

«ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ  
РАДИОРЕЛЕЙНЫХ ЛИНИЙ»

Составитель  
Корнеев В.А.  
доц. каф. РУС

Рязань 2012

11. ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАЗНЕСЕННОГО ПРИЕМА

Расчет производится в соответствии с [12, 13, 40].

*Прием с пространственным размещением*

Неустойчивость, обусловленная многолучевостью, может быть в значительной степени уменьшена при использовании пространственного размещения. На РРЛ прямой видимости пространственное размещение антенн осуществляется по высоте, так как такой разнос обеспечивает большую разность фаз между интерферирующими волнами, чем разнос по длине траектории или направлению, перпендикулярному траектории.

Для определения значения  $P_{\text{пол},d}$  при пространственном размещении следует:

1. Вычислить коэффициент активности многолучевых замираний  $\eta$  по формуле (10.2.12).

*Примечание 11.1.* На частотах ниже 17 ГГц  $\eta = 1$ .

2. Вычислить квадрат коэффициента неселективной корреляции [40]:

$$K_{\text{пл}}^2 = 1 - \frac{I_{\text{пл}} P_{\text{пл}}}{\eta} \quad (11.1)$$

где  $P_{\text{пл}} = P_{\text{пол}}/100$ , а значение процента времени нарушения связи на основной траектории за счет плоских замираний в условиях наихудшего месяца  $P_{\text{пл}}$  рассчитывается согласно выражениям разд. 10 в зависимости от частотного диапазона и особенностей траектории;  $I_{\text{пл}}$  – коэффициент улучшения за счет размещенного приема, значение которого рассчитывается согласно выражению:

$$I_{\text{пл},s} = \max\left(1, \left[1 - \exp\left\{-F(S, f, R, P_0)\right\}\right] 10^{A/10}\right), \quad (11.2)$$

в котором  $A$  – глубина замирания на дополнительной (см. примеч. 11.2) траектории (приравнивается запасу  $F_{\text{пр}}$ , дБ;  $F(S, f, R, P_0)$  – функция, параметрами которой являются:  $S$  – разнос по вертикали центров приемных антенн (см. примеч. 11.2, 11.3), рабочая частота  $f$ , длина траектории  $R$  и вероятность появления замираний  $P_0 = P_0/100$  на дополнительной траектории (см. примеч. 11.2). Для вычисления  $F(S, f, R, P_0)$  следует воспользоваться выражением:

$$F(S, f, R, P_0) = \begin{cases} -(C_h P_0)^{-1} & \text{для } f < 17 \text{ ГГц,} \\ -3,34 \cdot 10^{-4} (\max[3, \min[S, 23]])^{0,87} R^{0,48} P_0^{-1,04} & \text{для } f > 17 \text{ ГГц,} \\ (\min[f, 1])^{0,12} & \end{cases} \quad (11.3)$$

где  $S$  — в м;  $f$  — в ГГц;  $R$  — в км. Эмпирический коэффициент  $C_h$  в (11.3), учитывающий статистическую зависимость замираний при пространственном разнесении, определяется как

$$C_h = \sqrt{C_{осп} C_{доп}} \quad (11.4)$$

для слабонересеченных интервалов (см. примеч. 10.1), где  $C_{осп(доп)}$  находится в зависимости от параметра  $x$  (10.1.10)

$$C_{осп(доп)} = 19,5 \exp[-8,09 x_{осп(доп)}] \quad (11.5)$$

На нересеченных интервалах  $C_h$  практически не зависит от параметров трасс и равен:

$$C_h = 1,287 \cdot 10^5 (S \cdot \min\{f, 11\})^{-2} \quad (11.6)$$

**Примечание 11.2.** Из двух дополнительных трасс (одна в каждом направлении), образующих при реализации разнесенного приема, при вычислениях по (11.2) и далее выбираются параметры той трассы, которая имеет наибольшее значение  $R_{мд}$  или является наиболее опасной с точки зрения неустойчивости работы.

**Примечание 11.3.** Значения разности антенн по высоте на левом  $S_1$  и правом  $S_2$  конца слабонересеченных интервалов выбираются таким образом, чтобы в условиях средней рефракции обеспечить на каждом приемном конце попадание одной антенны в интерференционный минимум, а другой — в максимум. На пересеченных интервалах рекомендуется на обоих его концах выбирать  $S = (140 \dots 160)\lambda$ . На трассах со значительным перепадом высот коррелирующим пунктам, где существуют замирания из-за экранирующего действия неоднородностей тропосферы, рекомендуется выбирать  $S = (700 \dots 1400)\lambda$ .

3. Вычислить квадрат коэффициента корреляции при селективных замираниях [40]:

$$K_{сеп}^2 = \begin{cases} 0,8238 & \text{для } r_w \leq 0,5, \\ 1 - 0,195(1 - r_w)^{0,109 - 0,1318(1 - r_w)} & \text{для } 0,5 < r_w \leq 0,9628, \\ 1 - 0,3957(1 - r_w)^{0,5136} & \text{для } r_w > 0,9628, \end{cases} \quad (11.7)$$

где коэффициент корреляции  $r_w$ , относительных амплитуд

$$r_w = \begin{cases} 1 - 0,9746(1 - K_{пл}^2)^{2,170} & \text{для } K_{пл}^2 \leq 0,26, \\ 1 - 0,6921(1 - K_{пл}^2)^{1,034} & \text{для } K_{пл}^2 > 0,26. \end{cases} \quad (11.8)$$

4. Вычислить вероятность неустойчивой работы  $P_{пл,d}$  обусловленную плоскими замираниями:

$$P_{пл,d} = \frac{P_{пл}}{I_{пл}} \quad (11.9)$$

5. Вычислить вероятность неустойчивой работы  $P_{сеп,d}$  обусловленную селективными замираниями на основной трассе:

$$P_{сеп,d} = \frac{P_{сеп}^2}{\Pi(1 - K_{сеп}^2)}, \quad (11.10)$$

где  $P_{сеп} = P_{сеп}/100$  (см. 10.1.7 или 10.2.16).

6. Вычислить общую вероятность неустойчивой работы

$$P_{мд} = \left( P_{сеп,d}^{0,75} + P_{пл,d}^{0,75} \right)^{4/3} \quad (11.11)$$

7. Для получения неустойчивости в %, обусловленной плоскими  $P_{пл,d}$  селективными  $P_{сеп,d}$  многолучевыми  $P_{мд,d}$  замираниями необходимо умножить на 100 правые части уравнений (11.9), (11.10) и (11.11), соответственно. Указанные величины должны быть использованы в дальнейших расчетах интерференционной составляющей коэффициента неготовности на интервале  $K_{дет,мд}$  и коэффициента сильнопораженных секунд SESR<sub>мд</sub>.

#### Примечание с частотным разнесением

Неустойчивость, обусловленная многолучевостью, может быть уменьшена при использовании частотного разнесения. Современная радиорелейная аппаратура в большинстве случаев строится на принципах поучасткового или постанционного «горячего» резервирования, которые являются разновидностями частотно-разнесенного приема. При возникновении замираний на интервале переход с рабочего ствол с частотой  $f$  на резервный ствол, разнесенный по частоте на величину  $\Delta f$ , осуществляется либо одновременно на всем участке резервирования, либо непосредственно на интервале с замираниями.

Процедура определения значения  $P_{мд,d}$  при частотном разнесении аналогична процедуре, используемой при наличии пространственного разнесения, но в шаге 2 вместо выражения (11.2) применяется [12]

$$I_{пл,f} = \max \left\{ 1, \left[ \frac{K+1}{2} C_f P_{пл} \right]^{-1} \right\} \quad (11.12)$$

где  $K$  — количество рабочих стволов в системе резервирования ( $K + 1$ ). Эмпирический коэффициент  $C_f$  учитывающий статистическую зависимость замираний при частотном разнесении, определяется следующим образом:

1) на пересеченных сухолугных интервалах по формуле

$$C_f = 17 \left[ \frac{\Delta f}{f} \right]^{-1}; \quad (11.13)$$

2) на пересеченных интервалах, проходящих в приморских районах, по формуле

$$C_f = 2,5 \left[ \frac{\Delta f}{f} \right]^{-1,2}; \quad (11.14)$$

3) на слабонересеченных интервалах по формуле

$$C_f = 0,812 [\rho(\bar{g})]^{-3,7} \left[ \frac{\Delta f}{f} \right]^{-1,512-0,56 \ln(\rho(\bar{g}))}, \quad (11.15)$$

где  $\rho(\bar{g})$  — просвет в точке отражения при средней рефракции (см. примеч. 6.3);  
4) на слабонересеченных интервалах с большими просветами, перепалом высот корреспондирующих пунктов более 800 м и средней высоте трассы  $\bar{h} \leq 800$  м при  $x \geq 0,3$  (10.1.10) по формуле

$$C_f = 3,4 \left[ \frac{\Delta f}{f} \right]^{-0,8}. \quad (11.16)$$

В выражениях (11.13–11.16) значение  $\Delta f$  равно минимальному разному между рабочими и резервным стволами и подставляется в тех же единицах, что и  $f$ .

**Примечание 11.4.** Коэффициент улучшения за счет частотно-разнесенного приема для системы резервирования ( $K + 2$ ) ориентировочно следует считать как для системы ( $K/2 + 1$ ). При  $K > 6$  считается, что выигрыш от применения разнесения отсутствует.

**Прием с частотным и пространственным (комбинированным) разнесением**  
Для обеспечения устойчивости работы РРЛ на отдельных неблагоприятных интервалах целесообразно использование пространственного разнесения в дополнение к уже имеющемуся частотному разнесению.

Поскольку коэффициент улучшения при пространственном разнесении  $I_{пл,с}$  как правило, значительно превышает коэффициент улучшения при частотном разнесении  $I_{пл,ф}$  то при резервировании типа ( $K + 1$ ) и значении  $K > 1$  условно считается, что выигрыш будет таким же, как и в случае пространственно-

го разнесения. Пересчет следует проводить только для систем резервирования типа (1 + 1). Процедура расчета зависит от количества используемых в системе приемников (2 или 4). В случае двух приемников:

1. Вычисляется коэффициент неселективной корреляции [40]

$$K_{пл} = K_{пл,с} K_{пл,ф} \quad (11.17)$$

где  $K_{пл,с}$  и  $K_{пл,ф}$  — коэффициенты корреляции при плоских замираниях, рассчитанные для пространственного разнесения и частотного разнесения согласно (11.1) с использованием значений  $I_{пл,с}$  и  $I_{пл,ф}$  соответственно. Далее процедура расчета ведется как в случае пространственного разнесения.

В случае использования четырех приемников процедура расчета должна быть следующей:

1. Вычислить коэффициент активности многолучевых замираний  $\eta$  (см. примеч. 11.1).

2. Рассчитать параметр разнесения  $m_{пл}$ :

$$m_{пл} = \eta^3 (1 - K_{пл,с}^2) (1 - K_{пл,ф}^2), \quad (11.18)$$

где  $K_{пл,с}$  и  $K_{пл,ф}$  те же, что и в (11.17).  
3. Вычислить вероятность неустойчивой работы  $P_{пл,с}$  обусловленную плоскими замираниями:

$$P_{пл,с} = \frac{P_{пл}^4}{m_{пл}}, \quad (11.19)$$

4. Найти квадрат эквивалентного коэффициента корреляции  $K_{пл}$  при плоских замираниях из выражения:

$$K_{пл}^2 = 1 - \sqrt{\eta} \cdot (1 - K_{пл,с}^2) (1 - K_{пл,ф}^2). \quad (11.20)$$

5. Рассчитать эквивалентный коэффициент корреляции  $K_{сел}$  при селективных замираниях, используя ту же процедуру, что и для пространственного разнесения (11.7).

6. Вычислить вероятность неустойчивой работы  $P_{сел,с}$  обусловленную селективными замираниями:

$$P_{сел,с} = \left[ \frac{P_{сел}^2}{\eta(1 - K_{сел}^2)} \right]^2, \quad (11.21)$$

где  $P_{сел}$  то же, что и в (11.10).

7. Общая вероятность неустойчивой работы  $P_{мл,с}$  рассчитывается согласно (11.11).

## 12. РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА НЕГОТОВНОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТА СИЛЬНОПОРАЖЕННЫХ СЕКУНД, ОБУСЛОВЛЕННЫХ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫМИ ЗАМИРАНИЯМИ

### Общие сведения

Расчет производится на основании материалов, приведенных в [46-48, 55] для случая, когда неустойчивость, обусловленная интерференцией,  $P_{\text{дл}} > 0,000385\%$  (10 с месяца). В противном случае неустойчивость полностью переходит в показатель SESR.

Вводится понятие эффективного запаса на замирание:

$$F_{\text{эф}} = \sqrt{10^{-F/10} + 10^{-F_{\text{сел}}/10}}, \quad (12.1)$$

где  $F$  — значение запаса на тепловые замирания, при котором рассчитывается неустойчивость, вызванная плоскими замираниями, дБ;  $F_{\text{сел}}$  — запас на селективные замирания, при котором рассчитывается неустойчивость, вызванная селективными замираниями, дБ.

Все замирания имеют конечную длительность. Интегральное распределение длительности замираний  $T(\tau)$  в большинстве случаев удовлетворительно аппроксимируется логнормальным законом со средним значением  $\bar{\tau}$  и СКО  $\sigma_{\tau}$  [48]. (При этом  $\tau_{\text{дл}} = 10 \lg(\sigma_{\tau} \tau_{\text{н}})$  и  $\sigma_{\tau[\text{дБ}]} = 10 \lg(\sigma_{\tau} \tau_{\text{н}})$ ).

Мedianное значение длительности замираний связалы соотношением [48]:

$$10 \lg \frac{\bar{\tau}}{\tau_{\text{н}}} = 0,115 \sigma_{\tau[\text{дБ}}^2. \quad (12.2)$$

В диапазоне 4 ГГц значения  $\sigma_{\tau}$ , дБ, находится из выражения [48]

$$\sigma_{\tau} = 3,694 + \frac{250,541}{(-V_{\text{дБ}})^{1,5}}, \quad (12.3)$$

где  $V_{\text{дБ}}$  — глубина замирания, дБ.

При увеличении рабочей частоты величина СКО несколько возрастает и для  $V_{\text{дБ}} = -20$  дБ это увеличение, дБ

$$\Delta \sigma_{\tau} = 4 \lg \frac{f_{\text{н}}}{f_{\text{п}}}, \quad (12.4)$$

где  $f_{\text{н}}$  — более высокая частота,  $(f_{\text{п}} = 4 \text{ ГГц})$ .

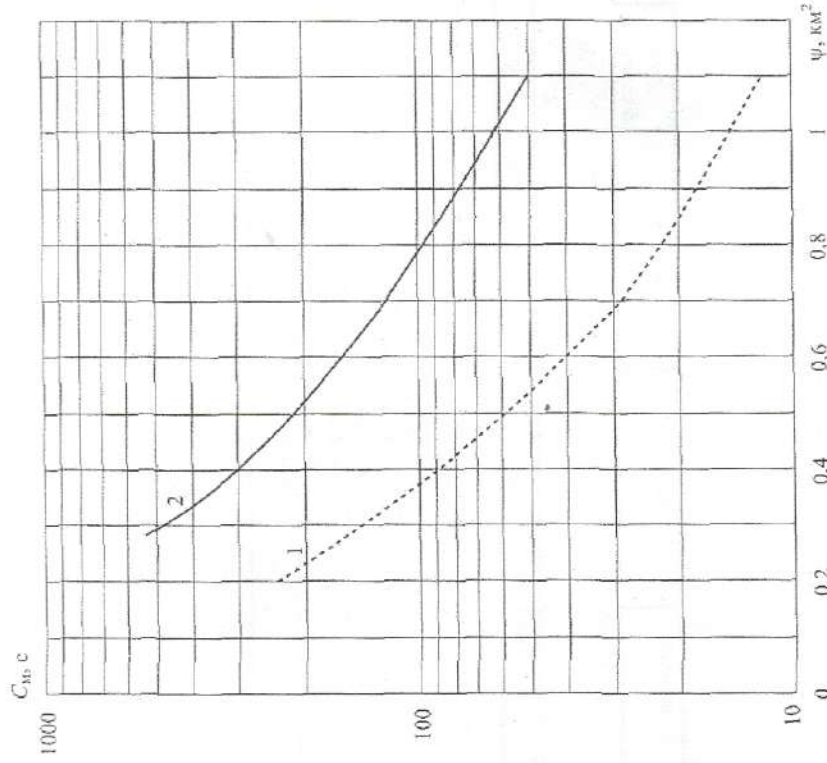


Рис. 12.1. К расчету medianной длительности замираний [48]

Medianное значение длительности замираний, с, при многолучевом распространении определяется [13]

$$\tau_{\text{м}} = C_{\text{м}} V(4f)^{0,5}, \quad (12.5)$$

где  $V$  — относительных единиц;  $f$  — в ГГц;  $C_{\text{м}}$  — эмпирический коэффициент, с, определяемый по рис. 12.1, на котором кривая 1 относится к слабопересеченным и прибрежным (прибрежным) трассам, кривая 2 — к пересеченным трассам.  $C_{\text{м}}$  может быть получен с помощью аппроксимирующего выражения, которое имеет вид для кривой 1:

$$C_{\text{м}} = (0,002 + (0,272\psi)^{2,1})^{-1}, \quad (12.6)$$

для кривой 2:

$$C_M = (0,001 + (0,106\psi)^{1,9})^{-1} \quad (12.7)$$

Значение параметра  $\psi$  определяется характеристиками трассы:

$$\psi = R^2 \rho(\bar{g}) \cdot 10^{-4} \quad (12.8)$$

где  $R$  – в км,  $\rho(\bar{g})$  – относительный процвет при средней рефракции в наиболее высокой точке интервала или точке отражения в случае, если интервал является пересеченным или слабопересеченным, соответственно.

