединения и разделения стволов);

- *G*A – коэффициент усиления антенны;

- *L*0 – ослабление сигнала на пути распространения между антеннами за счёт сферической расходимости фронта волны – затухание мощности радиоволны в свободном пространстве (вакууме);

 - *Lдоп* – дополнительное ослабление сигнала за счёт неоднородности реальной среды распространения, влажности, осадков и других климатических условий;

 - *РR*(80) – уровень мощности радиоволны на входе приёмника, который превышается в течение 80% времени;

 - *РR,min* – минимально-допустимое (пороговое) значение мощности радиоволны, регистрируемое приёмником.

В случае глубоких замираний на одном из пролётов РРЛ мощность входного сигнала может снизиться настолько, что мощность шума на выходе канала превысит допустимое значение (применительно к ГЭЦ - гипотетическая эталонная цифровая линия связи - протяжённостью 2500 км это 47,5 мкВт и продолжительность таких всплесков не должна превышать 0,1% времени).

Уменьшение мощности радиоволны с расстоянием вычисляется выражением для свободного пространства:

 **  (4)

Как видно величина затухания *L*0 зависит от удаления приёмника от передатчика *d*0 и рабочей частоты несущей радиоволны *f.* После преобразования уравнения (4) в логарифмическую форму оно принимает вид:

 *L*0, дБ = 92.4 + 20 lg *f* + 20 lg *d*0, (5)

где *f* - частота в ГГц; *d*0 - расстояние между антеннами в км.[[1]](#footnote-1)

*Lдоп* = *V*²; *V* = *EАR*/*EAT*– множитель ослабления сигнала на пролёте, равный отношению напряжённости поля в точке приёма в реальных условиях к напряжённости поля свободного пространства; *Vmin* – минимально-допустимое значение множителя ослабления (при этом имеем *РR*.*min*).

Коэффициент усиления параболической антенны, как уже было сказано ранее, определяется выражением:

  (6)

где *q* = 5 - 7 – коэффициент использования поверхности антенны; *DA* – диаметр антенны.

 В расчётах обычно принимают, что одновременно на всех пролётах РРЛ мощность сигналов на входах приёмников в течение 80% времени любого месяца не должна падать ниже значения, соответствующего допустимой суммарной псофометрической мощности шумов, определяемой рекомендациями ITU-R. Такой мощности сигнала на входе приёмника с некоторым запасом соответствует коэффициент ослабления *Vmin* ≈ 0,5.

 Мощность сигнала на входе антенны приёмника можно выразить следующей формулой:

 *РАR* = *РАT* /*L*Σ,

где *L*Σ - суммарное ослабление сигнала от выхода передатчика до входа приёмника;

 *РАR*= *РT*·*ηТ*·*GT* ∙*GR*∙*ηR* /*L*Σ .

В этой формуле можно выделить ослабление сигнала, не зависящее от свойств среды распространения (соответственно от времени)

 *Lconst* = *GT*·*GR*· *η*²/*L*0.

Итак, можно выделить три характерных уровня сигнала на входе приёмника:

1. *РR*(100)=*РT*·*Lconst* (идеальный случай);
2. *PR*(80) =*РT*·*Lconst*·0,5² (норм. работа);
3. *РR,min*=*РT*·*Lconst*·*V*²*min* (замирания).

Для проектирования важно знать порог приёмника *РR,min* (обычно указывается изготовителем оборудования). С помощью его можно получить два других важных параметра:

 -коэффициент усиления системы

 *SG*, дБ = *РТ*– *РR,min*;

 - запас на замирание

 *Ft*, дБ =*РR*(100) - *РR,min*= *SG* +*GТ*+*GR* - *L*0 - 2*η*.

# **Расчёт уровней сигналов на интервале РРЛ**

Рассмотрим упрощённую структурную схему интервала радиолинии и соответствующую диаграмму уровней. Очевидно, что качество работы линии связи, определяется уровнем сигнала на входе приёмника *PR* и возможными отклонениями этого уровня при замираниях.

На диаграмме уровней видно, что сигнал излучается передатчиком с уровнем *PТ*, проходит через разделительный фильтр (РФ), в котором уровень упадёт за счёт внутренних потерь и поступает через фидерную линию в передающую антенну с коэффициентом усиления *G*1. За счёт потерь в фидерной линии *ηFT* уровень сигнала ещё уменьшится, а в передающей антенне увеличится на величину *G*1.

При распространении сигнала в интервале РРЛ (протяжённостью *d*0, на рабочей частоте *f*) уровень сигнала упадёт за счёт ослабления в свободном пространстве, потерь в газах атмосферы и некоторых дополнительных потерь. Общее ослабление сигнала за счёт этих причин может достигнуть 130-140 дБ и больше.

