

ПОМЕХОЗАЩИЩЁННОСТЬ ТРОПОСФЕРНЫХ ЛИНИЙ РАДИОСВЯЗИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В.К. Снежко, канд. техн. наук, доцент

С.А. Якушенко, канд. техн. наук, доцент

В.Е. Егрушев, канд. техн. наук, доцент

С.С. Веркин, канд. техн. наук

В.В. Антонов, преподаватель

Е.В. Чеканова, преподаватель

Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного

(Россия, г. Санкт-Петербург)

DOI:10.24412/2500-1000-2023-9-1-263-269

Аннотация. В статье рассматриваются подход к оценке помехозащищённости тропосферных линий радиосвязи в условия радиоэлектронного воздействия преднамеренных помех. В основу методики и количественных оценок в работе положено взаимодействие тропосферного интервала и интервала радиоэлектронного подавления. Особенностью является учет кривизны земли на линиях прямой видимости с высокоподнятой антенной. Результаты работы могут использоваться при модернизации существующих и создании перспективных помехозащищённых станций тропосферной связи специального назначения.

Ключевые слова: тропосферная линия радиосвязи, помехозащищённость, радиоэлектронное подавление, радиогоризонт, прямая видимость, летно-подъемное средство.

Широкое применение в сетях связи специального назначения (СН) находит многоканальная тропосферная радиосвязь (ТРС) по причине её преимуществ по сравнению с другими родами радиосвязи: обеспечение прямой высокоскоростной передачи данных между пунктами управления на интервалах большой протяжённости порядка 150 – 200 км и более. Опыт локальных конфликтов убеждает, что в настоящее время тропосферные радиолнии (ТРЛ) будут функционировать в условиях активного радиоэлектронного подавления (РЭП) [1, 2]. Поэтому обеспечение ТРС в условиях сложной электромагнитной обстановки требует количественной оценки помехозащищённости (ПМЗ) ТРЛ (станций) для принятия эффективных мер защиты от преднамеренного радиоэлектронного воздействия. Для этого в работе предложена методика оценки помехозащищённости ТРЛ и результаты расчетов. В основу методики и количественных оценок положено взаимодействие тропосферного интервала и интервала РЭП.

1. Методика расчёта помехозащищённости тропосферных станций

Анализ современных средств РЭП зарубежных стран показал, что в настоящее время имеется достаточно средств, размещенных на лётно-подъёмных средствах (ЛПС) для РЭП тропосферных станций СН. На рисунке 1 представлен вариант воздействия средств РЭП на ТРЛ: станции №1 по заднему лепестку (ЗЛ), станции №2 по главному лепестку (ГЛ) диаграммы направленности (ДН) антенн. Рисунок подтверждает необходимость рассмотрения двух интервалов: интервала связи и интервала РЭП. Расчёты тропосферного интервала описаны во многих работах, например, в [3]. Здесь он не рассматривается. Поэтому далее будем рассматривать только интервал РЭП.

Оценка открытости интервала радиолнии ЛПС РП – ТРС

Радиоэлектронное подавление ТРЛ осуществляется, как правило, с летно-подъёмных средств (ЛПС). При этом интервалы «ТРС – ЛПС» принимают открытыми на предельной дальности $R_{\text{пред}}$, км, определяемой выражением [3]

$$R_{\text{пред}} = 4,12 \left(\sqrt{H_{\text{лпс}}} + \sqrt{H_{\text{ст}}} \right)$$