Доля замираний  $\alpha_{\tau_H}$  продолжительностью более определенной величины  $\tau_H$  может быть вычислена как отношение суммарной длительности замираний  $S_M$ , превышающих величину  $\tau_H$ , к суммарной длительности всех замираний  $S$  [55]:

$$\alpha_{\tau_H} = \frac{S_M}{S} = \frac{N \int_{\tau_H}^{\infty} \tau \cdot T(\tau) d\tau}{N \int_0^{\infty} \tau \cdot T(\tau) d\tau} \quad (12.9)$$

где  $N$  – число замираний. Величина  $\alpha_{\tau_H}$  может быть записана как:

$$\alpha_{\tau_H} = \frac{1}{2} \left[ 1 - \text{sign}(x_H) \left( \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{|x_H|} e^{-x^2} dx \right) \right] \quad (12.10)$$

где

$$\text{sign}(x_H) = \begin{cases} 1, & x_H \geq 0, \\ -1, & x_H < 0 \end{cases} \quad (12.11)$$

и

$$x_H = \frac{4,343}{\sqrt{2} \cdot \sigma_{\tau_{[0,5]}}} \ln \left( \frac{\tau_H}{\tau_M} \right) - \frac{\sqrt{2} \cdot \sigma_{\tau_{[0,5]}}}{8,686} \quad (12.12)$$

Интеграл  $\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{|x|} e^{-x^2} dx$  табулирован, для него также существует достаточная

точная аппроксимация:

$$\alpha_{\tau_H} = \frac{1}{2} \left[ 1 - \text{sign}(x_H) \left( 1 - [a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3] e^{-x_H^2} \right) \right] \quad (12.13)$$

$$t = 1/(1 + 0,47047|x_H|); a_1 = 0,3480242; a_2 = -0,0958798; a_3 = 0,7478556. \quad (12.14)$$

График зависимости  $\alpha_{\tau_H} = F(\tau_H/\tau_M)$  приведен на рис. 12.2.

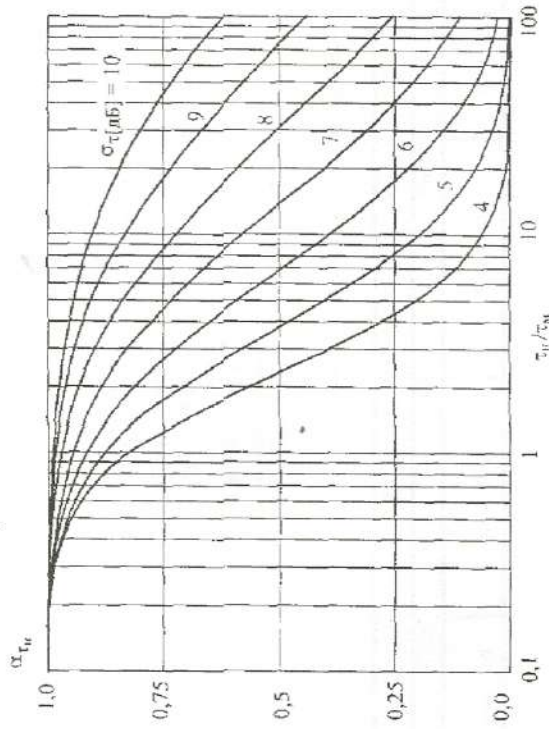


Рис. 12.2

Доля замираний  $\alpha_{\tau_H}$  продолжительностью менее  $\tau_H$  может быть вычислена как

$$\varphi_{\tau_H} = 1 - \alpha_{\tau_H} \quad (12.15)$$

Поскольку состояние неготовности РРЛ определяется периодами времени, продолжительность которых составляет 10 или более последовательных секунд с неудовлетворительным показателем BER, то определяющим будет значение  $\tau_H = 10$  с. Зависимость  $\alpha_{\tau_H=10} = F(\tau_M)$  приведена на рис. 12.3.

Приведенные в разд. 10 процедуры вычисления неустойчивости, вызванной многолучевыми замираниями, относятся к периоду «наихудшего» месяца года. Согласно [13], в среднем за год значение неустойчивости меньше, чем за месяц, примерно в 4 раза для умеренного климата, в 2–3 раза для морского и влажного климата и в 6–8 раз – для горной местности и очень сухого климата. Таким образом, коэффициент пересчета  $z$  от «наихудшего» месяца к «среднему

году» будет составлять 1/4, 1/3 и 1/7 для сухопутных, приморских (или прибрежных) и горных районов, соответственно.

В [40] пересчет из показателей «павшдшего» месяца к показателям среднего года проводится с помощью коэффициента:

$$z = 10^{-a/10}, \quad (12.16)$$

где  $a$ , %:

$$a = 10,5 - 5,6 \lg \left( 1,1 \pm |\cos(\pi \Pi / 90)|^{0,7} \right) - 2,7 \lg(R) + 1,7 \lg(1 + |E_h|). \quad (12.17)$$

В (12.17)  $a \leq 10,8$  и используется положительный знак при  $\Pi \leq 45^\circ$ , а при  $\Pi > 45^\circ$  — отрицательный знак;  $\Pi$  — широта середины интервала, град;  $R$  — в км;  $E_h$  — наклон интервала (10.2.10).

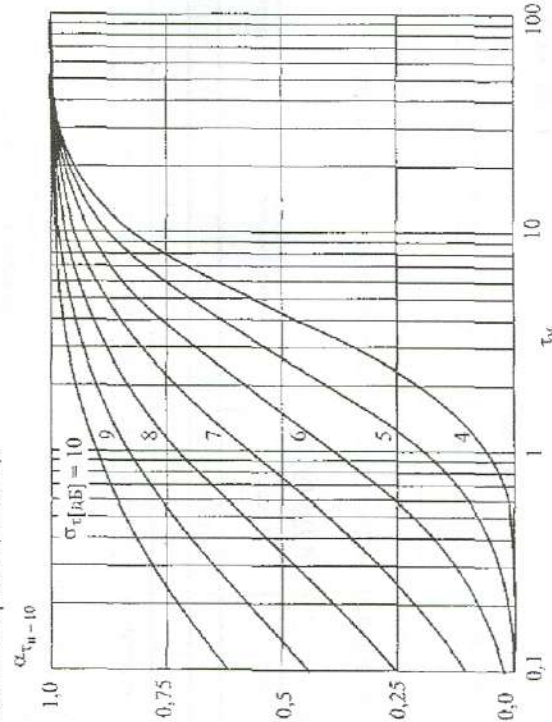


Рис. 12.3

#### Расчет $K_{\text{нег.мл}}$ и коэффициента сильнопораженных секунд $\text{SESR}_{\text{мл}}$

1. С помощью выражения (12.1) рассчитать эффективный запас на замещения  $F_{\text{эф}}$ .
2. Рассчитать медианное значение длительности замираний  $\tau_m$ , при многолучевом распространении согласно формуле (12.5), подставив в нее в качестве  $V$  ранее полученное значение  $F_{\text{эф}}$ .

**Примечание 12.1.** Для интервалов РРД, расположенных в горной местности или вблизи крупных водных массивов, перепад высот подбеса антенн в конечных пунктах которых равен или превышает 200 м, при вычислении величины  $C_m$  следует использовать кривую 2 рис. 12.1 или соответствующее ей аппроксимирующее выражение (12.7). Полученное значение  $C_m$  далее умножается на 1,4.

3. Используя равенство  $V_{\text{дб}} = 20 \lg F_{\text{эф}}$ , с помощью выражений (12.3) и (12.4) рассчитать СКО длительности замираний.

4. С помощью (12.13) и (12.15) определить доли  $\alpha_{\tau_{\text{н}}=10}$  и  $\Phi_{\tau_{\text{н}}=10}$ , соответственно.

**Примечание 12.2.** При использовании пространственного разнесения с помощью (12.13) вычисляются доли и для основной  $\alpha_{\tau_{\text{н,осн}}}$  и для дополнительной (см. примеч. 11.2) трасс  $\alpha_{\tau_{\text{н,доп}}}$ . Результирующее значение вычисляется как  $\alpha_{\tau_{\text{н}}} = (\alpha_{\tau_{\text{н,осн}}} + \alpha_{\tau_{\text{н,доп}}})/2$  и, в соответствии с ним, с помощью (12.15) вычисляется  $\Phi_{\tau_{\text{н}}}$ .

5. Вычислить коэффициент сильнопораженных секунд, обусловленный интерференцией на интервале  $\text{SESR}_{\text{мл}}$ , %

$$\text{SESR}_{\text{мл}} = \Phi_{\tau_{\text{н}}=10} \cdot P'_{\text{мл}}, \quad (12.18)$$

где  $P'_{\text{мл}}$  — в случае одинарного приема неустойчивость, обусловленная многолучевостью  $P_{\text{мл}}$  (разд. 10), а в случае разнесенного приема —  $P_{\text{мл}d}$  (разд. 11).

6. Вычислить интерференционную составляющую коэффициента негодности на интервале  $K_{\text{нег.мл}}$ , %

$$K_{\text{нег.мл}} = z \cdot \alpha_{\tau_{\text{н}}=10} \cdot P'_{\text{мл}}, \quad (12.19)$$

где коэффициент пересчета  $z$  в зависимости от процедуры расчета  $P_{\text{мл}}$  в разд. 10 либо выбирается в соответствии с районом расположения интервала (1/4, 1/3, 1/7), либо рассчитывается согласно (12.16).

### 13. РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА НЕГОТОВНОСТИ, ОБУСЛОВЛЕННОГО ВЛИЯНИЕМ ДОЖДЕЙ

Переход радиолинии в состояние неготовности на интервале протяженностью  $K$  (км) обусловлен тем, что при дождях высокой интенсивности ослабление сигнала СВЧ возрастает до такой степени, что необходимый для качественной работы радиолинии уровень сигнала перестает обеспечиваться. Это приводит к резкому увеличению коэффициента ошибок и связь прерывается.

За время «среднего года» отдельные случаи существования на интервале ЦРЛ дождевой высокой интенсивности имеют длительности, как правило, более 10 последовательных секунд. По принятому в документах МСЭ и в отечественных нормативных документах определению подобная ситуация относится к состоянию неготовности радиолинии. Суммарная за «средний год» длительность нахождения радиолинии в состоянии неготовности из-за воздействия интенсивных дождей, отнесенная (в %) ко времени 8760 ч, позволяет рассчитать  $K_{\text{нет.д.}}$ .

Определение значения  $K_{\text{нет.д.}}$  на проектируемом интервале РРЛ обычно базируется на расчете величины максимально допустимой интенсивности дождей  $J_{\text{д. max}}$ , при которой ослабление сигнала СВЧ на интервале  $V_{\text{д}}$  становится равным значению запаса на замирания при средних условиях рефракции. После этого рассчитывается длительность превышения в «среднем годе» интенсивности дождя  $J_{\text{д. max}}$ . Значение этого интервала времени превышения в «среднем годе», когда  $V_{\text{д}} > \bar{F}$ , характеризует значение  $K_{\text{нет.д.}}$ .

Для расчета  $K_{\text{нет.д.}}$  сначала производится расчет показателей работы радиолинии при интенсивности дождей, соответствующей проценту времени «среднего года»  $P_{\text{ст}} = 0,01\%$ , как это предложено в [40]. Значения интенсивности дождей  $J_{\text{д}}$  (0,01%) для территории России могут быть найдены с использованием приводимой ниже аппроксимации.

Расчет при  $P_{\text{ст}} = 0,01\%$  («среднего года») позволяет получить значения совокупности вспомогательных расчетных параметров, используемых в расчетах  $K_{\text{нет.д.}}$  при полном использовании запаса на замирания  $\bar{F}$ . В методике применяются отечественная модель пространственной локализации дождей на интервале РРЛ [12, 13], как наиболее апробированная в России и на территории бывшего СССР.

Таблица 13.1

Коэффициент  $\xi$

Территория	$\xi$
Юго-восточная зона Республики Коми; Астраханская область	0,5
Республика Калмыкия (кроме юго-восточной зоны), Волгоградская	0,65
Ростовская, Саратовская области	0,7
Камчатская область, Красноярский Автономный округ	0,8
Сахалинская область	0,85
Республика Дагестан	
Республики Башкортостан, Марий Эл, Татарстан, Удмуртская, Чувашская, Кировская, Магаданская, Оренбургская, Пермская, Самарская, Свердловская, Ульяновская, Челябинская области; Коми-Пермяцкий Автономный округ	0,9
Республика Адыгея, Краснодарско-Черкесская Республика; Краснодарский край, Ставропольский край, Белгородская, Воронежская, Курская, Орловская области	0,95
Республики Бурятия, Саха (Якутия); Иркутская, Новосибирская, Омская, Томская, Читинская области; Алтайский Бурятский Автономный округ, Усть-Ордынский Бурятский Автономный округ, Эвенкийский Автономный округ; Брестская и Гомельская области	1,05
Черноморское побережье Кавказа (г. Анапа, Новороссийск, Геленджик, Туапсе, Сочи); Ямало-Ненецкий Автономный округ	1,2
Приморский край, Хабаровский край, Амурская область, Еврейская Автономная область	1,5
На остальных территориях	1,0

1. Определяется интенсивность дождя  $J_{\text{д}}$ , мм/ч, соответствующая  $P_{\text{ст}} = 0,01\%$  [58]:

$$J_{\text{д}} = \xi \cdot 2,5 \cdot 10^5 \cdot \text{Ш}^{-2} \cdot (D + 25)^{-0,3}, \quad (13.1)$$

где  $\xi$  — поправочный коэффициент, учитывающий особенности различных территорий (см. табл. 13.1 и рис. П.5);  $D$ , Ш — долгота и широта середины интервала, град.

2. Определяется логонное затухание сигнала в дожде, дБ/км, с интенсивностью  $J_{\text{д}}$  [44]:

$$\gamma = K(J_{\text{д}})^{\alpha}, \quad (13.2)$$

где  $K$ ,  $\alpha$  — коэффициенты:

$$K = [K_H + K_V + (K_H - K_V) \cos 2\tau] / 2, \quad (13.3)$$

$$\alpha = [K_H \alpha_H + K_V \alpha_V + (K_H \alpha_H - K_V \alpha_V) \cos 2\tau] / 2K, \quad (13.4)$$

$\tau$  — угол наклона вектора поляризации волны относительно горизонта, рад, для вертикальной, горизонтальной и круговой поляризации принимается равным

$\mu/2$ , 0 и  $\mu/4$ , соответственно. Значения параметров  $K_{H,U}$  и  $\alpha_{H,U}$  рассчитываются согласно выражениям [44]:

$$K_{H,U} = 10^q, \quad q = \sum_{j=1}^4 a_j \exp \left[ - \left( \frac{\lg f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m \lg f + n, \quad (13.5)$$

$$\alpha_{H,U} = \sum_{j=1}^5 a_j \exp \left[ - \left( \frac{\lg f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m \lg f + n, \quad (13.6)$$

коэффициенты для которых приведены в табл. 13.2–13.5.

Таблица 13.2

Коэффициенты для вычисления  $K_H$

$j$	$a_j$	$b_j$	$c_j$	$m$	$n$
1	-5,33980	-0,10008	1,13098		
2	-0,35351	1,26970	0,45400		
3	-0,23789	0,86036	0,15354	-0,18961	0,71147
4	-0,94158	0,64552	0,16817		

Таблица 13.3

Коэффициенты для вычисления  $K_U$

$j$	$a_j$	$b_j$	$c_j$	$m$	$n$
1	-3,80595	0,56934	0,81061		
2	-3,44965	-0,22911	0,51059		
3	-0,39902	0,73042	0,11899	-0,16398	0,63297
4	0,50167	1,07319	0,27195		

Таблица 13.4

Коэффициенты для вычисления  $\alpha_H$

$j$	$a_j$	$b_j$	$c_j$	$m$	$n$
1	-0,14318	1,82442	-0,55187		
2	0,29591	0,77564	0,19822		
3	0,32177	0,63773	0,13164	0,67849	-1,95537
4	-5,37610	-0,96230	1,47828		
5	16,1721	-3,29980	3,43990		

Таблица 13.5

Коэффициенты для вычисления  $\alpha_H$

$j$	$a_j$	$b_j$	$c_j$	$m$	$n$
1	-0,07771	2,33840	-0,76284		
2	0,56727	0,95545	0,54039		
3	-0,20238	1,14520	0,26809	-0,053739	0,83433
4	-48,2991	0,791669	0,116236		
5	48,5833	0,791459	0,116479		

3. Определяется вспомогательный параметр  $B_1$  [58]:

$$B_1 = \lg[0,19J_{\text{пл}}]. \quad (13.7)$$

4. Определяется энергетический параметр интервала:

$$E = \alpha B_1 + \lg(\bar{F}/\psi R). \quad (13.8)$$

**Примечание 13.1.** При использовании пространственного разнесения в (13.8) подставляется наибольшее из значений  $\bar{F}$ , вычисленных для основной и дополнительной трасс.