Уровень мощности сигнала на входе приёмника *PR*, дБм определяется выражением:

 *РR* = *РT* + *G*1 + *G*2 - *L*0 - *ηT* - *ηR* - *ηFR* - *ηFT* - *Lдоп*,                                     (7)

где *РТ*  - уровень мощности передатчика, дБм; *G*1, *G*2 - коэффициенты усиления передающей и приёмной антенн в дБ, *ηT* и *ηR* коэффициенты преобразования мощности в передающей и приёмной антеннах, *ηTF* и *ηRF* – коэффициенты фидерных потерь в передатчике и приёмнике. При расчётах можно выбрать параметры типовых антенн, задаться диаметрами антенн (для параболических структур) и определить их коэффициенты усиления из соотношения:

*G* = 20lg(*DА*) + 20 lg(*f*) +17.5***,***                                                   (8)

где *DА* - диаметр антенны в метрах,  *f* - рабочая частота в ГГц. Можно также использовать округлённое значение средней частоты выбранного диапазона. При выборе антенн необходимо учитывать, что на практике не применяются антенны с коэффициентами усиления *G* большими, чем 45 - 47 дБ.

В дальнейших расчётах эти параметры можно будет изменять для оптимизации проектируемой линии связи.

Потери мощности разбиваются на две составляющие. Первой составляющей являются аппаратными потерями в приёмопередающих и антенно-фидерных трактах АФТ *η*, а второй составляющей являются потери в среде распространения между передающей и приёмной антеннами *L*.

*η FT* = *η FR* - ослабление сигнала в фидерных линиях, дБ.

*η FТ* =*α⋅* *l*, где *α* - погонное затухание фидера, дБ/м,  *l* - длина фидера в м.

Погонное затухание в фидерных линиях зависит от типа волновода и конструктивных особенностей АФТ, которое можно найти в справочниках[[2]](#footnote-2).

     При отсутствии фидера (когда приёмопередатчики объединены с антенной в виде моноблока) необходимо учитывать конструктивные особенности устройства объединения. При диаметре антенн 30 - 50 см приёмопередающий блок соединяется с антенной непосредственно с помощью прецизионного волновода, тогда потери в АФТ можно принять равными 0 дБ.

При больших диаметрах антенн соединение проводится коротким отрезком гибкого волновода, потери в котором можно принять равными

 *η FТ* = *η FR* = 0.5 дБ.

При моноблочной конструкции, данные на уровень мощности передатчика и пороговые значения уровня сигнала на входе приёмника, часто относятся к точкам, соответствующим уровням на антенном волноводном соединителе (другими словами, в значения уровней уже заложены потери в разделительных фильтрах).

При разнесённой конструкции приёмопередатчиков и антенн, потери в фидерах составляют  4 - 5 дБ (в РРЛ большой ёмкости).

*ηдоп* - дополнительные потери, складывающие из потерь в антенных обтекателях и потерь от перепада высот приёмной и передающей антенн (*ηдоп* = 1 - 2  дБ).

Потери мощности сигнала в среде распространения определяются следующим образом. Потери представляют собой произведение потерь в свободном пространстве *L*0 на дополнительные потери, связанные с отличными от свободного пространства свойствами среды. В дБ суммарные потери определятся сложением значений компонент

 *L*Σ= *L*0 + *Lдоп*.

*Lдоп* в дБ рассчитывается по формулам погонного затухания в среде, а также полосовых затуханий в кислороде и воздушной влаге

  *Lдоп* = *д d эфф* + (*o* +*н*) *d*0, дБ,

где *o*, *н* - погонные затухания в атомах кислорода и в водяных парах атмосферы (дБ/км). Выражения для погонных затуханий в среде *д d эфф*  будут приведены несколько позднее.

**Влияние атмосферы и гидрометеоров на работу РРЛ**

Тропосфера, в которой происходит распространение радиоволн РРС, отличается от свободного пространства. Она имеет определённый состав атмосферных газов, которые, в свою очередь, могут иметь водяные составляющие в виде пара, дождя, снега. К гидрометеорам относятся дожди, снег, град, туман и пр. Влияние гидрометеоров заметно уже при частотах больше 5 ГГц. В неблагоприятных экологических условиях (при наличии в атмосферных осадках металлизированной пыли, смога, кислот или  щелочей) и на значительно более низких частотах. Чем выше частота, тем сильнее это влияние. В рекомендациях МСЭ Земля поделена на 15 дождевых климатических зон (обозначения от *А* до *Q*). Для каждой зоны приведена статистика интенсивности дождя *R*0,01 (мм/час) - значение, превышаемое для 0,01% времени. Для Казахстана это зона *Е*, для которой *R*0,01 =22 мм/час.