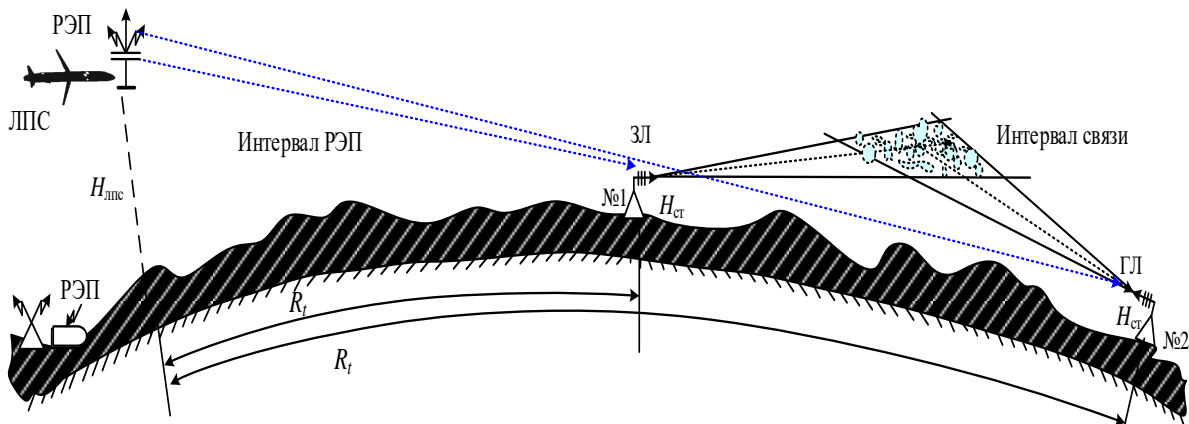


Рис. 1. Вариант искусственного радиоэлектронного подавления радиолинии тропосферной связи

Здесь $H_{\text{лпс}}$ и $H_{\text{ст}}$ соответственно высоты подъема антенн ЛПС и тропосферной станции в метрах. Это далеко от реальности, поэтому возникает необходимость более внимательнее рассмотреть эти интервалы.

Анализ проведем для условия гладкой сферы без леса. Условие открытости интервала $\Delta H(R_{\tau 1}) \geq 0$ учитывает кривизну земли, существенную зону и открытость зоны, существенной для распространения радиоволн и имеет вид [1]:

$$\Delta H(R_{\tau 1}) = \left[H_{\text{ст}} + (H_{\text{лпс}} - H_{\text{ст}}) \tau_1(R_{\tau 1}) - R_{\text{лпс}}^2 \tau_1(R_{\tau 1}) \left[\frac{(1 - \tau_1(R_{\tau 1}))}{17} \right] \right] - \sqrt{1/3} R_{\text{лпс}} 1000 \tau_1(R_{\tau 1}) (1 - \tau_1(R_{\tau 1})) \sqrt{\lambda} - H_{\text{лес}} \geq 0, \quad (1)$$

где $\tau_1(R_{\tau 1})$ – относительное расстояние рассматриваемой точки интервала; λ – длина волны, м; $H_{\text{лес}}$ – высота леса, м.

Данное выражение является разностью высот между линией, соединяющей антенны и суммой кривизны земли и зоны, для распространения радиоволн. Были рассчитаны относительные по отношению к предельной дальности и абсолютные протяженности открытого интервала в зависимости от высоты полета ЛПС. Результаты расчетов приведены на рисунках 2 и 3 соответственно.

Из результатов расчетов можно заключить следующее. Протяженности открытого интервала, как и предельные дальности, существенно зависят от высоты полета ЛПС. При высотах полета 5-10 км протяженности открытого интервала равны 280-400 км. С высот полета 0,1-1 км помехи могут создаваться с дальностями 30-120 км. Однако, с точки зрения живучести ЛПС можно принять, что РЭП будет осуществляться с дальностями за пределами прямой видимости (более 400 км), т.е. на полуоткрытых и даже закрытых интервалах. Проведем количественную оценку возможности подавления ТРЛ с ЛПС.