5. Рассчитывается вспомогательный параметр  $B_2$ , соответствующий интенсивности дождя, определяющей переход интервала в состояние неотвешивания:

$$B_2 = B_1 \cdot Z. \quad (13.9)$$

Параметр  $Z$ , входящий в (13.9), представляется в виде многочлена по

степеням  $E$ :  $Z = \sum_{i=1}^6 A_i E^i$ , в котором

$$A_1 = (\alpha B_1 - \varepsilon_1)^{-1}; \quad A_2 = \varepsilon_2 A_1^3; \quad A_3 = [2 \varepsilon_2^2 + (\alpha B_1 - \varepsilon_1) \varepsilon_3] A_1^5;$$

$$A_4 = [5 (\alpha B_1 - \varepsilon_1) \varepsilon_2 \varepsilon_3 + (\alpha B_1 - \varepsilon_1)^2 \varepsilon_4 + 5 \varepsilon_2^3] A_1^7;$$

$$A_5 = [6 (\alpha B_1 - \varepsilon_1)^2 \varepsilon_2 \varepsilon_4 + 3 (\alpha B_1 - \varepsilon_1)^2 \varepsilon_3^2 + 14 \varepsilon_2^4 + (\alpha B_1 - \varepsilon_1)^3 \varepsilon_5 + A_1^9];$$

$$A_6 = [7 (\alpha B_1 - \varepsilon_1)^3 \varepsilon_2 \varepsilon_5 + 7 (\alpha B_1 - \varepsilon_1)^3 \varepsilon_3 \varepsilon_4 + 84 (\alpha B_1 - \varepsilon_1) \varepsilon_2^3 \varepsilon_3 + (\alpha B_1 - \varepsilon_1)^4 \varepsilon_6 + 28 (\alpha B_1 - \varepsilon_1)^2 \varepsilon_2 \varepsilon_3^2 + 28 (\alpha B_1 - \varepsilon_1)^2 \varepsilon_2^2 \varepsilon_4 + 42 \varepsilon_2^5] A_1^{11},$$

в свою очередь

$$\varepsilon_1 = 0,43429\psi; \quad \varepsilon_2 = 0,43429\psi \ln d - 0,217145\psi^2;$$



$$\begin{aligned} \varepsilon_3 &= 0,217145\psi \ln^2 d - 0,43429\psi^2 \ln d + 0,144763\psi^3; \\ \varepsilon_4 &= 7,28316 \cdot 10^{-2}\psi \ln^3 d - 0,43429\psi^2 \ln^2 d + 0,43429\psi^3 \ln d - 0,10857\psi^4; \\ \varepsilon_5 &= 1,80954 \cdot 10^{-2}\psi \ln^4 d - 0,28953\psi^2 \ln^3 d + 0,65143\psi^3 \ln^2 d - \\ &\quad - 0,43429\psi^4 \ln d + 8,68581 \cdot 10^{-2}\psi^5; \end{aligned} \quad (13.11)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_6 &= 3,61908 \cdot 10^{-3}\psi \ln^5 d - 0,14476\psi^2 \ln^4 d + 0,65143\psi^3 \ln^3 d - \\ &\quad - 0,8686\psi^4 \ln^2 d + 0,43429\psi^5 \ln d - 7,23816 \cdot 10^{-2}\psi^6 \end{aligned}$$

и

$$\begin{aligned} d &= R^{0,545B_1}, \\ \psi &= 3,5088 \cdot 10^{-2} \cdot B_1 \cdot R^{0,33} \end{aligned} \quad (13.12)$$

*Примечание 13.2.* В выражениях (13.9–13.12) учтена величина коэффициента пространственной локализации дождя  $K_{r1}$ :

$$K_{r1} = \left[ 1 + 3,5088 \cdot 10^{-2} \cdot B_1 R^{(0,33+0,545B_1)} \right]^{-1},$$

где  $R$  в км.

6. Определяется параметр  $AS_{д}$ , %:

$$AS_{д} = 10 \left[ -2 + 2(B_2 - B_1) + 0,2387|B_2 - B_1|^2,5682 \right] \quad (13.13)$$

7. Определить коэффициент неготовности интервала, %, обусловленный дождями, согласно выражению:

$$K_{нет,д} = \begin{cases} AS_{д} & AS_{д} \geq 3,2 \cdot 10^{-5}, \\ 0 & AS_{д} < 3,2 \cdot 10^{-5}, \end{cases} \quad (13.14)$$

8. Вычислить дождевую составляющую коэффициента сильнопораженных секунд ( $SESR_{д}$ , %) согласно выражению:

$$SESR_{д} = \begin{cases} 0 & AS_{д} \geq 3,2 \cdot 10^{-5}, \\ AS_{д} \cdot Q & AS_{д} < 3,2 \cdot 10^{-5}, \end{cases} \quad (13.15)$$

где значение коэффициента  $Q$  рассчитывается по формуле:

$$Q = 0,1227 \cdot \Pi^{0,7456} \cdot D^{0,1140} \cdot AS_{д}^{-0,1227} \quad (13.16)$$

*Примечание 13.3.* Выражения (13.14–13.15) учитывают тот факт, что в случае, если запас на замирания превышает менее чем в  $3,2 \cdot 10^{-5}$  процентов времени одного года (10 с), то такие события не приводят к неготовности системы и, следовательно, должны быть учтены в величине  $SESR$ .

#### 14. РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА НЕГОТОВНОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТА СИЛЬНОПОРАЖЕННЫХ СЕКУНД, ОБУСЛОВЛЕННЫХ СУБРЕФРАКЦИОННЫМИ ЗАМИРАНИЯМИ

##### Общие сведения

Ослабления сигнала СВЧ за счет дифракционных потерь в условиях субрефракции имеют обычно большую продолжительность (от нескольких десятков минут до нескольких часов), в то время как продолжительность интерференционных замираний составляет секунды-десятки секунд. Большая продолжительность субрефракционных замираний обусловлена инерционностью сопровождающих их метеорологических процессов, например приземных туманов, инверсий влажности и температуры [21, 56]. Исходя из этого, предполагается, что medianное значение длительности субрефракционных замираний всегда будет превышать 10 с. Таким образом, можно приближенно считать что, субрефракционные замирания, глубина которых превышает значение запаса на замирания на интервале, будут приводить к неготовности интервала.

В большинстве районов России субрефракция наблюдается в летние месяцы, но имеются исключения, так в районе 4 (см. табл. П.1 прил. II) весной и осенью субрефракция наблюдается значительно чаще, чем летом. Условно можно считать, что на приморских (или прибрежных) и сухопутных интервалах явление субрефракции имеет место не более 4-х и 3-х месяцев в году, соответственно [13].

Расчет  $K_{нет,субрефр}$  и коэффициента сильнопораженных секунд  $SESR_{субрефр}$

1. Определить параметр  $AS_{субрефр}$ , %:

$$AS_{субрефр} = Z_{субрефр} \quad (14.1)$$

где  $Z_{субрефр}$  — составляющая неустойчивости, обусловленная субрефракцией (9.3) (см. также примеч. 9.3), а коэффициент пересчета  $Z$  от наилучшего месяца к «среднему году» составляет 1/4 для сухопутных интервалов и 1/3 для приморских (или прибрежных) интервалов.

2. Вычислить субрефракционную составляющую коэффициента неготовности на интервале ( $K_{нет,субрефр}$ , %) согласно выражению:

## 15. РАСЧЕТ НОРМИРУЕМЫХ ЗНАЧЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТА СИЛЬНОПОРАЖЕННЫХ СЕКУНД И КОЭФФИЦИЕНТА НЕГОТОВНОСТИ

### Расчет SESR

Величина SESR определяется составляющими неустойчивости на интервале ПРЛ за наилучший месяц, относящимися к состоянию готовности тракта.

Таким образом, коэффициент сильнопораженных секунд SESR, %, определяется вкладом интерференции SESR<sub>мл</sub>, дождей SESR<sub>д</sub> и субрефракции SESR<sub>субрефр</sub>:

$$SESR = SESR_{мл} + SESR_{д} + SESR_{субрефр} \quad (15.1)$$

где SESR<sub>мл</sub>, SESR<sub>д</sub> и SESR<sub>субрефр</sub> рассчитаны согласно выражений (12.18), (13.15) и (14.3), соответственно.

Необходимое условие удовлетворительной работы ЦРРЛ выражается равенством:

$$SESR \leq SESR_{норм} \quad (15.2)$$

где SESR<sub>норм</sub> - норма на коэффициент ошибок по секундам, пораженным ошибками, приведена в разд. 1 (см. примеч. 1.3.1).

### Расчет K<sub>нет ср</sub>

Коэффициент неготовности тракта ПРЛ, %, определяется неготовностью, вызванной дождями, интерференцией и субрефракцией:

$$K_{нет ср} = K_{нет д} + K_{нет мл} + K_{нет субрефр} \quad (15.3)$$

где K<sub>нет д</sub> рассчитывается согласно (13.14), K<sub>нет мл</sub> - согласно (12.19), а K<sub>нет субрефр</sub> - согласно (14.2).

Необходимое условие удовлетворительной работы ЦРРЛ выражается равенством:

$$K_{нет ср} \leq K_{нет норм} = (K_{нет мл} + K_{нет пнт} + K_{нет эксп}), \quad (15.4)$$

в котором значения составляющих: K<sub>нет мл</sub>, K<sub>нет пнт</sub>, K<sub>нет эксп</sub> а также норма на коэффициент неготовности рассчитываются согласно выражений, приведенных в разд. 1 (см. примеч. 1.3.1).

$$K_{нет субрефр} = \begin{cases} AS_{субрефр} & AS_{субрефр} \geq 3,2 \cdot 10^{-5} \\ 0 & AS_{субрефр} < 3,2 \cdot 10^{-5} \end{cases} \quad (14.2)$$

3. Вычислить субрефракционную составляющую коэффициента сильнопораженных секунд (SESR<sub>субрефр</sub>, %) согласно выражению:

$$SESR_{субрефр} = \begin{cases} 0 & AS_{субрефр} \geq 3,2 \cdot 10^{-5} \\ P_{субрефр} & AS_{субрефр} < 3,2 \cdot 10^{-5} \end{cases} \quad (14.3)$$

Примечание 15.1. В случае если ЦРПЛ состоит из  $q$  интервалов, для каждого интервала в отдельности определяются значения  $SESR_i$  и  $K_{пер}^i$ , а с

нормами сравниваются суммы  $\sum_i^q SESR_i$  и  $\sum_i^q K_{пер}^i$ .

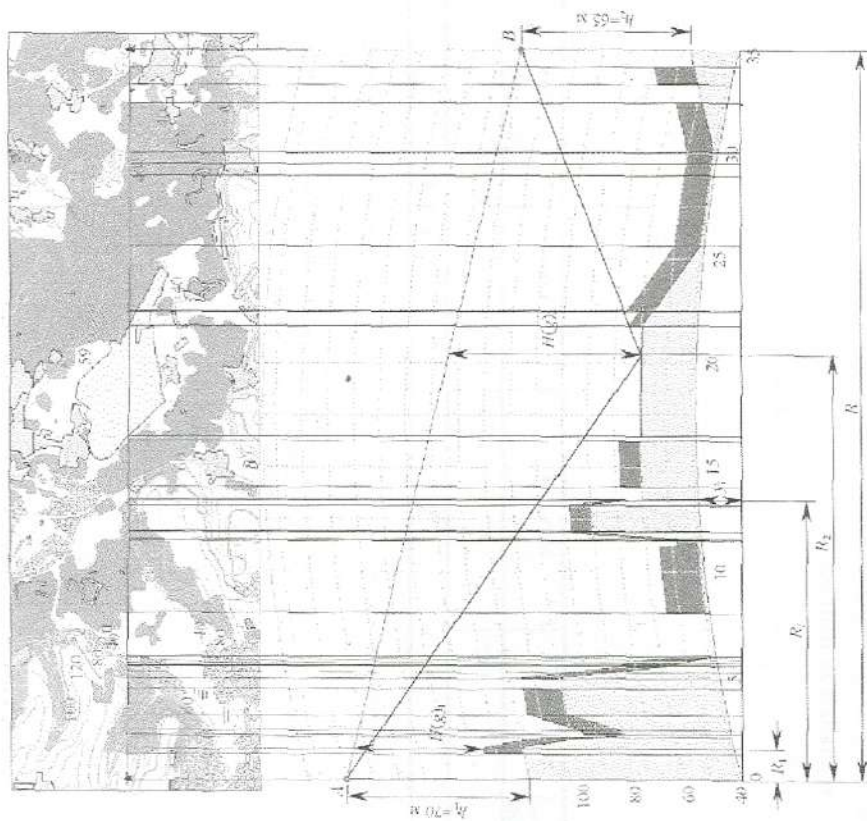


Рис. 5.1

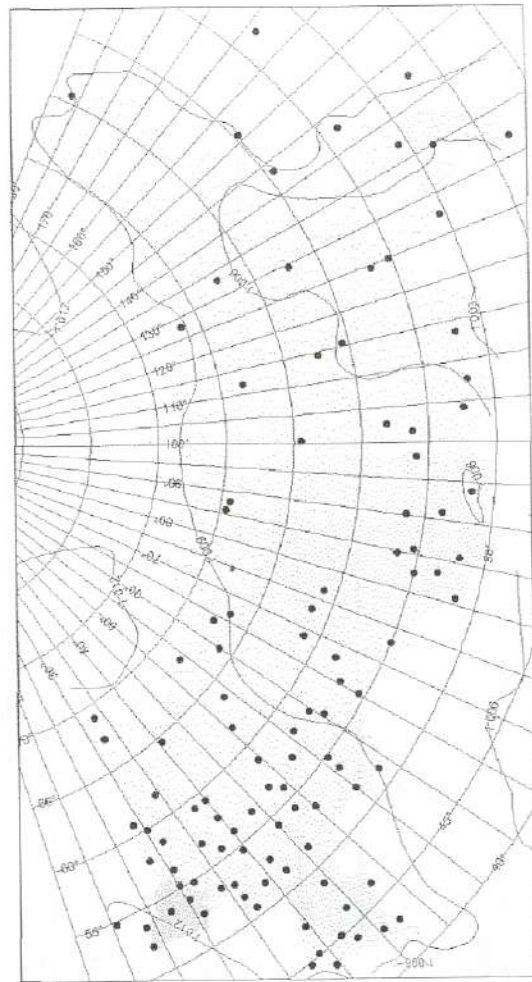


Рис. П.2. Изолинии среднего давления воздуха, гбар

ПРИЛОЖЕНИЕ. РАДИОКЛИМАТИЧЕСКИЙ СПРАВОЧНИК

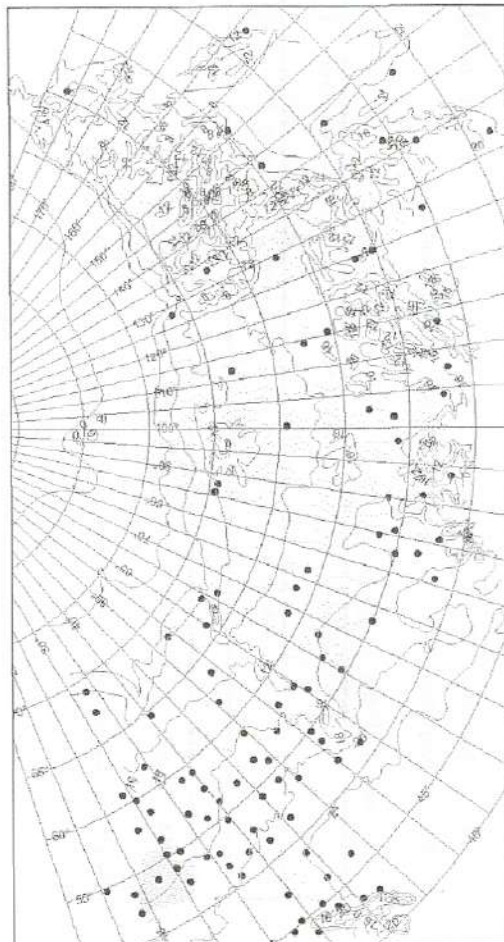


Рис. П.1. Изолинии среднемесячной температуры воздуха [39]

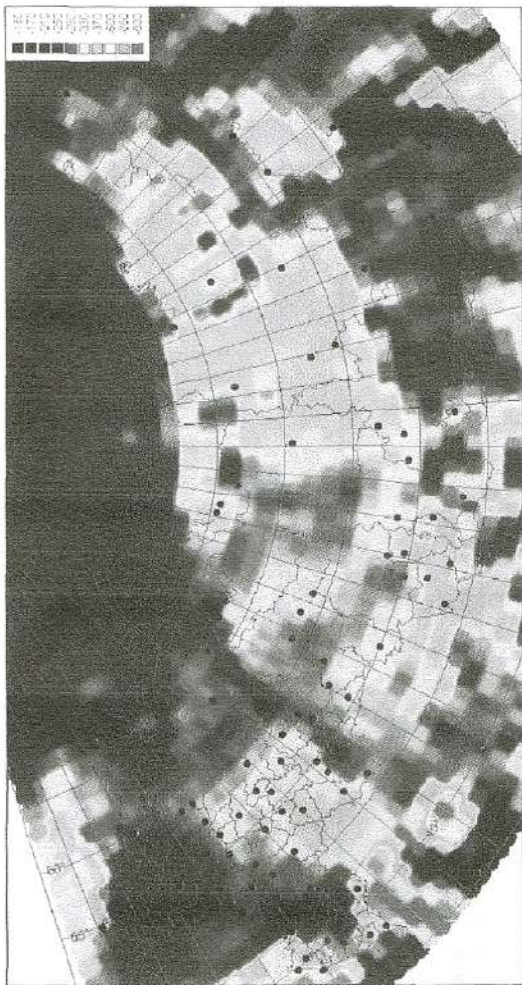


Рис. П.4. Распределение градиента преломляющей способности нижнего слоя (65 м) атмосферы для 1% аргона [37]