Методика учёта влияния гидрометеоров на показатели неготовности линии связи основывается на расчёте ослабления сигнала в атмосферных осадках, вероятность появления которых в данной местности равна 0.01%.

Погонное затухание в дождевых образованиях определяется по  формуле:

 *д =  J *, дБ/км,                                                   (9)

где *J* - интенсивность осадков (мм/час), ** и ** - коэффициенты, которые вычисляются по эмпирическим формулам полиномов третьей степени:

*вертикальная поляризация*

 *αv* = -2.125+ 16.48 (ln *f* )-1 -87.9 (ln *f* )-3 + 232.2 (ln *f* )-5 ,                                   (10)

*βv* = exp [- 12.39+4.1 (ln *f* ) - 0.288 (ln *f* )2 ],                                                       (11)

*горизонтальная поляризация*

 *αh* = - 1.761+ 13.81 (ln *f* )-1 - 62.77 (ln *f* )-3 + 142 (ln *f* )-5,                                      (12)

 *βh* = exp [- 12.76+ 4.365 (ln *f* ) + - 0.324 (ln *f* )2 ],                                                   (13)

Например, для 7 ГГц *βh* =0,00301; *βv* = 0,00265; *αh* = 1,332; *αv* = 1,312) - справочные данные.

Эффективная протяжённость дождевого образования, определяется по формуле:

                                          *dэфф* = *d*0 ⋅ *kд*,                                                        (14)

где *kд* - коэффициент пространственной неравномерности дождя, который находится из следующего графика:



Рис. 12– Зависимость *kд* от длительности пролёта и интенсивности дождя

# **Расчёт влияния атмосферы и гидрометеоров на работу РРЛ**

Процент времени *Tд*, в течение которого уровень сигнала на входе приёмника на пролёте линии связи станет меньше порогового значения для коэффициента ошибок 10-3, что соответствует составляющей показателя неготовности линии связи.

Известно, что гидрометеоры оказывают сильное влияние на работу линий связи при частотах выше 5 ГГц (без учёта экологических условий, приводящих к проявлению их экранирующих свойств и на более низких частотах).

Ослабляющее  действие гидрометеоров оказывает достаточно длительное влияние на качество работы систем связи, ухудшая показатель неготовности (ПНГ). Показатели неготовности складываются из

 ПНГ = ПНГд + ПНГс + ПНГа + ПНГп + ПНГэ,                      (15)

где ПНГд - неготовность линии связи из-за влияния гидрометеоров (дождей),
      ПНГс - неготовность линии связи из-за закрытия трассы (влияние субрефракции),
      ПНГа - аппаратурная ненадёжность,
      ПНГп - ошибки обслуживающего персонала,
      ПНГэ - неготовность линии связи из-за влияния промышленных атмосферных метеоров (экологические причины).

На влияние гидрометеоров необходимо относить 70-80 % их норм на ПНГ, так как остальная часть приходится на нарушения работоспособности линии связи при отказах аппаратуры, ошибках обслуживающего персонала и неблагоприятной экологической обстановки. Это справедливо для случаев, когда вероятность закрытия трассы РРЛ стремится к 0. В противном случае, доля влияния гидрометеоров должна быть ещё меньше. В принципе, доли составляющих причин, приводящих к неготовности ЦРРЛ, нужно согласовывать с заказчиками расчетов и фирмами-производителями аппаратуры.

Основными факторами, определяющими работоспособность систем радиосвязи в диапазонах частот выше 10 ГГц, являются потери в гидрометеорах и газах атмосферы. С увеличением рабочих частот эти потери стремительно растут. Суммарные погонные величины ослабления сигнала могут достигать 40 дБ/км при *f* = 60 ГГц. Таким образом, частота 60 ГГц естественно ограничивает протяжённости пролётов 1 - 3 км и поэтому в ряде стран этот диапазон (и более высокочастотные диапазоны) являются безлицензионными, разрешёнными для свободного использования.

### **Учёт потерь в атмосферных составляющих**

Атмосферные потери, в основном, складываются из потерь в молекулах кислорода и воды. Практически полная непрозрачность атмосферы для радиоволн наблюдается на частоте 118.74 ГГц (резонансное поглощение в молекулах кислорода), а на частотах больше 60 ГГц погонное затухание превышает 15 дБ/км. Ослабление в водяных парах атмосферы зависит от их концентрации и весьма велико во влажном тёплом климате и доминирует на частотах ниже 45 ГГц. Для компьютерных расчётов можно воспользоваться аналитическими выражениями:

Погонные потери (дБ/км) в атомах кислорода

                       (16)

где *f* - рабочая частота, ГГц.