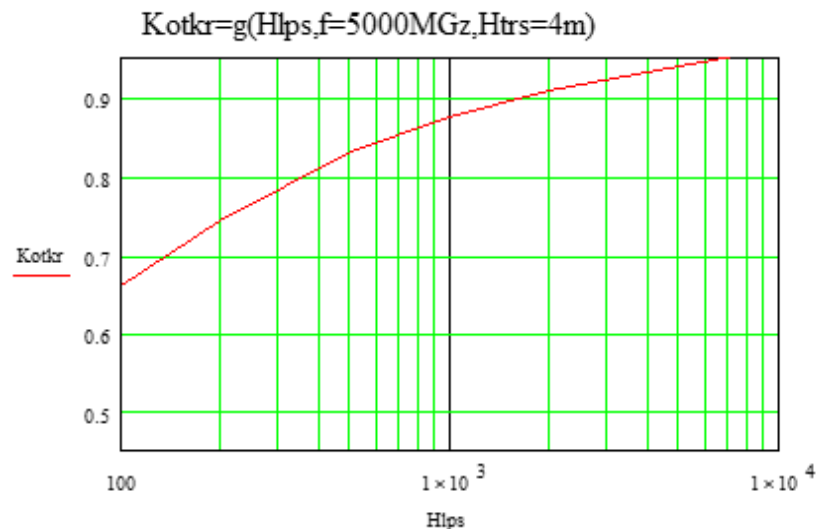


Рис. 2. Зависимость относительной протяжённости открытого интервала от высоты полёта ЛПС $H_{лпс}$ на частоте $f = 5$ ГГц при высоте подъема антенны станции $H_{ст} = 4$ м

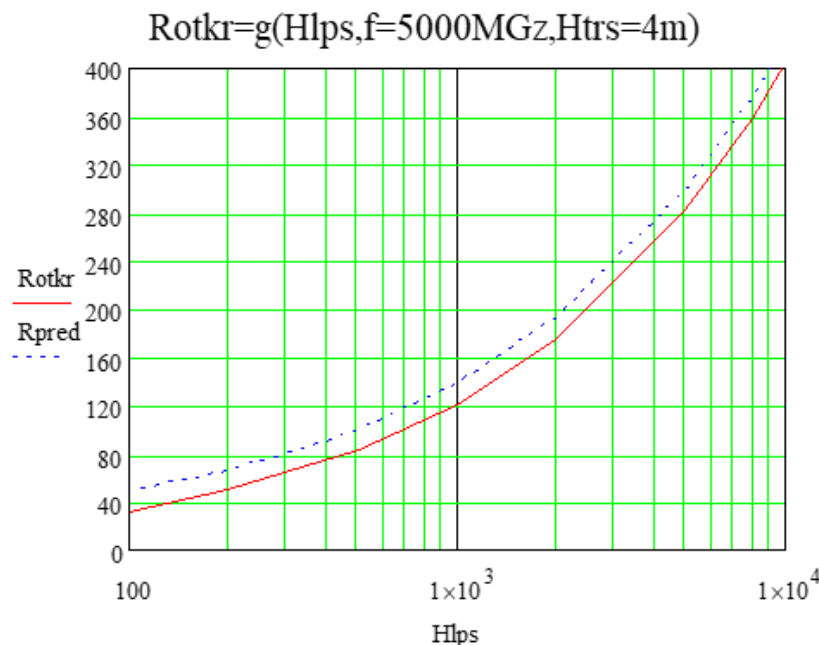


Рис. 3. Зависимость абсолютной протяжённости открытого интервала и предельной дальности от $H_{лпс}$ на частоте $f = 5$ ГГц при высоте антенны станции $H_{ст} = 4$ м

Надёжность связи на интервале ТРЛ в условиях радиоподавления

Рассмотрим средство РЭП, действующее против ТРЛ с ЛПС и создающее только шумовую помеху со спектром Δf_p , согласованную по ширине спектра с сигналом Δf_c , т. е. $\Delta f_p \approx \Delta f_c$. Помехозащищенность ТРЛ характеризуется ее способностью обеспечить требуемое качество связи в условиях воздействия преднамеренных помех [1, 3]. За показатель ПМЗ принимаем вероятности обеспечения связи с заданным качеством в условиях помех $p_{сн}$ на

заданной дальности от источника помех. Вероятность $p_{сн}$ есть вероятность того, что отношение мощности сигнала $P_{с.вх}$ к мощности помехи $P_{п}$ на входе подавляемого приёмника станции будет больше коэффициента помехозащиты $K_{пз}$. Коэффициент помехозащиты есть минимальное отношение сигнала $P_{с.вх}$ к помехе $P_{п}$ на входе приёмника станции для заданного режима работы, при котором обеспечивается требуемое качество связи [1]. Из определения $K_{пз}$ следует, что $K_{пз} = (P_{с.вх}/P_{п})_{\min}$.