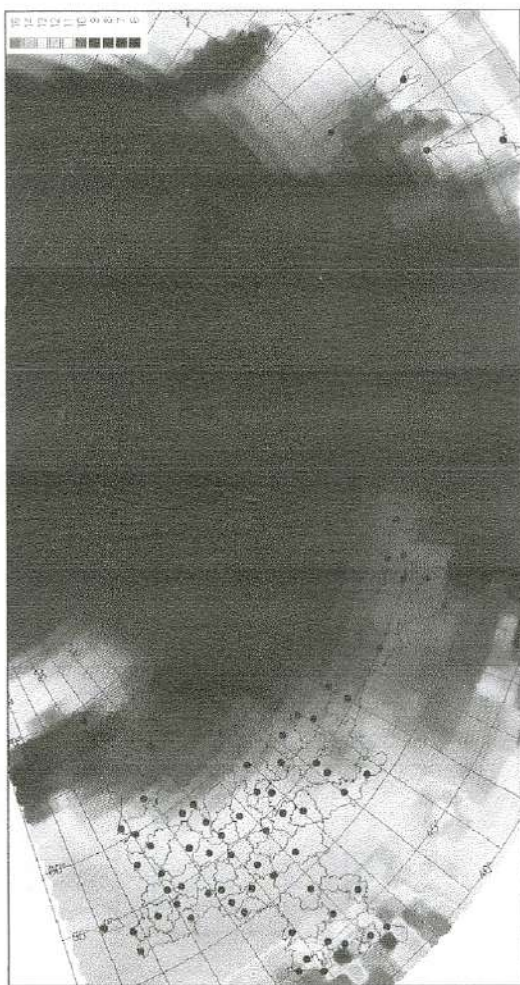


Рис. П.3. Абсолютная влажность воздуха, г/м³

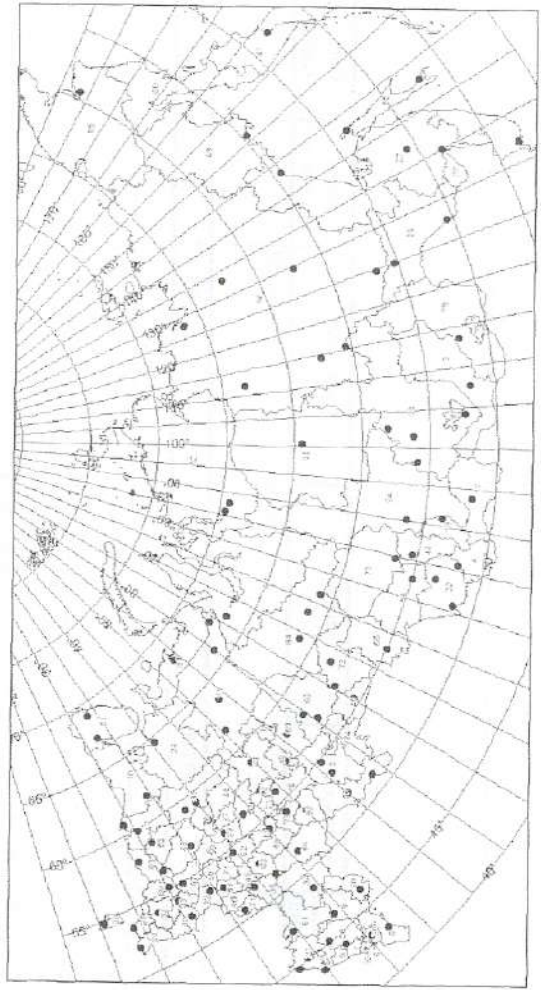


Рис. П.6. Регионы России и Р. Беларусь.

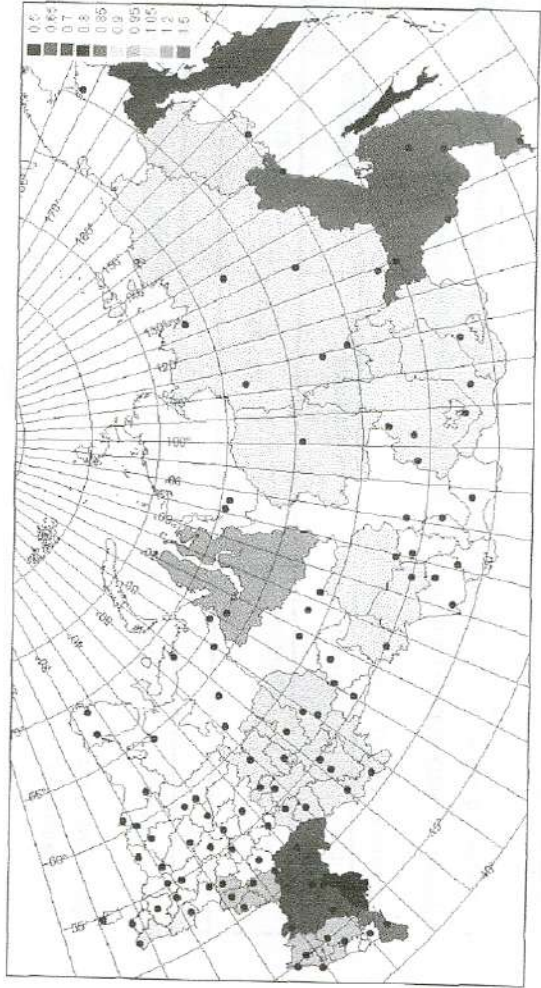


Рис. П.5. Параметр интенсивности дождей  $\xi$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Приказ Минсвязи РФ № 92 от 10.08.96. Нормы на электрические параметры цифровых каналов и трактов магистральной и внутризоновой первичных сетей.
2. ГОСТ Р 50933-96. Каналы и тракты внутризоновых радиорелейных линий.
3. РД 45.145-00. Нормы на показатели ошибок цифровых каналов со скоростью передачи 64 кбит/с для местной сети, включая абонентские линии.
4. РД 45.183-01. Долговременные нормы на цифровые тракты СЦИ, обрванные в цифровых магистральных РРЛ.
5. РД 45.030-99. Общие технические требования на радиорелейное оборудование цифровых магистральных радиорелейных линий ВСС России (редакция 2-99).
6. РД 45.118-99. Общие технические требования на радиорелейное оборудование плезисинхронной цифровой иерархии с пропускной способностью 4x2.048; 8x2.048; 16x2.048; 8.448; 2x8.448; 34.368 Мбит/с цифровых внутризоновых радиорелейных линий ВСС России.
7. РД 45.031-99. Общие технические требования на радиорелейное оборудование цифровых внутризоновых радиорелейных линий ВСС России со скоростью передачи цифрового сигнала 155 Мбит/с (STM-1).
8. Оборудование внутризоновых и местных аналоговых радиорелейных линий ВСС России. Общие технические требования. (Утв. Минсвязи РФ 24.09.2002.)
9. Общие технические требования к аппаратуре цифровых радиосистем абонентского распределения. (Утв. Минсвязи РФ 15.11.96.)
10. Технические требования на оборудование радиосистем цифровой телефонной связи с многократным доступом. (Утв. Минсвязи РФ 18.04.96.)
11. Основные положения развития Взаимосвязанной сети связи Российской Федерации на перспективу до 2005 года. Книга 2. Основные положения развития первичной сети общего пользования. Руководящий документ. (Утв. Решением ГКЭС России № 140 от 20.12.95.)

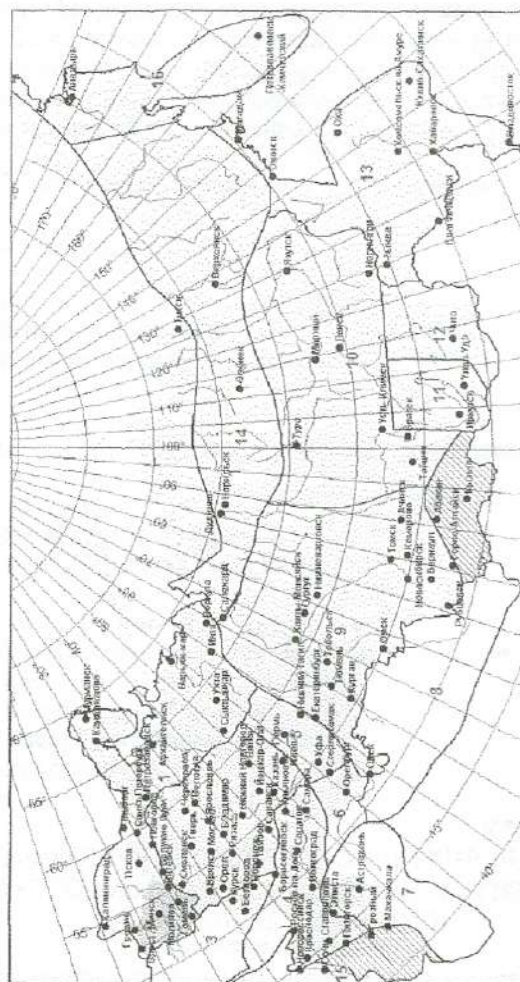


Рис. П.7. Карта районирования территории Российской Федерации, Республики Беларусь, и прилегающих территорий по параметрам распределения вертикального градиента итэлектрической прищидности воздуха

28. Рек. МСЭ-Р F.634-4. Показатели качества по ошибкам для реальных цифровых радиорелейных линий, образующих часть участка высокого качества международных цифровых соединений со скоростью передачи ниже первичной в цифровой сети с интеграцией служб.
29. Рек. МСЭ-Р F.695. Показатели готовности для реальных цифровых радиорелейных линий, образующих часть цепи высокого качества в цифровой сети с интеграцией служб.
30. Рек. МСЭ-Р F.696-2. Показатели качества по ошибкам и готовности для гипотетических эталонных цифровых участков, в которых используются цифровые радиорелейные системы, образующие часть или весь участок среднего качества со скоростью передачи ниже первичной в цифровой сети с интеграцией служб.
31. Рек. МСЭ-Р F.697. Показатели качества по ошибкам и готовности для участка локального качества на каждом конце соединения цифровой сети с интеграцией служб, использующего цифровые радиорелейные системы со скоростью передачи ниже первичной.
32. Рек. МСЭ-Р F.699-6. Эталонные диаграммы излучения антенн радиорелейных систем прямой видимости для использования при изучении вопросов координации и оценки помех в диапазоне частот от 1 до примерно 70 ГГц.
33. Рек. МСЭ-Р F.1093. Влияние многолучевого распространения радиоволн на проектирование и работу цифровых радиорелейных систем прямой видимости.
34. Рек. МСЭ-Р F.1492. Показатели готовности для реальных цифровых радиорелейных линий, образующих часть международного участка цифрового тракта протяженностью 27500 км с постоянной скоростью передачи, равной или превышающей первичную.
35. Рек. МСЭ-Р F.1493. Показатели готовности для реальных цифровых радиорелейных линий, образующих часть национального участка цифрового тракта протяженностью 27500 км с постоянной скоростью передачи, равной или превышающей первичную.
36. Рек. МСЭ-Р F.1698. Показатели качества по ошибкам для реальных цифровых фиксированных беспроводных линий, используемых в гипотетических эталонных трактах и соединениях протяженностью 27500 км.
37. Рек. МСЭ-Р P.453-9. Показатель преломления радиоволн: его формула и данные преломляющей способности.
38. Рек. МСЭ-Р P.526-4. Распространение радиоволн за счет дифракции.

12. Методика расчета трасс аналоговых и цифровых РРЛ прямой видимости. Т. 1, 2. НИИР. - М., 1987.
13. Каменский, Н.Н. Справочник по радиорелейной связи / Н.Н. Каменский, А.М. Модель, Л.В. Наленко и др.; под ред. С.В. Бородича. - М.: Радио и связь, 1981.
14. Козлов, Б.А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики / Б.А. Козлов, И.А. Ушаков. - М.: Советское радио, 1975.
15. Раков, А.И. Надежность радиорелейных и спутниковых линий передачи. - М.: Радио и связь, 1981.
16. Проектирование и расчет радиорелейных линий связи: учеб. пособие для техникумов связи / Под ред. Е.В. Рыжкова. - М.: Связь, 1975.
17. Калинин, А.И. Расчет трасс радиорелейных линий. - М.: Связь, 1964.
18. Калинин, А.И. Распространение радиоволн на трассах наземных и космических радиолиний. - М.: Связь, 1979.
19. Тиммищенко, М.Г. Проектирование радиорелейных линий. - М.: Связь, 1976.
20. Бородич, С.В. ЭМС наземных и космических радиослужб: критерии, условия и расчет. - М.: Радио и связь, 1990.
21. Черенкова, Е.Л. Распространение радиоволн / Е.Л. Черенкова, О.В. Чернышев. - М.: Радио и связь, 1984.
22. Рек. МСЭ-Т G.801. Модели цифровой передачи.
23. Рек. МСЭ-Т G.821. Показатели ошибок международного цифрового соединения, работающего на скорости передачи ниже первичной и образующего часть цифровой сети с интеграцией служб.
24. Рек. МСЭ-Т G.826. Параметры и показатели качества по ошибкам для международных цифровых трактов и соединений из конца в конец с постоянной скоростью передачи, равной или превышающей первичную.
25. Рек. МСЭ-Т G.827. Параметры и показатели готовности для международных цифровых трактов из конца в конец с постоянной скоростью передачи.
26. Рек. МСЭ-Т G.828. Параметры и показатели качества по ошибкам для международных цифровых трактов синхронной иерархии с постоянной скоростью передачи.
27. Рек. МСЭ-Р F.556-1. Гипотетический эталонный цифровой тракт для радиорелейных систем, которые могут составлять часть цифровой сети с интеграцией служб, с пропускной способностью выше второго уровня иерархии.



39. Рек. МСЭ-Р Р.527-3. Электрические характеристики поверхности Земли.
40. Рек. МСЭ-Р Р.530-10. Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования, необходимые для проектирования наземных систем прямой видимости.
41. Рек. МСЭ-Р Р.676-6. Ослабление в атмосферных газах.
42. Рек. МСЭ-Р Р.836-3. Водяной пар: поверхностная плотность и полное содержание
43. Рек. МСЭ-Р Р.837-1. Характеристики атмосферных осадков для моделирования распространения радиоволн.
44. Рек. МСЭ-Р Р.838-2. Модель удельного затухания радиоволн в дожде, используемая в методах прогнозирования.
45. Хенне, И. Проектирование радиорелейных линий прямой видимости / И. Хенне, П. Торвальдсен – *Nega Telecommunications*, 1994.
46. Калинин, А.И. Влияние частотной селективности интерференционных замираний на трассах с пересеченными профилями на устойчивость работы цифровых РРЛ // *Электросвязь*. – 1996. – № 10. – С. 36.
47. Калинин, А.И. Влияние частотной селективности интерференционных замираний на трассах с гладкими профилями на устойчивость работы цифровых РРЛ // *Электросвязь*. – 1998. – № 3. – С. 25.
48. Надененко, Л.В. Длительность замираний сигнала на интервалах радиорелейных линий прямой видимости / Л.В. Надененко, В.В. Святогор // *Электросвязь*. – 1972. – № 5. – С. 6.
49. Калинин, А.И. Статистические распределения глубины замираний на интервалах РРЛ с гладкими профилями // *Труды НИИР*. – 1992. – С. 59.
50. Балаан, М.Г. Статистические характеристики поля сангтиметровых и миллиметровых волн над поверхностью моря / М.Г. Балаан и др. // *Изв. вузов. Сер. Радиофизика*. – 1982. т. 25. – № 11. – С. 1260.
51. Андреев, Г.А. Тепловое излучение миллиметровых волн земными покровами // *Зарубежная радиоэлектроника*. – 1982. – № 12. – С. 3.
52. Надененко, Л.В. Результаты экспериментального исследования распространения дециметровых волн в степных районах Поволжья // *Труды НИИР*. – 1960. – № 3. – С. 7.
53. Лобкова, Л.М. Распространение радиоволн над морской поверхностью. М.: Радио и связь, 1991.
54. Нурматов, Б.Н. Исследование статистических характеристик сигнала на интервалах высокогорных цифровых РРЛ Кыргызской Республики / Б.Н. Нурматов, М.М. Мамабетаалиев, О.Ж. Кайыков, М.О. Оконов, Л.В. Надененко, В.В. Святогор // *Труды НИИР*. – 2003. – С. 47.
55. Раков, А.И. Надежность и устойчивость стволов РРЛ / А.И. Раков, В.К. Аширов // *Электросвязь*. – 1985. – № 7. – С. 16.
56. Троицкий, В.Н. Изучение распространения сангтиметровых волн на открытой трассе большой протяженности // *Труды НИИР*. – 1960. – № 3.
57. Антипенко, В.А. Расчет показателей готовности трактов цифровых радиорелейных линий связи / В.А. Антипенко, Г.О. Василенко // *Электросвязь*. – 2004. – № 12. – С. 19.
58. Антипенко, В.А. Расчет коэффициента неготовности интервала радиорелейной линии связи, обусловленного воздействием дождей / В.А. Антипенко, Г.О. Василенко // *Мобильные системы*. – 2005. – № 2. – С. 16.
59. Атлас СССР. – М.: Главное управление геодезии и картографии при Сов. Мин. СССР, 1969.
60. Новый аэроклиматический справочник пограничного слоя атмосферы над СССР. – Л.: Гидрометеозиздат, 1985.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Р1

### Примеры расчета норм на качественные показатели и готовность ЦРРЛ

#### Пример 1

##### Исходные данные

Для организации ответвления от магистральной системы передачи СЦИ, построенной с использованием волоконно-оптической линии связи, необходимо создание одного интервала ЦРРЛ длиной 35,6 км. Объем передаваемой информации позволяет использовать один дуплексный ствол STM-1, при этом планируются применить стационарное резервирование, с помощью заранее выбранного оборудования. Пусть также условия размещения оборудования на конечных РРС (РРС<sub>1</sub> и РРС<sub>2</sub>) одинаковы, а в электропитание РРС организовано с помощью устройств бесперебойного питания (УБП), коэффициент неготовности которых составляет  $K_{\text{нег УБП}} = 4 \cdot 10^{-6}$ .