Формула (16) справедлива для рабочих частот ниже 57 ГГц, при нормальном атмосферном давлении и при температуре воздуха  +15 град. С.

Погонные потери в водяных парах (дБ/км)

 (17)

где ** (H2O)- концентрация водяных паров в атмосфере, г/м3 .

Обычно принимают ** (H2O)= 7.5 г/м3 .

Суммарные погонные потери (дБ/км) при температуре, отличной от 15оС, определяются из выражения:

 *tot* = [1-(*t* - 15) 0.01] *О*2 + [1-(*t* - 15) 0.06] *H2O*,                                (18)

где *t* - температура воздуха в градусах С.

Полные потери в газах атмосферы можно найти, умножив погонное ослабление на протяжённость интервала линии связи.

**Сводка основных формул раздела**

Уменьшение мощности радиоволны с расстоянием вычисляется выражением для свободного пространства:

 * L*0, дБ = 92.4 + 20 lg *f* + 20 lg *d*0.

Коэффициент усиления параболической антенны, как уже было сказано ранее, определяется выражением:



Три характерных уровня сигнала на входе приёмника:

1. *РR*(100)=*РT*·*Lconst* (идеальный случай);
2. *PR*(80) =*РT*·*Lconst*·0,25 (норм. работа);
3. *РR,min*=*РT*·*Lconst*·*V*²*min* (замирания).

-коэффициент усиления системы *SG*, дБ = *РТ*– *РR,min*;

 - запас на замирание *Ft*, дБ =*РR*(100) - *РR,min*= *SG* +*GТ*+*GR* - *L*0 - 2*η*.

Уровень мощности сигнала на входе приёмника *PR*, дБм определяется выражением:

*РR* = *РT* + *G*1 + *G*2 - *L*0 - *ηT* - *ηR* - *ηFR* - *ηFT* - *Lдоп*,

При расчётах можно выбрать параметры типовых антенн задаться диаметрами антенн (для параболических структур) и определить их коэффициенты усиления из соотношения:

*G* = 20lg(*DА*) + 20 lg(*f*) +17.5***,***                                                   (8)

где *DА* - диаметр антенны в метрах,  *f* - рабочая частота в ГГц.

Потери представляют собой произведение потерь в свободном пространстве *L*0 на дополнительные потери, связанные с отличными от свободного пространства свойствами среды. В дБ суммарные потери определятся сложением значений компонент

 *L*Σ= *L*0 + *Lдоп*.

*Lдоп* в дБ рассчитывается по формулам погонного затухания в среде, а также полосовых затуханий в кислороде и воздушной влаге

  *Lдоп* = *д d эфф* + (*o* +*н*) *d*0, дБ, *д =  J *, дБ/км

где *o*, *н* - погонные затухания в атомах кислорода и в водяных парах атмосферы (дБ/км).

*вертикальная поляризация*

 *αv* = -2.125+ 16.48 (ln *f* )-1 -87.9 (ln *f* )-3 + 232.2 (ln *f* )-5

*βv* = exp [- 12.39+4.1 (ln *f* ) - 0.288 (ln *f* )2 ],

*горизонтальная поляризация*

 *αh* = - 1.761+ 13.81 (ln *f* )-1 - 62.77 (ln *f* )-3 + 142 (ln *f* )-5

  *βh* = exp [- 12.76+ 4.365 (ln *f* ) + - 0.324 (ln *f* )2 ].





Суммарные погонные потери (дБ/км) при температуре, отличной от 15оС, определяются из выражения:

 *tot* = [1-(*t* - 15) 0.01] *О*2 + [1-(*t* - 15) 0.06]*H2O*,

Ослабляющее  действие гидрометеоров оказывает достаточно длительное влияние на качество работы систем связи, ухудшая показатель неготовности (ПНГ). Показатели неготовности складываются из

 ПНГ = ПНГд + ПНГс + ПНГа + ПНГп + ПНГэ,

где ПНГд - неготовность линии связи из-за влияния гидрометеоров (дождей),
      ПНГс - неготовность линии связи из-за закрытия трассы (влияние субрефракции),
      ПНГа - аппаратурная ненадёжность, ПНГп - ошибки обслуживающего персонала,
      ПНГэ - неготовность линии связи из-за влияния промышленных атмосферных метеоров (экологические причины).

1. Federal Communications Commission Office of Engineering and Technology. Bulletin Number 70, July, 1997. Millimeter Wave Propagation: Spectrum Management Implications. New Technology Development Division Mail Stop Code 1300-E Washington, DC 20554. [↑](#footnote-ref-1)
2. Лэнди Р., Дэвис Д., Альбрехт А. Справочник радиоинженера. Гос. энергетическое изд-во, М.:, Л.:, 1961, с. 704. [↑](#footnote-ref-2)