Величина $p_{сн}$ определяется из уравнения

$$p_{\text{сп}} = p(P_{\text{с.вх}} - P_{\text{ш}\Sigma} \geq K_{\text{пз}}). \quad (2)$$

Величины $P_{\text{с.вх}}$ и $P_{\text{ш}\Sigma}$ являются случайными и распределены по логарифмически – нормальному закону. Случайность $P_{\text{с.вх}}$ обусловлена замираниями сигнала, глубина которых на интервале ТРЛ описывается дисперсией медленных замираний σ^2 [4]. При протяжённости интервала 100 км значение σ равно 3,8 и 4,2,

а при протяжённости интервала 200 км – 5,2 и 6 дБ для коэффициента усиления антенны 30 и 40 дБ соответственно. Эти результаты будут использованы в расчётах.

Из выражения 2 следует, вероятность успешного ведения ТРС при условии прихода помехи в угловом секторе $\Delta\varphi_i$ будет равна [3, 4].

$$P_{\text{св}|\Delta\varphi_i} = \begin{cases} 0,5 + \Phi_0(x), & \text{если } x \geq 0,5 \\ 0,5 - \Phi_0(x), & \text{если } x < 0,5 \end{cases}. \quad (3)$$

Здесь $\sigma_{\text{ш}\Sigma}^2$ – дисперсия суммарного шума на входе приёмника; $\Phi_0(x)$ – табулированная функция Крампа, $x = (P_{\text{с.вх}} - P_{\text{ш}\Sigma} + K_{\text{пз}}) / \sqrt{\sigma_{\text{ш}\Sigma}^2 + \sigma_{\text{с.вх}}^2}$.

Если считать помеху эквивалентной гауссову шуму, тогда суммарная мощность шума в приемнике, определяемая собственными шумами и внешней помехой, будет равна

$$P_{\text{ш}\Sigma[\text{дБВт}]} = P'_{\text{ш.пр}} + P_{\text{п.вх}} = -204 + n_{\text{ш}} + \Delta f_{\text{ш}} + P_{\text{ш}} + G_{\text{ш}} - W_{\text{ш}\Sigma} + K_{\text{пз}} + G_{\text{А.пр}}(\varphi), \quad (5)$$

где $P_{\text{ш}} -$ излучаемая мощность передатчика помех (ПП); $G_{\text{ш}} -$ коэффициент усиления антенны ПП; $G_{\text{А.пр}}(\varphi) -$ коэффициент усиления антенны тропосферной станции в направление ПП; $n_{\text{ш}} -$ коэффициент шума приёмника, дБ; $\Delta f_{\text{ш}} -$ шумовая полоса пропускания приёмника; $W_{\text{ш}\Sigma} -$ затухание помехи на интервале РЭП.

По результатам расчета построить графики для вероятности нормальной работы и провести анализ полученных результатов и сформулировать выводы и рекомендации по повышению помехозащищенности ТРЛ.

2. Оценка помехозащищённости ТРС СН

Исходные данные для расчёта ПМЗ интервала ТРЛ использовались типовые: мощность передатчика $P_{\text{пд}}=300$ Вт (24,8 дБВт), затухание фидера на переда-

ющей и приемной стороне $W_{\text{ф.пд}} = W_{\text{ф.пм}} = 2$ дБ, коэффициент усиления антенны $G_{\text{пд}} = G_{\text{пм}} = 38$ дБ, реальная чувствительность приёмника -145 дБВт, эксплуатационный запас $\Delta P_3 = 0$ дБ, высота полёта ЛПС до 10 км, высота антенны станции 4 м, параметры канала – типовые.