##### Необходимо:

- 1) рассчитать нормы на показатели качества и готовности указанной ЦРРЛ;
- 2) рассчитать составляющую неготовности, которая может быть вызвана отказами аппаратуры ЦРРЛ, и приняв во внимание значение  $K_{\text{нег УБП}}$ , оценить долю нормы на неготовность, которая может быть отведена на учет эффектов среды распространения радиоволн на интервале.

##### Расчет

Величина нормы на коэффициент сильнопораженных секунд, %, для интервала длиной  $35,6 < 50$  км согласно (1.2.13):

$$SESR_{\text{норм}} = 100 \cdot 0,002 \cdot 0,06 \cdot 50 / 2500 = 0,00024.$$

Рассчитаем величину нормы на коэффициент неготовности, %, расматриваемого интервала с помощью выражения (1.3.6)

$$K_{\text{нег норм}} = 100 \cdot (1,9 \cdot 10^{-3} \cdot 50 / 2500 + 1,1 \cdot 10^{-2}).$$

Для вычисления  $K_{\text{нег апп}}$  применим соответствующую последовательность расчетов для одного интервала с использованием стационарного резервирования, которая приведена в разд. 1:

1. Оборудование РРС размещается в двух контейнерах – верхнем (ВК) и нижнем (НК). Применяемая параболическая антенна категории *H* (High Reflection) с диаметром 1,8 м, интегрирована с ВК. В ВК размещаются приемники (ПРМ) и передатчики (ПРД), система разделения и объединения СВЧ ствол (РОС), блок контроля и коммутации резервируемых приемников и передат-

чиков (БКР), а также элементы внутреннего монтажа (ВК мнт). В НК размещаются модуляторы (МД) и демодуляторы (ДМ), блоки телеметрии, служебной связи, резервирования модуляторов и демодуляторов (ТМР), интерфейсное оборудование (ИНТ), элементы внутреннего монтажа и разъемы (НК мнт). Соединение ВК и НК осуществляется с помощью коаксиального кабеля, который используется также и для подачи напряжения питания в ВК.

В случае отказа на одной из РРС приемника, передатчика, модулятора или демодулятора, блока телеметрии и резервирования, они автоматически заменяются на имеющиеся резервные, находящиеся в «горячем резерве». В то же время остальные устройства резервированием не обеспечиваются.

2–5. В табл. Р1.1 приведены данные о средней наработке на отказ блоков и устройств РРС, а также сведения о наличии резервирования и принадлежности выделенного оборудования к различным по времени восстановления группам.

Таблица Р1.1

Блок	Нарботка на отказ, ч	Группа	Резервирование
Антенна	$T_{\text{внт}} = 3,5 \cdot 10^6$	Гр1	НРБ
Кабель	$T_{\text{каб}} = 1,5 \cdot 10^6$	Гр1	НРБ
РОС	$T_{\text{РОС}} = 2 \cdot 10^6$	Гр1	НРБ
ПРД	$T_{\text{ПРД}} = 2,5 \cdot 10^6$	Гр1	РБ
ПРМ	$T_{\text{ПРМ}} = 2 \cdot 10^6$	Гр1	РБ
БКР	$T_{\text{БКР}} = 1,5 \cdot 10^6$	Гр1	НРБ
ВК мнт	$T_{\text{ВКмнт}} = 2 \cdot 10^6$	Гр1	НРБ
МД	$T_{\text{МД}} = 3,5 \cdot 10^6$	Гр2	РБ
ДМ	$T_{\text{ДМ}} = 3 \cdot 10^6$	Гр2	РБ
ТМР	$T_{\text{ТМР}} = 5 \cdot 10^6$	Гр2	РБ
ИНТ	$T_{\text{ИНТ}} = 5 \cdot 10^6$	Гр2	НРБ
НК мнт	$T_{\text{НКмнт}} = 7 \cdot 10^6$	Гр2	НРБ

Поскольку условия размещения оборудования на РРС<sub>1</sub> и РРС<sub>2</sub> согласно исходным данным одинаковы, для однотипного оборудования на разных РРС используются единые значения времени (с учетом времени подъезда) восстановления  $T_v$ : для Гр1  $T_{\text{впр1}} = 12$  ч, для Гр2  $T_{\text{впр2}} = 5$  ч.

6. С помощью выражения (1.4.12) рассчитаем общую наработку на отказ резервируемых блоков и устройств, входящих в группу Гр1 для РРС<sub>1</sub>, ч:

$$T_{(\text{прб})\text{Гр1}} = (T_{\text{ант}}^{-1} + T_{\text{каб}}^{-1} + T_{\text{РОС}}^{-1} + T_{\text{БКР}}^{-1} + T_{\text{ВКмнт}}^{-1})^{-1} = \\ = (1/3,5 \cdot 10^6 + 1/1,5 \cdot 10^6 + 1/2 \cdot 10^6 + 1/1,5 \cdot 10^6 + 1/2 \cdot 10^6)^{-1} = 381818,$$

а также резервируемых блоков и устройств, входящих в группу Гр2 для РРС<sub>1</sub>, ч:

$$T_{(рб)гр2} = \left( T_{инт}^{-1} + T_{НКмгт}^{-1} \right)^{-1} = \left( \sqrt{5 \cdot 10^5} + \sqrt{7 \cdot 10^5} \right)^{-1} = 291667.$$

Согласно (1.4.13) наработка на отказ резервируемых блоков и устройств, входящих в группу Гр1 РРС<sub>1</sub>, ч:

$$T_{(рб)гр1} = \left( T_{ГрД}^{-1} + T_{ГрМ}^{-1} \right)^{-1} = \left( \sqrt{2,5 \cdot 10^5} + \sqrt{2 \cdot 10^5} \right)^{-1} = 111111$$

и средняя наработка на отказ резервируемых блоков и устройств группы Гр2, ч:

$$T_{(рб)гр2} = \left( T_{МД}^{-1} + T_{ДМ}^{-1} + T_{МГТ}^{-1} \right)^{-1} = \left( \sqrt{3,5 \cdot 10^5} + \sqrt{3 \cdot 10^5} + \sqrt{5 \cdot 10^5} \right)^{-1} = 122093.$$

7. Значения коэффициентов готовности для резервируемого и резервируемого оборудования группы Гр1 согласно (1.4.14):

$$K_{нет\ апп1(рб)} = \frac{12}{381818} = 3,14 \cdot 10^{-5}, \quad K_{нет\ апп1(рб)} = \frac{12}{111111} = 10,8 \cdot 10^{-5},$$

для группы блоков Гр2 (работающих в помещениях) согласно (1.4.15):

$$K_{нет\ апп2(рб)} = \frac{5}{291667} = 1,71 \cdot 10^{-5}, \quad K_{нет\ апп2(рб)} = \frac{5}{122093} = 4,1 \cdot 10^{-5}.$$

8. Рассчитаем для РРС<sub>1</sub> результирующее значение коэффициента готовности с учетом работы системы резервирования с помощью выражения (1.4.16):

$$K_{нет\ апп(РРС_1)} = 3,14 \cdot 10^{-5} + 1,71 \cdot 10^{-5} + (10,8 \cdot 10^{-5} + 4,1 \cdot 10^{-5})^2 = 4,86 \cdot 10^{-5}.$$

$$9. \quad K_{нет\ апп(РРС_2)} = K_{нет\ апп(РРС_1)} = 4,86 \cdot 10^{-5}.$$

10. Значение коэффициента аппаратной готовности на интервале согласно выражению (1.4.11а):

$$K_{нет\ апп} = 2,4,86 \cdot 10^{-5} = 9,72 \cdot 10^{-5},$$

т. е.  $K_{нет\ апп} = 9,72 \cdot 10^{-3} \%$ .

Учитывая, что устройство бесперебойного питания используется на каждой РРС, получаем:  $K_{нет\ лит} = 2 \cdot K_{нет\ УБП} = 2,4 \cdot 10^{-6} = 8 \cdot 10^{-6}$ , т. е.  $8 \cdot 10^{-4} \%$ .

Исходя из найденных для интервала ЦРРЛ значений  $K_{нет\ норм}$ ,  $K_{нет\ апп}$  и  $K_{нет\ лит}$  с помощью (1.3.7) определим допустимое значение коэффициента готовности, обусловленного эффектами распространения радиоволн, %:

$$K_{нет\ ср} \leq K_{нет\ норм} - (K_{нет\ апп} + K_{нет\ лит}) = 1,48 \cdot 10^{-2} - (9,72 \cdot 10^{-3} + 8 \cdot 10^{-4}) = 4,28 \cdot 10^{-3}.$$

Подчеркнем, что полученное допустимое значение  $K_{нет\ ср}$  при использовании в станции резервирования составляет примерно 29% от общей

нормы на интервал. Если бы резервирование отсутствовало, то значение коэффициента готовности для одной РРС составило бы

$$K_{нет\ апп(РРС_1)} = 3,14 \cdot 10^{-5} + 1,71 \cdot 10^{-5} + 10,8 \cdot 10^{-5} + 4,1 \cdot 10^{-5} = 19,75 \cdot 10^{-5},$$

а для интервала в целом

$$K_{нет\ апп} = 2,19,75 \cdot 10^{-5} = 39,5 \cdot 10^{-5},$$

т. е.  $39,5 \cdot 10^{-2} \%$ , что более чем в два раза превысило бы норму  $K_{нет\ норм} = 1,48 \cdot 10^{-2} \%$ .

## Пример 2

### Исходные данные

Рассматривается создание секции РРЛ для внутризонной сети связи, с помощью заранее определенного оборудования. Протяженность секции  $L = 195$  км. Секция должна содержать 5 интервалов РРЛ. Длина каждого интервала определяется местными условиями:  $R_1 = 25$  км,  $R_2 = 37$  км,  $R_3 = 44$  км,  $R_5 = 36$  км. Скорость передачи составляет 38,464 Мбит/с ( $E_3 + 2E_1$ ). На секции предполагается использовать поучастковое резервирование по схеме 3 + 1 «горный резерв».

С целью формирования данных для детального проектирования секции необходимо рассчитать значения коэффициентов готовности, обусловленных различными факторами, для секции в целом и для отдельных интервалов.

### Расчет

Рассчитаем значение нормы  $K_{нет\ норм}$  для одного дуплексного ствола радиосекции протяженностью 195 км, исходя из того, что РРЛ принадлежит длинной секции (long haul) национального участка ГЭТ. Используя выражения (1.3.2) получаем

$$K_{нет\ норм} = 100(1,9 \cdot 10^{-3} \cdot 195/2500 + 1,1 \cdot 10^{-4}) = 2,582 \cdot 10^{-2} \%,$$

Для вычисления  $K_{нет\ апп}$  применим последовательность расчетов для  $N = 5$  интервалов с использованием поучасткового резервирования, которая приведена в разд. 1:

1. Все радиоэлектронное оборудование каждой РРС размещается в аппаратных помещениях (в зданиях). Антенны категории Н расположены на мачтах и соединяются с радиотехническим оборудованием с помощью эллиптических волноводов. Оборудование в аппаратной скомоновано в вертикальных стойках. Оборудование системы объединения и разделения радиостволов выполнено в виде отдельной стойки, что упрощает работы по его восстановлению. Аппаратура автоматического переключения радиостволов системы резервирования (3 + 1) размещается на оконечных РРС секции.

2. По технической документации на выбранное оборудование установлены следующие значения средней наработки на отказ отдельных блоков и устройств РРС:

- параболическая антенна  $T_{\text{ант}} = 3,5 \cdot 10^6$  ч;
- эллиптический волновод  $T_{\text{ЭВ}} = 3,5 \cdot 10^6$  ч;
- система РОС  $T_{\text{РОС}} = 1 \cdot 10^6$  ч;
- передатчик  $T_{\text{ПРД}} = 1,8 \cdot 10^5$  ч;
- приемник  $T_{\text{ПРМ}} = 1,6 \cdot 10^5$  ч;
- модем  $T_{\text{МОД}} = 1,5 \cdot 10^5$  ч;
- мультиплексоры дополнительных потоков  $T_{\text{МП}} = 1,5 \cdot 10^5$  ч;
- блоки телеметрии и служебной связи  $T_{\text{ТМСС}} = 1 \cdot 10^5$  ч;
- средняя наработка на отказ блоков корректоров и системы переключения при резервировании на оконечных РРС  $T_{\text{РЭС}} = 1,2 \cdot 10^5$  ч.

3. Радиорелейное оборудование одной РРС разделяется на группы:

- Гр1 – работающее на открытом воздухе: антенны и волноводы;
  - Гр2 – работающее в помещениях: все остальные блоки и устройства.
4. Среднее время восстановления отказов оборудования (с учетом времени подъезда):  $T_{\text{в гр1}} = 12$  ч и  $T_{\text{в гр2}} = 5$  ч. Среднее время восстановления аппаратуры автоматического переключения стволов при резервировании, как установленной в помещении, полагается равным  $T_{\text{в РЭС}} = 5$  ч.

5. Резервируемые блоки и устройства одной РРС (НРБ): антенны, волноводы, РОС; резервируемые блоки и устройства (РБ): все остальные блоки и устройства. Аппаратура автоматического переключения стволков не резервируется.

6. С помощью выражения (1.4.12) рассчитаем общую наработку на отказ нерезервируемых блоков и устройств, входящих в группу Гр1 для одной РРС, ч:

$$T_{(\text{нрб})\text{Гр1}} = (T_{\text{ант}}^{-1} + T_{\text{ЭВ}}^{-1})^{-1} = (1/3,5 \cdot 10^6 + 1/3,5 \cdot 10^6)^{-1} = 1,75 \cdot 10^6,$$

а также нерезервируемых блоков и устройств, входящих в группу Гр2 для РРС, ч:

$$T_{(\text{нрб})\text{Гр2}} = T_{\text{РОС}} = 10^6.$$

В группу Гр1 РРС (шаги 3–5) не входят резервируемые устройства, поэтому  $T_{(\text{рб})\text{Гр1}} = \infty$ . Согласно (1.4.13) наработка на отказ резервируемых блоков и устройств, входящих в группу Гр2 одной РРС, ч:

$$T_{(\text{рб})\text{Гр2}} = (T_{\text{ПРД}}^{-1} + T_{\text{ПРМ}}^{-1} + T_{\text{МОД}}^{-1} + T_{\text{МП}}^{-1} + T_{\text{ТМСС}}^{-1})^{-1} = \\ = (1/1,8 \cdot 10^5 + 1/1,6 \cdot 10^5 + 1/1,5 \cdot 10^5 + 1/1,5 \cdot 10^5 + 1/10^5)^{-1} = 28459.$$

7. Значения коэффициентов неготовности для нерезервируемого и резервируемого оборудования групп Гр1 и Гр2 согласно (1.4.14) и (1.4.15):

$$K_{\text{нег апп1(нрб)}} = \frac{12}{1,75 \cdot 10^6} = 6,86 \cdot 10^{-6}, \quad K_{\text{нег апп1(рб)}} = \frac{12}{\infty} = 0,$$

для группы блоков Гр2:

$$K_{\text{нег апп2(нрб)}} = \frac{5}{10^6} = 5 \cdot 10^{-6}, \quad K_{\text{нег апп2(рб)}} = \frac{5}{28459} = 1,757 \cdot 10^{-4}.$$

8. Значения коэффициентов неготовности для резервируемого и нерезервируемого оборудования одной РРС согласно (1.4.18) и (1.4.19):

$$K_{\text{нег апп РРС(рб)}} = 0 + 1,757 \cdot 10^{-4} = 1,757 \cdot 10^{-4},$$

$$K_{\text{нег апп РРС(нрб)}} = 6,86 \cdot 10^{-6} + 5 \cdot 10^{-6} = 1,186 \cdot 10^{-5}.$$

9. Значения коэффициентов неготовности для резервируемого и нерезервируемого оборудования на одном интервале согласно (1.4.20), (1.4.21):

$$K_{\text{нег апп инт(рб)}} = 2 \cdot 1,757 \cdot 10^{-4} = 3,514 \cdot 10^{-4},$$

$$K_{\text{нег апп инт(нрб)}} = 2 \cdot 1,186 \cdot 10^{-5} = 2,371 \cdot 10^{-5}.$$

10. Для всего участка значения коэффициентов неготовности для резервируемого и нерезервируемого оборудования (1.4.22), (1.4.23) будут равны:

$$K_{\text{нег(рб)}} = 5 \cdot 3,514 \cdot 10^{-4} = 1,757 \cdot 10^{-3},$$

$$K_{\text{нег(нрб)}} = 5 \cdot 2,371 \cdot 10^{-5} + 2 \cdot \frac{5}{1,2 \cdot 10^5} = 2,019 \cdot 10^{-4}.$$

11. Результирующее значение коэффициента неготовности дуплексного ствола на всем участке для заданной кратности резервирования (3 + 1) рассчитывается с помощью (1.4.24):

$$K_{\text{нег аппуч}} = 2,019 \cdot 10^{-4} + 2 \left[ 1,757 \cdot 10^{-3} \right]^2 = 2,081 \cdot 10^{-4},$$

т. е.  $K_{\text{нег апп}} = 2,081 \cdot 10^{-2} \%$ .

При условии, что: в звене постоянного тока, используется аккумуляторная батарея соответствующей емкости, индивидуальные выходы питания для каждого дуплексного ствола в РРС имеют электронную защиту, и само устройство бесперебойного питания имеет собственную систему резервирования, ожидаемое значение коэффициента неготовности УБП дуплексного ствола РРС  $K_{\text{нег УБП}} = 4 \cdot 10^{-6}$ . Следовательно:  $K_{\text{нег пит}} = 6 K_{\text{нег УБП}} = 2,4 \cdot 10^{-5}$ , т. е.  $2,4 \cdot 10^{-3} \%$ .

Исходя из найденных для дуплексного ствола секции значений  $K_{\text{нег норм}}$   $K_{\text{нег апп}}$  и  $K_{\text{нег пит}}$  с помощью (1.3.7) определим допустимое значение коэффициента

ента неготовности, обусловленного эффектами распространения радиоволн, %:

$$K_{\text{нет ср}} \leq K_{\text{нет норм}} - (K_{\text{нет ант}} + K_{\text{нет пнт}}) = 2,582 \cdot 10^{-2} - (2,081 \cdot 10^{-2} + 2,4 \cdot 10^{-3}) = 2,61 \cdot 10^{-3}$$

Считая, что условия распространения на интервалах примерно одинаковы, рассчитаем допустимые значения коэффициентов неготовности, обусловленных эффектами распространения радиоволн, для каждого интервала, пропорционально его длине, %:

$$K_{\text{нет ср1}} = K_{\text{нет ср}} \frac{R_1}{L} = 2,61 \cdot 10^{-3} \frac{25}{195} = 3,35 \cdot 10^{-4}$$

$$K_{\text{нет ср2}} = 4,95 \cdot 10^{-4}, K_{\text{нет ср3}} = 5,89 \cdot 10^{-4}, K_{\text{нет ср4}} = 7,09 \cdot 10^{-4}, K_{\text{нет ср5}} = 4,82 \cdot 10^{-4}$$

### Пример 3

Рассмотрим задачу проектирования с помощью ЦРПД сети топологии «звезда», которая должна обеспечить производственную связь на градообразующем предприятии, а также обеспечить связь для гражданского населения, проживающего в рабочих поселках. Необходимо оценить возможность создания такой сети и провести подбор оборудования, которое обеспечит выполнение норм на показатели готовности местной сети связи.

Исходные данные

а) Схема организации сети приведена на рис. P.1.1.

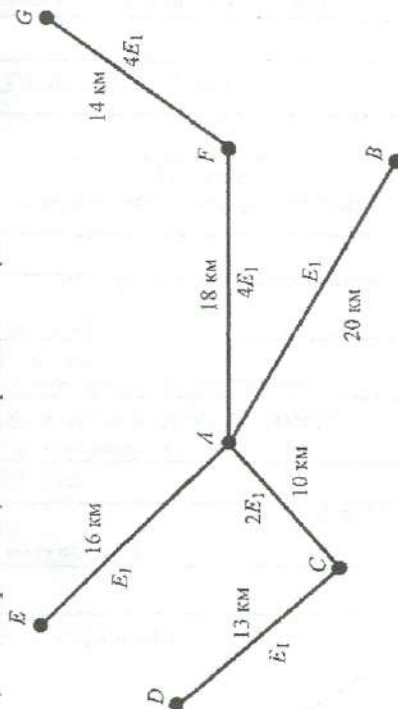


Рис. P.1.1 Схема организации сети

Центральная станция расположена в пункте А. Здесь находится основной узел связи и учредженческо-производственная АТС (УПАТС), которая присоединяется к ТФОП на правах выносного модуля. С УПАТС необходимо связать сельские поселки (пункты В, С, D, E, F, G), с различной численностью абонентов.

б) Местность, в которой предполагается планируемая сеть связи, является

среднепересеченной и покрыта лесом. Условия распространения радиоволн на интервалах можно считать примерно одинаковыми.

б) *Скорость передачи цифровых потоков на различных интервалах*

Исходя из потребности в телефонных каналах в населенных пунктах:

- на участке АFG необходимо передавать 4 потока  $E_1$  (скорость 8,448 Мбит/с);
- на участке СА необходимо передавать 2 потока  $E_1$  (скорость 4,096 Мбит/с);
- на периферийных интервалах DC, EA и BA предусмотрена передача потоков  $E_1$ .

При этом ввод и выделение потоков на РРС в пунктах С, А, F, G осуществляется при помощи группобразующего (мультиплексорного) оборудования. На станциях В, D, E предусмотрена установка первичных мультиплексоров (n-64 кбит/с).

г) *Условия для размещения РРС и обеспечения прямой видимости на интервалах*

Проведенные построения профилей местности для каждого интервала и изучение технических особенностей сооружений в пунктах D, С, А, F, G показали, что существует возможность установить радиотехническое оборудование РРС, кроме антенн и отрезков эллиптических волноводов длиной от 12 до 20 м, непосредственно в помещениях верхних этажей строений. При этом обеспечивается прямая видимость на интервалах DC, СА, AF и FG. Для обеспечения прямой видимости на интервалах EA и BA в пунктах В, E необходима установка мачт высотой 40 и 32 м, соответственно. При этом примонтередиющее оборудование и антенны должны размещаться на указанной высоте, что затрудняет работу по устранению отказов и увеличивает время восстановления.

д) *Требования к коэффициенту неготовности участков сети*

Коэффициент неготовности дуплексного ствола любого участка сети не должен превышать  $5 \cdot 10^{-4}$ , т. е. 0,05 %, что составляет, 4,38 ч. При этом учитываются все возможные причины простоя: ненадежность оборудования РРС и систем электропитания, анормальные условия распространения радиосигнала, ошибки персонала. На всех участках сети оговаривается использование однотипного оборудования.

Расчет

*Предварительная оценка требований к показателям надежности радиорелейного оборудования. Целесообразность резервирования.*

Рассчитаем допустимый коэффициент неготовности, обусловленный аппаратурными отказами, для самого длинного (4 пролета) участка сети DCAF

приблизительно как  $2/3$  от общего коэффициента неготовности, равного  $5 \cdot 10^{-4}$ :

$$K_{\text{нег апп ДСАФГ}} = \frac{2}{3} \cdot 5 \cdot 10^{-4} = 3,333 \cdot 10^{-4}$$

Поскольку на интервалах  $DC$ ,  $CA$ ,  $AF$  и  $FG$  необходимо использовать однотипное оборудование, то на одном интервале  $K_{\text{нег апп инт}} = K_{\text{нег апп ДСАФГ}}/4 = 8,33 \cdot 10^{-5}$ . Это позволяет, определив предварительно время восстановления отказов, рассчитать допустимую среднюю наработку на отказ одного интервала и, далее, одной РРС. Согласно исходным данным в пунктах  $D$ ,  $C$ ,  $A$ ,  $F$ ,  $G$  удается разместить все оборудование РРС в помещениях, что обеспечивает его доступность и безопасность ремонта в любое время года. Учитывая короткие расстояния между станциями, можно принять  $T_b = 3$  ч с учетом времени подъезда из пункта  $A$ . Тогда среднее время наработки на отказ одного интервала и одной РРС составит, ч:

$$T_{\text{выт}} = \frac{T_b}{K_{\text{нег апп инт}}} = \frac{3}{8,33 \cdot 10^{-5}} = 36000,$$

$$T_{\text{РРС}} = 2T_{\text{выт}} = 72000.$$

Рассмотрим вариант без использования резервирования, т. е. конфигурацию  $(1+0)$ . В первом приближении РРС одного дуплексного ствола содержит четыре основные группы устройств, которые могут дать примерно одинаковый вклад в аппаратную неготовность станции. К ним относятся приемник, передатчик, модемное оборудование с регенераторами, мультиплексорное оборудование и оборудование телеметрии и служебной связи. Таким образом, для каждой группы средняя наработка на отказ должна быть равна  $4T_{\text{РРС}} = 288000$  ч. Оборудование РРС такого уровня в принципе существует, но его стоимость значительно превышает стоимость оборудования станций, используемых «горячее резервирование». Поэтому для участка  $ДСАФГ$  следует ориентироваться на современное оборудование среднего класса с резервированием, у которого среднее время наработки на отказ приемника и передатчика имеет величину  $T_{\text{ПРД}}, T_{\text{ПРМ}} = 100 \dots 150 \cdot 10^3$  ч.

Для интервалов  $EA$  и  $BA$ , по которым осуществляется передача потоков  $E_1$ , остановимся пока из экономических соображений на конфигурации оборудования  $(1+0)$ . Приемлемость такого решения обсудим после проведения расчетов достигаемых значений коэффициентов неготовности на этих интервалах.

Следует отметить необходимость использования в создаваемой сети однотипного оборудования РРС, что значительно уменьшит затраты на групповую ЗИП системы.

### Время восстановления отказов оборудования РРС

Выше уже отмечалось, что в пунктах  $D$ ,  $C$ ,  $A$ ,  $F$ ,  $G$  удается создать хорошие условия для проведения восстановления отказавших блоков и устройств РРС ( $T_b = 3$  ч). Исключение составляют антенны и эллиптические волноводы, которые размещаются на дополнительных мачтах (8–16 м) на крышах зданий. С учетом погодных условий, не смотря на удобный доступ для обслуживания, принимаем  $T_{b, \text{АФГ}} = 10$  ч, с учетом времени подъезда.

В пунктах  $B$ ,  $E$  на мачтах, помимо антенны, устанавливаются приемопередающие устройства. Среднее время восстановления АФГ на мачтах принимаем, как и в других пунктах, равным 10 ч. Для замены блоков в приемопередающем устройстве (верхний контейнер) примем  $T_b = 6$  ч, а для блоков оборудования в помещениях —  $T_b = 3$  ч.

### Показатели надежности систем электропитания в различных пунктах

В пунктах  $C$ ,  $A$ ,  $F$ ,  $G$  имеются устройства гарантированного питания в звене переменного тока 50 Гц с использованием резервных дизельных электростанций. Там же для питания оборудования узлов связи устанавливаются системы бесперебойного питания (СБП) с использованием аккумуляторных батарей и резервирования по схеме  $(n+n)$ . Среднее время наработки на отказ такой системы превышает  $10^6$  ч, а восстановление любого отказавшего блока СБП осуществляется без прекращения питания аппаратуры. Коэффициент неготовности таких систем составляет  $K_{\text{нег СБП}} = 10^{-6}$ .

В пунктах  $D$ ,  $B$ ,  $E$  с учетом мощности потребления в звене постоянного тока не более 350 Вт устанавливаются источники бесперебойного питания (ИБП). Коэффициент неготовности таких устройств составляет  $K_{\text{нег ИБП}} = 4 \cdot 10^{-6}$ .

Применение СБП и ИБП практически полностью устраняет сбои в работе цифровых систем, обусловленные процессами в звене питания переменным током.

### Среднее время наработки на отказ блоков и устройств РРС

В отличие от примеров 1 и 2, когда тип применяемого оборудования РРС был заранее известен, в данном случае такое решение не принято. Проводимые расчеты должны помочь обоснованный выбор оборудования.

Поскольку рассматриваемая сеть связи имеет достаточно сложную структуру, эвристические подходы к выбору типа оборудования, скорее всего, не дадут положительного результата. Выходом из такого положения является использование на этапе предварительных расчетов усредненных данных о средней наработке на отказ блоков и устройств РРС, характерных для представленных на рынке отечественных и зарубежных моделей.

Анализ технических характеристик многих моделей РРС, которые могли бы претендовать на использование в рассматриваемом проекте, показывают, что в конструктивном исполнении они, в большинстве случаев, содержат верхний контейнер (ВК), в котором размещаются приемопередатчики, система РЭС, блоки переключения и резервирования, и нижний контейнер (НК). В НК располагается модемное оборудование, оборудование телеметрии, служебной связи и резервирования, а также в ряде случаев мультиплексорное оборудование. Для диапазонов частот 11-18 ГГц подобное оборудование имеет следующие значения времени средней наработки на отказ основных блоков и устройств:

- параболическая антенна категории S  $T_{ант} = 1 \cdot 10^6$  ч;
- эллиптический волновод, коаксиальный кабель  $T_{фид} = 3,5 \cdot 10^6$  ч;
- система РЭС  $T_{РОС} = 1,5 \cdot 10^6$  ч;
- приемопередатчик  $T_{ПРМД} = 80000$  ч;
- блок коммутации и резервирования ВК  $T_{БКР} = 1,5 \cdot 10^6$  ч;
- ВК (монтаж, разъемы)  $T_{ВКмнт} = 2 \cdot 10^6$  ч;
- модем  $T_{мод} = 1,5 \cdot 10^5$  ч;
- блоки служебной связи, телеметрии и резервирования НК  $T_{ТМР} = 1,5 \cdot 10^3$  ч;
- НК (монтаж, разъемы)  $T_{НКмнт} = 7 \cdot 10^5$  ч;
- аппаратура временного группообразования (мультиплексирования)  $T_{АВГ} = 2,5 \cdot 10^5$  ч.

Для РРС, в которых осуществляется стационарное резервирование, как правило, резервированием охватываются приемопередатчики, модемы, блоки служебной связи, телеметрии и резервирования.

Используем для предварительных расчетов показатели готовности для участков и интервалов сети РРС приведенные выше данные о средней наработке на отказ устройств и блоков РРС, а также величин  $T_{в}$ ,  $K_{нег СБП}$  и  $K_{нег ИБП}$ .

#### Последовательность выполнения расчетов

1. Рассчитаем значения коэффициентов готовности устройств и блоков РРС (для полуконспекта), работающих на участке DCAFG сети:

1.1. Резервируемые устройства и блоки:

$$K_{нег ант} = \frac{T_{в}}{T_{ант}} = \frac{10}{10^6} = 10^{-5}, \quad K_{нег РОС} = \frac{T_{в}}{T_{РОС}} = \frac{3}{1,5 \cdot 10^6} = 2 \cdot 10^{-6},$$

$$K_{нег фид} = 2,86 \cdot 10^{-6}, \quad K_{нег БКР} = 2 \cdot 10^{-6}, \quad K_{нег БКмнт} = 5 \cdot 10^{-6},$$

$$K_{нег ПКмнт} = 4,286 \cdot 10^{-6}, \quad K_{нег АВГ} = 1,2 \cdot 10^{-5}.$$

#### 1.2. Резервируемые блоки:

$$K_{нег ПРМД} = \frac{T_{в}}{T_{ПРМД}} = \frac{3}{80000} = 3,75 \cdot 10^{-5}, \quad K_{нег мод} = 2 \cdot 10^{-5}, \quad K_{нег ТМР} = 2 \cdot 10^{-5}.$$

2. Коэффициент готовности группы резервируемых устройств и блоков РРС в пунктах D, C, A, F, G

$$K_{нег ант РРС(прб)} = K_{нег ант} + K_{нег РОС} + K_{нег фид} + K_{нег БКР} + K_{нег БКмнт} + K_{нег НКмнт} + K_{нег АВГ} =$$

$$= 10^{-5} + 2 \cdot 10^{-6} + 2,86 \cdot 10^{-6} + 2 \cdot 10^{-6} + 5 \cdot 10^{-6} + 4,286 \cdot 10^{-6} + 1,2 \cdot 10^{-5} = 3,814 \cdot 10^{-5}.$$

3. Коэффициент готовности группы резервируемых устройств и блоков РРС в пунктах D, C, A, F, G

$$K_{нег ант РРС(прб)} = K_{нег мод} + K_{нег ТМР} = 7,75 \cdot 10^{-5}.$$

4. Рассчитаем значения коэффициентов аппаратурной готовности, %, с учетом стационарного резервирования части блоков РРС в пунктах D, C, A, F, G

4.1. Для одной РРС

$$K_{нег ант РРС(прб)} = (K_{нег ант РРС(прб)})^2 + K_{нег ант РРС(прб)} =$$

$$= (7,75 \cdot 10^{-5})^2 + 3,814 \cdot 10^{-5} = 3,815 \cdot 10^{-5}, \quad \text{т. е. } 3,815 \cdot 10^{-3} \%$$

4.2. Для одного интервала на участке DCAFG

$$K_{нег ант ант} = 2K_{нег ант РРС} = 2 \cdot 3,815 \cdot 10^{-5} = 7,63 \cdot 10^{-5}, \quad \text{т. е. } 7,63 \cdot 10^{-3} \%$$

4.3. Для всего участка DCAFG

$$K_{нег ант (CAFG)} = 4K_{нег ант ант} = 4 \cdot 7,63 \cdot 10^{-5} = 3,052 \cdot 10^{-4}, \quad \text{т. е. } 3,052 \cdot 10^{-2} \%$$

5. С учетом найденного для всего участка DCAFG коэффициента аппаратурной готовности и того, что  $K_{нег ант} = 7K_{нег СБП} + K_{нег ИБП} = 1,1 \cdot 10^{-3}$ , т. е.  $1,1 \cdot 10^{-3} \%$ , рассчитаем допустимое значение коэффициента готовности, обусловленного эффектами распространения радиоволн, %:

$$K_{нег ср (CAFG)} \leq 2K_{нег норм} - (K_{нег ант (CAFG)} + K_{нег ант}) =$$

$$= 0,05 - (3,052 \cdot 10^{-2} + 1,1 \cdot 10^{-3}) = 0,01838.$$

6. Рассчитаем значения коэффициентов готовности для интервалов EA и BA, резервирования оборудования на которых не предусмотрено. Необходимо учесть, что значения времени восстановления в пунктах B, E отличаются от принятого в пункте A, так как отличается место размещения ВК. Отличаются также значения коэффициентов готовности оборудования электропитания.