Основные результаты расчётов представлены на рисунках 4-7. Из рисунка 4 видно, что требуемая надёжность связи 0,95 в условиях открытого интервала подавления обеспечивается на частоте 5 ГГц при дальности до источника помех более 1000 км при коэффициенте помехозащиты 40 дБ и не более 300, 500, 900 км при коэффициенте помехозащиты 55, 50, 45 дБ соответственно. Рассматривалось РЭП по главному лепестку (ГЛ) при эффективной мощности передатчика помех $P_{\text{эф.пм}} = P_{\text{ш}} + G_{\text{А.пм}} = 35$ дБ Вт.

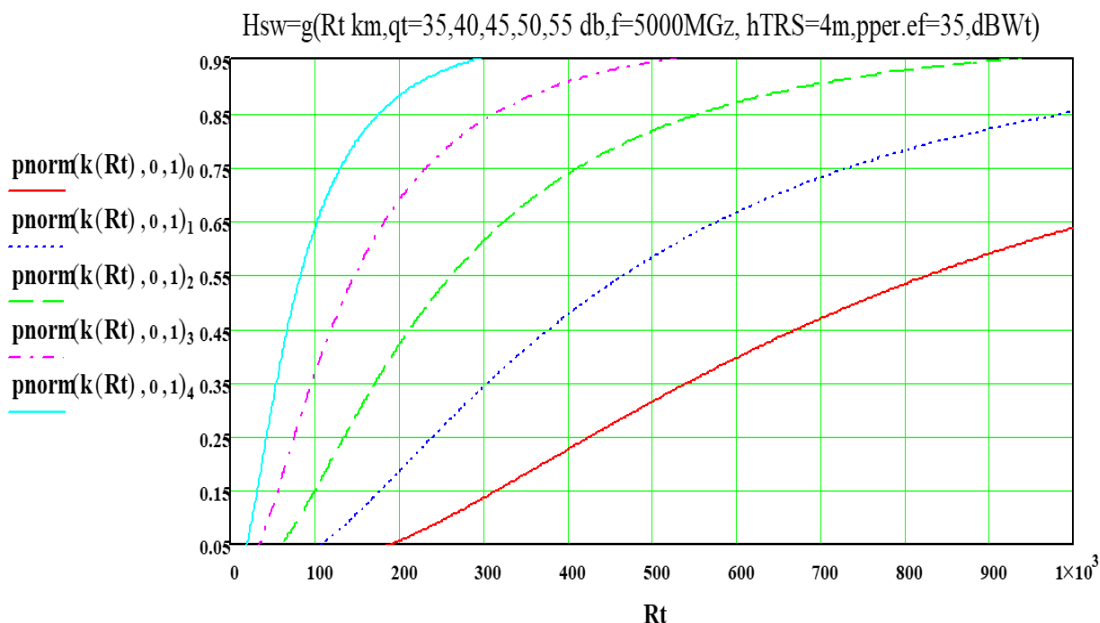


Рис. 4. Надёжность связи на интервале ТРЛ в зависимости от дальности РЭП (R_t , км) и коэффициента помехозащиты (q_t , дБ) при $P_{эф.пп} = 35$ дБ, $f = 5$ ГГц, $H_{ст} = 4$ м, $W_{pp} = 0$ дБ, дальность связи 150 км