6.1. Рассчитаем значения коэффициента аппаратурной готовности для РРС интервалов EA и BA, установивших в пункте A:

$$K_{\text{нет апп РРС(A)}} = K_{\text{нет апп РРС(рб)}} + K_{\text{нет апп РРС(нрб)}} = 7,75 \cdot 10^{-5} + 3,814 \cdot 10^{-5} = 1,1564 \cdot 10^{-4}$$

6.2. Рассчитаем значения коэффициента аппаратурной готовности для РРС интервалов EA и BA, установивших в пунктах B, E, учитывая при этом, что готовность приемопередатчиков, РОС и БКР определяется большим временем восстановления, чем в пункте A:

$$K_{\text{нет ПРДМ}} = \frac{6}{80000} = 7,5 \cdot 10^{-5}, \quad K_{\text{нет РОС}} = \frac{10}{1,5 \cdot 10^6} = 6,67 \cdot 10^{-6},$$

$$K_{\text{нет БКР}} = \frac{10}{1,5 \cdot 10^6} = 6,67 \cdot 10^{-6},$$

$$K_{\text{нет апп РРС(BE)}} = 10^{-5} + 6,67 \cdot 10^{-6} + 2,86 \cdot 10^{-6} + 6,67 \cdot 10^{-6} + 5 \cdot 10^{-6} + 4,286 \cdot 10^{-6} + 1,2 \cdot 10^{-5} + 7,5 \cdot 10^{-5} + 2 \cdot 10^{-5} + 2 \cdot 10^{-5} = 1,62 \cdot 10^{-4}$$

6.3. Рассчитаем значение коэффициента аппаратурной готовности для каждого из интервалов EA и BA

$$K_{\text{нет апп ант}} = K_{\text{нет апп РРС(A)}} + K_{\text{нет апп РРС(B, E)}} = 1,1564 \cdot 10^{-4} + 1,62 \cdot 10^{-4} = 2,77 \cdot 10^{-4}$$

7. Рассчитаем коэффициент аппаратурной готовности на участке EAB, %:  
 $K_{\text{нет апп (EAB)}} = 2,77 \cdot 10^{-4} = 5,54 \cdot 10^{-4}$  т. е. 0,0554,  
 что уже превышает норматив  $K_{\text{нет норм}} = 0,05$ .

Таким образом, при заданной конфигурации оборудования и времени восстановления отказов требования по коэффициенту готовности на участке сети EAB, не могут быть выполнены. Основной и главной причиной этого являются коэффициент аппаратурной готовности, обусловленный отсутствием резервирования и большим временем восстановления. Поскольку в силу объективных причин, как правило, время восстановления отказов уменьшить не удается, следует на интервалах EA и BA применять резервирование оборудования, подобно интервалам участка DSAFG. В этом случае:

8. Коэффициент готовности группы нерезервируемых устройств и блоков РРС в пунктах B, E

$$K_{\text{нет апп РРС(рб)}} = K_{\text{нет ант}} + K_{\text{нет РОС}} + K_{\text{нет фид}} + K_{\text{нет БКР}} + K_{\text{нет ВК ант}} + K_{\text{нет ПК ант}} + K_{\text{нет АВГ}} = 10^{-5} + 6,67 \cdot 10^{-6} + 2,86 \cdot 10^{-6} + 6,67 \cdot 10^{-6} + 5 \cdot 10^{-6} + 4,286 \cdot 10^{-6} + 1,2 \cdot 10^{-5} = 4,749 \cdot 10^{-5}$$

9. Коэффициент готовности группы резервируемых устройств и блоков РРС в пунктах B, E

$$K_{\text{нет апп РРС(рб)}} = K_{\text{нет ПРДМ}} + K_{\text{нет мол}} + K_{\text{нет ТМР}} = 7,5 \cdot 10^{-5} + 2 \cdot 10^{-5} + 2 \cdot 10^{-5} = 1,15 \cdot 10^{-4}$$

10. Коэффициент готовности для одной РРС в пунктах B, E:

$$K_{\text{нет апп РРС}} = (K_{\text{нет апп РРС(рб)}})^2 + K_{\text{нет апп РРС(нрб)}} = (1,15 \cdot 10^{-4})^2 + 4,749 \cdot 10^{-5} = 4,75 \cdot 10^{-5}$$

11. Теперь коэффициент аппаратурной готовности для интервалов EA и BA:

$$K_{\text{нет апп ант}} = K_{\text{нет апп РРС(A)}} + K_{\text{нет апп РРС(B, E)}} = 3,815 \cdot 10^{-5} + 4,75 \cdot 10^{-5} = 8,565 \cdot 10^{-5}$$

12. Коэффициент аппаратурной готовности для участка EAB, %:

$$K_{\text{нет апп (EAB)}} = 2,8565 \cdot 10^{-5} = 1,713 \cdot 10^{-4}, \text{ т. е. } 1,713 \cdot 10^{-4}$$

13. С учетом найденного для участка EAB коэффициента аппаратурной готовности и того, что  $K_{\text{нет ант}} = 2(K_{\text{нет СБВ}} + K_{\text{нет ИБП}}) = 2(4 \cdot 10^{-6} + 10^{-6}) = 10^{-5}$ , т. е.  $10^{-5}$  %, рассчитаем допустимое значение коэффициента готовности, обусловленного эффектами распространения радиоволн на данном участке, %:

$$K_{\text{нет ср (EAB)}} \leq 0,05 - (1,713 \cdot 10^{-2} + 10^{-3}) = 0,03187$$

14. Коэффициенты аппаратурной готовности, готовности систем питания и допуски на неблагоприятное воздействие среды распространения на различных многоинтервальных участках сети приведены в табл. P1.2.

Таблица P1.2

Участок	Длина, км	$K_{\text{нет ант}}$ , %	$K_{\text{нет ант}}$ , %	$K_{\text{нет ант}}$ , %	$K_{\text{нет ант}} + K_{\text{нет ант}}$ , %	$K_{\text{нет ср}}$ , %
DSAFC	55	$3,052 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$3,162 \cdot 10^{-2}$	$\leq 1,813 \cdot 10^{-2}$	
EAB	36	$1,713 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$1,813 \cdot 10^{-2}$	$\leq 3,187 \cdot 10^{-2}$	
EAFG	48	$2,383 \cdot 10^{-2}$	$9,0 \cdot 10^{-3}$	$2,473 \cdot 10^{-2}$	$\leq 2,528 \cdot 10^{-2}$	
EACD	39	$2,383 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$2,503 \cdot 10^{-2}$	$\leq 2,498 \cdot 10^{-2}$	
BAFG	52	$2,383 \cdot 10^{-2}$	$9,0 \cdot 10^{-3}$	$2,473 \cdot 10^{-2}$	$\leq 2,528 \cdot 10^{-2}$	
BACD	43	$2,383 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$2,503 \cdot 10^{-2}$	$\leq 2,498 \cdot 10^{-2}$	

15. Рассчитаем допустимые значения коэффициентов готовности, обусловленных эффектами распространения радиоволн, на каждом отдельном интервале. Ввиду схожести (согласно исходным данным) условий распространения на интервалах сети расчет можно вести исходя из допустимого значения для каждого участка пропорционально длине интервала на этом участке. Поскольку



каждый интервал входит в несколько участков сети, необходимо выбирать наименьшее допустимое значение. Допустимые значения коэффициентов неготовности (%), обусловленных эффектами распространения радиоволн, для каждого отдельного интервала, как части какого-либо участка, приведены в табл. P1.3.

Дальнейшие действия проектировщиков должны быть направлены на выбор конкретного типа радиорелейного оборудования. Приведенные данные предварительных расчетов дают некоторые ориентиры.

Таблица P1.3

Инт.	DCAFG	EAB	EAFG	EACD	BAFG	BACD	min
DC	$\leq 4,344 \cdot 10^{-3}$	-	-	$\leq 8,325 \cdot 10^{-3}$	-	$\leq 7,551 \cdot 10^{-3}$	$\leq 4,344 \cdot 10^{-3}$
CA	$\leq 3,342 \cdot 10^{-3}$	-	-	$\leq 6,404 \cdot 10^{-3}$	-	$\leq 5,808 \cdot 10^{-3}$	$\leq 3,342 \cdot 10^{-3}$
AF	$\leq 6,015 \cdot 10^{-3}$	-	$\leq 9,478 \cdot 10^{-3}$	-	$\leq 8,749 \cdot 10^{-3}$	-	$\leq 6,015 \cdot 10^{-3}$
I-G	$\leq 4,679 \cdot 10^{-3}$	-	$\leq 7,372 \cdot 10^{-3}$	-	$\leq 6,805 \cdot 10^{-3}$	-	$\leq 4,679 \cdot 10^{-3}$
EA	-	$\leq 1,416 \cdot 10^{-2}$	$\leq 8,425 \cdot 10^{-3}$	$\leq 1,025 \cdot 10^{-3}$	-	-	$\leq 8,425 \cdot 10^{-3}$
BA	-	$\leq 1,771 \cdot 10^{-2}$	-	-	$\leq 9,721 \cdot 10^{-3}$	$\leq 1,162 \cdot 10^{-3}$	$\leq 9,721 \cdot 10^{-3}$

Следующим шагом являются расчеты  $K_{\text{нег ср}}$  на интервалах с использованием конкретных характеристик радиооборудования. Если при этом получаются удовлетворительные результаты, то далее необходимо уточнить значение коэффициента аппаратурной неготовности, которое может обеспечить конкретный выбранный тип РРС.

Выполненные расчеты и их результаты, хотя и носят предварительный характер, полезны в том отношении, что они позволяют проследить роль элементов оборудования РРС в обеспечении заданных требований к коэффициенту неготовности радиолиний. Из них хорошо видно, что часто встречающаяся в некоторых руководствах по проектированию РРЛ рекомендация проводить расчет интервалов на предмет учета влияния эффектов распространения радиоволн, исходя из доли одна третья от общей нормы на коэффициент неготовности, может приводить к ошибочным результатам.

## ПРИЛОЖЕНИЕ P2

### Пример анализа интервала

Проведем анализ интервала, профиль которого приведен на рис. 7.1 (см. цветную вклейку).

Будем считать, что интервал расположен в районе № 1 карты районирования территории России по параметрам распределения вертикального градиента диэлектрической проницаемости воздуха (см. прил.).

Пусть высоты подвеса левой и правой антенн относительно поверхности земли в месте установки равны 64 и 57 м, соответственно, и  $f = 11 \text{ ГГц}$  ( $\lambda = 0,3/11 \approx 0,0273 \text{ м}$ ).

1. Для интервалов, расположенных в районе № 1, нижняя и верхняя границы диапазона возможных изменений вертикального градиента определяются одной парой значений  $\bar{g}$  и  $\sigma$  равной, соответственно,  $-9 \cdot 10^{-8}$  и  $7 \cdot 10^{-8}$ , 1/м. Однако, поскольку протяженность интервала составляет 30 км, т. е. менее 50 км, интервал попадает под действие примеч. 5.5.

Согласно (П.1)

$$\alpha(30) = \left( 10 \cdot 10^{-8} + \frac{-9 \cdot 10^{-8}}{3,1} \right) \left( \frac{1}{y(30)} - 1 \right) + \frac{7 \cdot 10^{-8}}{y(30)} = 9,5 \cdot 10^{-8}, \text{ 1/м,}$$

где согласно (П.2)  $y(30) = 0,85$ .

Таким образом, верхняя граница диапазона изменений вертикального градиента диэлектрической проницаемости воздуха на данном интервале, 1/м:

$$g_b = -9 \cdot 10^{-8} + 4,3 \cdot 9,5 \cdot 10^{-8} = 31,8 \cdot 10^{-8}$$

2. Согласно (5.2)  $a_3 = 8930000 \text{ м}$ .

3. Из профиля, построенного для  $\bar{g}$  (см. цветную вклейку, рис. P2.1), видно, что интервал в условиях средней рефракции является полуоткрытым:

$$H(\bar{g}) = 0,65 \cdot H_0 = 0,65 \cdot \sqrt{\frac{1}{3} \cdot 0,0273 \cdot 30000 \cdot 0,533 (1 - 0,533)} = 0,65 \cdot 8,24 = 5,3 \text{ м.}$$

5. Так как  $H(\bar{g}) > 0$ , то с помощью (5.9) определяется значение  $g_r$ , 1/м

$$g_r = 9 \cdot 10^{-8} - 4 \frac{8,24 - 5,3}{30000^2 \cdot 0,533 (1 - 0,533)} = -14,2 \cdot 10^{-8}$$

6. Найденное значение  $g_r$  принадлежит диапазону ( $g_{nr}, g_b$ ) и определяет поддиапазоны О и ПЗ, соответственно как ( $g_{nr} = 14,2 \cdot 10^{-8}$ ) и  $(-14,2 \cdot 10^{-8}, 31,8 \cdot 10^{-8})$ .

### ПРИЛОЖЕНИЕ P3 Пример расчета ослабления в свободном пространстве и атмосферных газах

Рассчитаем потери распространения в условиях чистой атмосферы для интервала, расположенного в Ленинградской области, длина которого составляет 30 км и  $f = 11 \text{ ГГц}$ .

Координаты центра интервала составляют  $\text{Ш} = 59,7^\circ$ ,  $\text{Д} = 31,0^\circ$ .

Потери распространения в условиях чистой атмосферы складываются из ослабления в свободном пространстве  $L_0$  и в атмосферных газах  $A_g$ .

Ослабление в свободном пространстве, дБ, рассчитывается с помощью выражения (3.1)

$$L_0 = 92,45 + 20 \lg |1 + 20| g_0 = 142,82.$$

Ослабление в атмосферных газах определяется согласно процедуре разд. 4:

1. Расстояние между центром интервала (Ш<sub>1</sub> = Ш = 59,7; Д<sub>1</sub> = Д = 31,0) и пунктом № 63 (Санкт-Петербург Ш<sub>2</sub> = 59,967; Д<sub>2</sub> = 30,3) из табл. П.3 равно (см. примеч. к табл. П.3)

$$r = 6370 \arccos \left[ \sin \left( \frac{\pi}{180} \cdot 59,7 \right) \sin \left( \frac{\pi}{180} \cdot 59,967 \right) + \cos \left( \frac{\pi}{180} \cdot 59,7 \right) \cos \left( \frac{\pi}{180} \cdot 59,967 \right) \cos(0,0122) \right] = 49,$$

где  $\delta l = \pi \cdot \min \{ |31,0 - 30,3|, |360 - |31,0 - 30,3|| \} / 180 = 0,0122$ . Поскольку вычисленное расстояние  $r$  меньше 50 км, показатели температуры воздуха, атмосферного давления и абсолютной влажности выбираются в соответствии с табл. П.3 равными:

$$t = 15^\circ\text{C}, p = 1003,2 \text{ мбар}, \rho = 10,13 \text{ г/м}^3.$$

2. С помощью (4.1) рассчитывается удельное ослабление в кислороде воздуха, дБ/км:

$$\gamma_{\text{O}} = \left[ \frac{7,2 \cdot 10^{-8}}{11^2 + 0,34(0,990)^2 \cdot 1,6} + \frac{0,62 \cdot 0,999}{(54 - 11)^2 \cdot 1,6 \cdot 0,999 + 0,83 \cdot 0,993} \right] 11^2 \cdot (0,990)^2 \cdot 10^{-3} \approx 7,37 \cdot 10^{-3} \text{ дБ/км.}$$

3. С помощью (4.2) рассчитывается удельное ослабление в водяном паре, дБ/км:

$$\gamma_{\text{H}_2\text{O}} = \left\{ \frac{3,98 \cdot 1,007 \exp[2,23(d-1)]}{(11 - 22,235)^2 + 9,42 \cdot 1,007^2} \cdot 1,111 + \frac{11,96 \cdot 1,007 \exp[0,7(1-1)]}{(11 - 183,31)^2 + 1,14 \cdot 1,007^2} + \frac{0,081 \cdot 1,007 \exp[6,44(1-1)]}{(11 - 321,226)^2 + 6,29 \cdot 1,007^2} + \frac{3,66 \cdot 1,007 \exp[1,6(1-1)]}{(11 - 325,153)^2 + 9,22 \cdot 1,007^2} + \frac{25,37 \cdot 1,007 \exp[1,09(1-1)]}{(11 - 380)^2} + \frac{17,4 \cdot 1,007 \exp[1,46(1-1)]}{(11 - 448)^2} + \frac{844,6 \cdot 1,007 \exp[0,17(1-1)]}{(11 - 557)^2} \cdot 1,924 + \frac{290 \cdot 1,007 \exp[0,4(1-1)]}{(11 - 752)^2} \cdot 1,943 + \frac{8,3328 \cdot 10^4 \cdot 1,085 \exp[0,99(1-1)]}{(11 - 1780)^2} \cdot 1,976 \cdot 11^2 \cdot 10,13 \cdot 10^{-4} = 0,0119.$$

4. Ослабление в атмосферных газах (4.4), дБ:

$$A_g = (7,37 \cdot 10^{-3} + 0,0119) \cdot 30 = 0,58.$$

Далее

$$L_0 + A_g = 142,82 + 0,58 = 143,4 \text{ дБ.}$$

## ПРИЛОЖЕНИЕ Р4

### Примеры расчета дифракционных потерь

#### Пример 1

Рассчитаем дифракционные потери на интервале, профиль которого приведен на рис. 7.1 (см. цветную вставку) ( $g_1 = 31,8 \cdot 10^{-8}$  /м). Описание профиля земли в месте установки равны 64 и 57 м, соответственно, и  $f = 11$  ГГц ( $\lambda = 0,3/11 = 0,0273$  м).

Путь высоты подвеса левой и правой антенн относительно поверхности земли в месте установки равны 64 и 57 м, соответственно, и  $f = 11$  ГГц ( $\lambda = 0,3/11 = 0,0273$  м).

Таблица Р4.1

Рельеф	Описание профиля			
	Застройка	Лес	Вода	
0	20000	20100	25	23000   29000   30
9000	3			
10000	40			
11000	47			
12000	40			
13000	25			
14000	25			
15000	35			
16000	47			
17000	47			
17500	20			
24000	20			
28000	20			
30000	6			

По своим характеристикам интервал не может быть отнесен к «сферическому», поэтому дифракционные потери необходимо вычислять согласно ч. 2 процедуры расчета.

1.2.1. Линия гипотетического пути распространения сигнала имеет два излома и огибает одно из препятствий рельефа местности. Следовательно, число затеняющих препятствий не должно превышать трех. При этом необходимо

учитывать возможность объединения двух препятствий, образованных рельефом местности, то есть выполнение (7.1):

$$\lg \left( \pi - \arcsin \sqrt{30000(16000 - 11000) / [16000(30000 - 11000)]} \right) = 0,373 < 0,408$$

Так как условие (7.1) не выполняется, то препятствия рельефа рассматриваются как отдельные затеняющие препятствия.

Таким образом, на интервале при заданных условиях рефракции имеется три затеняющих препятствия и, соответственно, четыре подынтервала.

1.2.2. Только на третьем подынтервале имеется полузатеняющее препятствие.

2.2.1. Затеняющие препятствия аппроксимируются цилиндрами. Значения необходимых для дальнейших расчетов геометрических характеристик приведены в табл. Р4.2 для каждого затеняющего препятствия (см. шпательную вставку, рис. Р4.1–Р4.3).

Таблица Р4.2

Параметр	1-е препятствие	2-е препятствие	3-е препятствие	Источник
$R_y$	11000	16390	23000	Из профиля
$d_1$	11000	5390	6000	Из профиля
$d_2$	5000	6610	7000	Из профиля
$h$	2,44	4,61	2,25	Из профиля (7.6)
$v$	0,356	0,725	0,339	
$d_{\text{пр}}(d_{\text{н}})$	2000	2500	0	$R_q - R_p$ (из профиля)
$r$	0,013	0,065	—	(7.2)
$a_{\text{ц}}$	65560	32350	0	(7.3) или (7.4)

2.2.2. Полузатеняющее препятствие на подынтервале между вторым и третьим затеняющим препятствием аппроксимируется полуплоскостью. Так как данный объект застройки является полузатеняющим, то не важно, представляет ли он здание или квартал. Значения геометрических характеристик приведены в табл. Р4.3 (см. цветную вставку, рис. Р4.4).

Таблица Р4.3

Параметр	Полузатеняющее препятствие	Источник
$R_y$	20000	Из профиля
$d_1$	3000	Из профиля
$d_2$	3000	Из профиля
$h$	—2,08	Из профиля
$v$	—0,459	(7.6)

3.2. Значения параметров, входящих в (7.14), приведены в табл. P4.4.

Таблица P4.4

Параметр	1-е препятствие	2-е препятствие	3-е препятствие	Полузатеняющее препятствие
$L_D(\nu)$	9,1	12,03	8,96	2,26
$n$	1,432	3,428	-	-
$m$	0,097	0,077	-	-
$b$	0,965	0,998	-	-
$T(m, n)$	2,68	3,79	-	-
$L_u$	11,78	15,82	-	-
$C_N$		0,626		

Суммарные дифракционные потери на интервале при заданных условиях рефракции, дБ:

$$L_{\text{Дифр}} \Sigma = (11,78 + 15,82 + 8,96) + 0 + 2,26 - 20 \lg 0,626 = 42,89.$$

#### Пример 2

Рассчитаем дифракционные потери на интервале, рассмотренном в примере 1, но при  $g = 21,6 \cdot 10^{-8}$  1/м (см. цветную вставку, рис. P4.5).

1.2.1. Как и в примере 1 линия гипотетического пути распространения сигнала имеет два излома и оглабает одно из препятствий рельефа местности. На интервале при заданных условиях рефракции имеются три затеняющих препятствия и, соответственно, четыре подынтервала.

1.2.2. Полузатеняющее препятствие имеется только на третьем подынтервале.

2.2.1. Затеняющие препятствия аппроксимируются цилиндрами. Значения необходимых для дальнейших расчетов геометрических характеристик приведены в табл. P4.5 для каждого затеняющего препятствия.

Таблица P4.5

Параметр	1-е препятствие	2-е препятствие	3-е препятствие	Источник
$R_\nu$	11000	16350	23000	Из профиля
$d_1$	11000	5350	6000	Из профиля
$d_2$	5000	6650	7000	Из профиля
$h$	1,04	3,62	1,18	Из профиля
$\nu$	0,151	0,57	0,178	(7.6)
$d_{\text{пол}}(d_u)$	2000	2500	0	$R_q - R_p$ (из профиля)
$t$	0,013	0,065	-	(7.2)
$a_u$	13930	27680	0	(7.3) или (7.4)

2.2.2. Полузатеняющее препятствие на подынтервале между вторым и третьим затеняющими препятствиями аппроксимируется полуплоскостью. Значения геометрических характеристик приведены в табл. P4.6.

Таблица P4.6

Параметр	Полузатеняющее препятствие	Источник
$R_\nu$	20000	Из профиля
$d_1$	3000	Из профиля
$d_2$	3000	Из профиля
$h$	-2,308	Из профиля
$\nu$	-0,51	(7.6)

3.2. Значения параметров, входящих в (7.14), приведены в табл. P4.7.

Суммарные дифракционные потери на трассе при заданных условиях рефракции, дБ:

$$L_{\text{Дифр}} \Sigma = (8,22 + 13,8 + 7,58) + 0 + 1,88 - 20 \lg 0,628 = 35,51.$$

Таблица P4.7

Параметр	1-е препятствие	2-е препятствие	3-е препятствие	Полузатеняющее препятствие
$L_D(\nu)$	7,35	10,85	7,58	1,88
$n$	1,02	2,836	-	-
$m$	0,035	0,069	-	-
$b$	0,937	0,995	-	-
$T(m, n)$	0,87	2,95	-	-
$L_u$	8,22	13,8	-	-
$C_N$		0,628		

#### Пример 3

Рассчитаем дифракционные потери на трассе, рассмотренной в примере 1, но при  $g = 11,4 \cdot 10^{-8}$  1/м (см. цветную вставку, рис. P4.6).

1.2.1. Линия гипотетического пути распространения сигнала имеет один излом и оглабает одно препятствие рельефа местности. На трассе при заданных условиях рефракции имеются два затеняющих препятствия и, соответственно, три подынтервала.

1.2.2. Полузатеняющее препятствие имеется на первом и втором подынтервалах.

2.2.1. Затеняющие препятствия аппроксимируются цилиндрами. Значения необходимых для дальнейших расчетов геометрических характеристик приведены в табл. P4.8 для каждого затеняющего препятствия (см. цветную вставку, рис. P4.7, P4.8).

Таблица Р4.8

Параметр	1-е препятствие	2-е препятствие	Источник
$R_1$	16300	23000	Из профиля
$d_1$	16300	6000	Из профиля
$d_2$	6696	7000	Из профиля
$h$	3.88	0.109	Из профиля
$v$	0.482	0.016	(7.6)
$d_{EP}(d_{1,2})$	2500	0	$R_q - R_p$ (из профиля)
$t$	0.065	-	(7.2)
$a_{1,2}$	23860	0	(7.3) или (7.4)

2.2.2. Полузатеняющие препятствия на первом и втором подынтервалах аппроксимируются полуплоскостями. Значения геометрических характеристик приведены в табл. Р4.9.

Таблица Р4.9

Параметр	1-е полузатеняющее препятствие	2-е полузатеняющее препятствие	Источник
$R_0$	11000	20000	Из профиля
$d_1$	11000	3000	Из профиля
$d_2$	5000	3000	Из профиля
$h$	-0.365	-2.537	Из профиля
$v$	-0.053	-0.561	(7.6)

3.2. Значения параметров, входящих в (7.14), приведены в табл. Р4.10.

Таблица Р4.10

Параметр	1-е затеняющее препятствие	2-е затеняющее препятствие	1-е полузатеняющее препятствие	2-е полузатеняющее препятствие	Источник
$L_p(y)$	10.15	6.18	5.57	1.51	(7.5)
$n$	3.192	-	-	-	(7.10)
$m$	0.039	-	-	-	(7.10)
$b$	0.997	-	-	-	(7.9)
$T(m, n)$	1.83	-	-	-	(7.8)
$L_n$	11.98	-	-	-	(7.7)
$\Sigma$	0.82				(7.11)

Суммарные дифракционные потери на интервале при заданных условиях рефракции, дБ:

$$L_{\text{дифр}} \Sigma = (11.98 + 6.18) + 5.57 + 1.51 - 20 \lg 0.82 = 26.97.$$

#### Пример 4

Рассчитаем дифракционные потери на интервале при  $g_1 = 30 \cdot 10^{-8}$  1/м, при  $g_2 = 20 \cdot 10^{-8}$  1/м (рис. Р4.9), при  $g_3 = 10 \cdot 10^{-8}$  1/м. Описание профиля приведено в табл. Р4.11.

Пусть высоты подвеса левой и правой антенн относительно поверхности земли в месте установки равны 30 и 23 м, соответственно, и  $f = 10$  ГГц ( $\lambda = 0.3/10 = 0.03$  м).

Таблица Р4.11

Рельеф	Застройка			Лес			Вода
0	8	1000	1300	15	29000	29000	12
3000	0						3000
28999	0						28999
29000	4						0
36000	4						0

По своим характеристикам интервал следует отнести к «сферическому» поэтому дифракционные потери необходимо вычислять согласно части I процедуры расчета.

1. Высоты антенн над сферической поверхностью с радиусом, м:

$$a_{z1} = \frac{6370 \cdot 10^3}{1 + (6370 \cdot 10^3)(30 \cdot 10^{-8})/2} = 3257 \cdot 10^3,$$

$$a_{z2} = \frac{6370 \cdot 10^3}{1 + (6370 \cdot 10^3)(20 \cdot 10^{-8})/2} = 3891 \cdot 10^3,$$

$$a_{z3} = \frac{6370 \cdot 10^3}{1 + (6370 \cdot 10^3)(10 \cdot 10^{-8})/2} = 4831 \cdot 10^3,$$

составляют  $h_1 = 30 + 8 = 38$  и  $h_2 = 23 + 4 = 27$  м.

2. С помощью выражений (5.8) определяется просвет на трассе

при  $g_1 = 30 \cdot 10^{-8}$  1/м

$$b = 2 \sqrt{\frac{1.06 + 1}{3 \cdot 1.06}} \cos \left[ \frac{\pi}{3} + \frac{1}{3} \arccos \left[ \frac{0.17}{2} \sqrt{\frac{3 \cdot 1.06}{(1.06 + 1)^3}} \right] \right] = 0.082.$$

$$m = \frac{30000^2}{4 \cdot 3257 \cdot 10^3 [27 + 38]} = 1.06, \quad c = \frac{38 - 27}{27 + 38} = 0.17,$$

$$R_1 = 30000(1 + 0.082)/2 = 16230, \quad R_2 = 13770,$$

$$H = \frac{[38 - 16230^2 / (2 \cdot 3257 \cdot 10^3)] [13770 + [27 - 13770^2 / (2 \cdot 3257 \cdot 10^3)]] 6230}{30000} = -2.3;$$

при  $g_2$ :  $b = 0.090$ ,  $m = 0.89$ ,  $c = 0.17$ ,  $R_1 = 16350$ ,  $R_2 = 13650$ ,  $H = 3.3$ ;

при  $g_3$ :  $b = 0.099$ ,  $m = 0.72$ ,  $c = 0.17$ ,  $R_1 = 16480$ ,  $R_2 = 13520$ ,  $H = 8.9$ .

Согласно (5.4) рассчитываем радиус минимальной зоны Френеля

$$H_0 = \sqrt{\frac{1 \cdot 0,03 \cdot 16230 (30000 - 16230)}{30000}} = 8,6.$$

Поскольку выполняется неравенство  $H(g_3) > H_0$ , то  $L_{\text{Дифрз}} = 0$ .

3. Согласно (7.18) определяются нормированная длина интервала и нормированные высоты:

$$X_1 = \left( \frac{3,14}{0,03 \cdot a_{31}} \right)^{1/3} \cdot 30000 = 6,43; \quad X_2 = 5,71;$$

$$Y_1 = 2 \left( \frac{3,14^2}{0,03 a_{31}} \right)^{1/3} \cdot 38 = 11,39; \quad Y_2 = 10,73; \quad Y_2 = 2 \left( \frac{3,14^2}{0,03 a_{31}} \right)^{1/3} \cdot 27 = 8,09; \quad Y_2 = 7,63.$$

4. Поскольку все значения  $Y_1, Y_2 > 2$ , расчет коэффициента проводимости земной поверхности  $K$  не требуется (см. 7.20).

5. С помощью (7.19) рассчитывается множитель расстояний:

$$F_1(X_1) = 11 + 10 \lg 6,43 - 17,6 \cdot 6,43 \approx -94,13; \quad F_2(X_2) = -82.$$

6. С помощью (7.20) рассчитываются высотные множители:

$$G(Y_1) = 17,6 \cdot (11,39 - 1,1)^{1/2} - 5 \lg(11,39 - 1,1) - 8 \approx 43,39; \quad G(Y_2) = 41,7;$$

$$G(Y_2) = 34,31; \quad G(Y_2) = 32,89.$$

7. Согласно (7.17), дБ:

$$L_{\text{Дифр 1}} = -[-94,13 + 43,39 + 34,31] = 16,43;$$

$$L_{\text{Дифр 2}} = [-82 + 41,7 + 33,89] (3,3/8,6 - 1) = 4,56.$$

**ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СИМВОЛОВ, ТЕРМИНОВ**

- АЛ - абонентская линия
- ВЗПС - внутрисетьевая первичная сеть
- ВСЗ - взаимовызовная сеть связи
- ГЭС - гипотетическое эталонное соединение
- ГЭТ - гипотетический эталонный тракт
- ДН - диаграмма направленности (антенны)
- ДС - дуплексный ствол
- ЗИП - запасные части и принадлежность
- МНК - метод наименьших квадратов
- МПС - местная первичная сеть
- МСЭ - Международный союз электросвязи
- ПРД - передатчик
- ОЦК - основной цифровой канал
- ПРМ - приемник
- ПЦИ - племзносронная цифровая иерархия
- СВЧ - сверхвысокая частота
- СКО - среднеквадратическое отклонение
- СС - симлексный ствол
- СМП - магистральная первичная сеть
- СЦИ - синхронная цифровая иерархия
- ЦПРД - цифровая радиорелейная линия
- ЦПРС - цифровая радиорелейная станция
- PSK (Phase Shift Keying) - фазовая манипуляция
- MTBF (Mean Time Between Failures) - среднее время между отказами
- MTTR (Mean Time To Restore) - среднее время восстановления обслуживания
- QAM (Quadrature Amplitude Modulation) - квадратурно-амплитудная модуляция
- SESR (Severely Eroded Second Ratio) - показатель секунд со значительным количеством ошибок
- TCM (Trellis Coded Modulation) - решетчатно-кодовая модуляция
- $\min(x, y)$  - функция, значение которой равно минимальному из двух значений  $x$  и  $y$
- $\max(x, y)$  - функция, значение которой равно максимальному из двух значений  $x$  и  $y$
- $\text{erf}(x)$  - функция ошибок от аргумента  $x$
- $\text{trunc}(x)$  - округление  $x$  до ближайшего меньшего целого
- 0 - обозначение пустого (не содержащего элементов) множества

Термин и его краткая форма	Определение
Радиорелейная линия связи Радиорелейная линия	Совокупность технических средств и среды распространения радиосигнала для обеспечения радиорелейной связи <i>Примечание.</i> В частности, радиорелейная линия может быть образована из двух соседних радиорелейных станций
Радиорелейная линия прямой видимости РРД	Радиорелейная линия связи, соседние станции которой размещаются на расстоянии, обеспечивающем радиосвязь прямой видимости
Радиорелейная станция РРС	Радиостанция, используемая для радиорелейной связи
Стационарная радиорелейная линия связи Стационарная РРД	Радиорелейная линия связи, в которой все радиорелейные станции являются стационарными радиостанциями

Оконечная радиорелейная станция ОРС	Радиорелейная станция, устанавливаемая на конечных пунктах радиорелейной линии связи и предназначенная для введения и выделения передаваемых по линии сообщений
Узловая радиорелейная станция УРС	Радиорелейная станция, предназначенная для ретрансляции радиосигнала, передаваемого по радиорелейной линии связи, разветвления радиорелейной линии связи и выделения передаваемого по линии сообщения и введения нового
Промежуточная радиорелейная станция ПРС	Радиорелейная станция, предназначенная для ретрансляции радиосигнала, передаваемого по радиорелейной линии связи
Радиорелейный пролет(интервал)	Часть радиорелейной линии связи между соседними радиорелейными станциями, близкая аналогу и среды распространения радиосигнала
Профиль радиорелейного интервала	Вертикальный разрез местности, плоскость которого перпендикулярна поверхности земли, и проходит через фазовые центры антенн соседних РРС
Радиорелейный участок	Часть радиорелейной линии связи, ограниченная двумя ближайшими радиорелейными станциями, которые являются окончательными или узловыми
Разнесенный прием	Метод приема, при котором результирующий сигнал получается из нескольких принимаемых радиосигналов, которые несут одну и ту же информацию, но проходят разными радиотрактами или по разным каналам передачи, отличающимся друг от друга по крайней мере одной из таких характеристик, как частота, поляризация или расположение антенн
Прием с пространственным разнесением	Разнесенный прием, при котором на радиостанции используется несколько антенн, разнесенных в пространстве <i>Примечание.</i> В радиорелейных линиях прямой видимости обычно применяется вертикальное разнесение, при этом на одном интервале образуется несколько трасс распространения радиосигнала
Прием с частотным разнесением	Разнесенный прием, при котором используется несколько радиоканалов с соответствующим разным частот
Многолучечное распространение	Одновременное распространение радиосигнала между точками передачи и приема по нескольким трассам