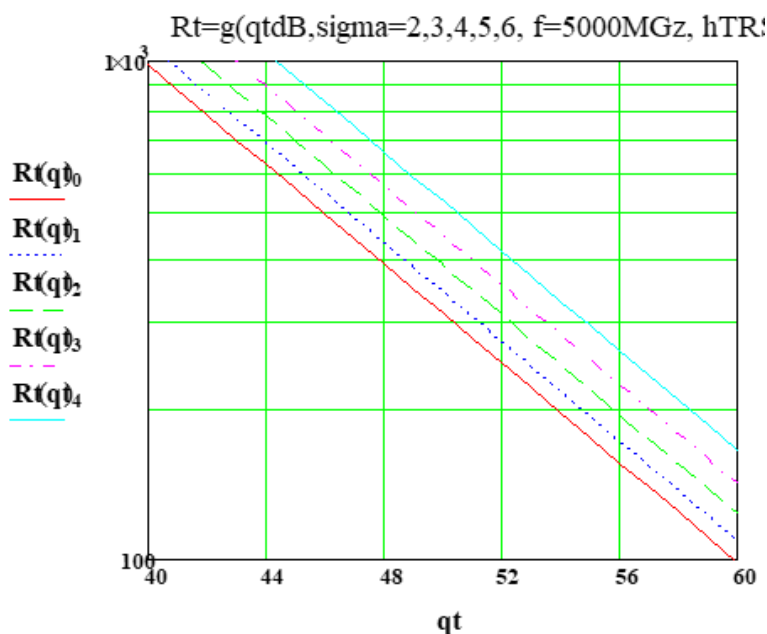


Рис. 5. Зависимость дальности РЭП (R_t , км) от коэффициента помехозащиты (q_t , дБ) и сигмы сигнала (σ_s , дБ) при $f = 5$ ГГц, $H_{ст} = 4$ м, $W_{pp} = 0$ дБ

На рисунке 5 представлены графики зависимости дальности подавления, (R_t , км) от коэффициента помехозащиты (q_t , дБ) и сигмы сигнала 2, 3, 4, 5, 6 дБ. Дальность подавления не более 200 км обеспечивается при коэффициенте помехозащиты не менее 54-57 дБ при всех сигмах. Сигма сигнала не существенно влияет на дальность РЭП. На рисунке 6 представлен график зависимости дальности РЭП (R_t , км)

от коэффициента помехозащиты (q_t , дБ) и протяженности интервала ТРЛ. Дальность подавления не менее 1000 км обеспечивается при коэффициенте помехозащиты не менее 37 дБ при всех рассмотренных протяженностях интервалов ТРЛ. На рисунке 7 представлен график зависимости дальности РЭП (R_t , км) от коэффициента помехозащиты (q_t , дБ) и эффективной мощности передатчика помех ($P_{эф.пп}=P_{пп}+G_{Апп}$,

дБВт). Дальность подавления не менее 100 км обеспечивается при коэффициенте

помехозащиты 5-55 дБ для всех рассмотренных $P_{\text{эф.пп}}$.

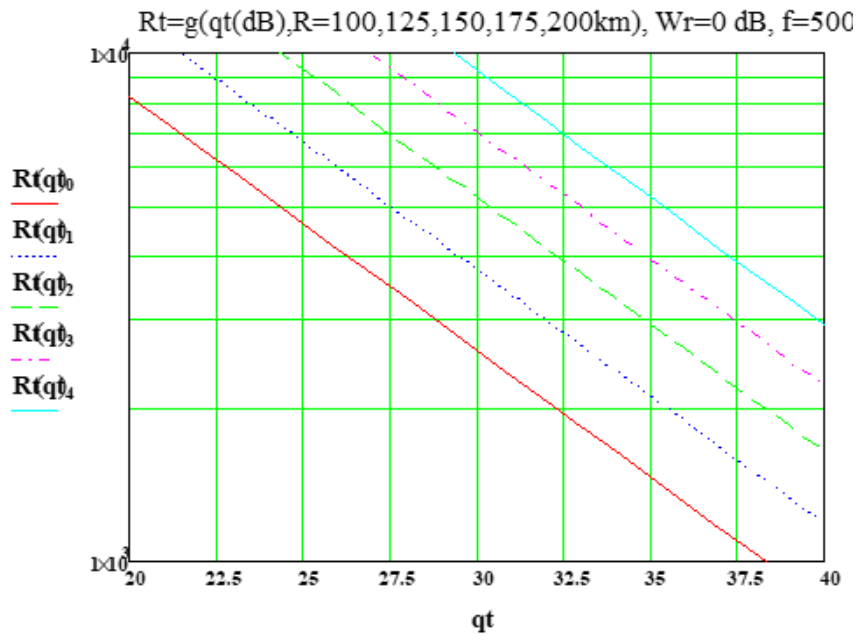


Рис. 6. Зависимость дальности РЭП (R_t , км) от коэффициента помехозащиты (q_i , дБ) и протяжённости интервала при $f = 5$ ГГц, $h_{\text{ст}} = 4$ м, $W_{\text{рп}} = 0$ дБ

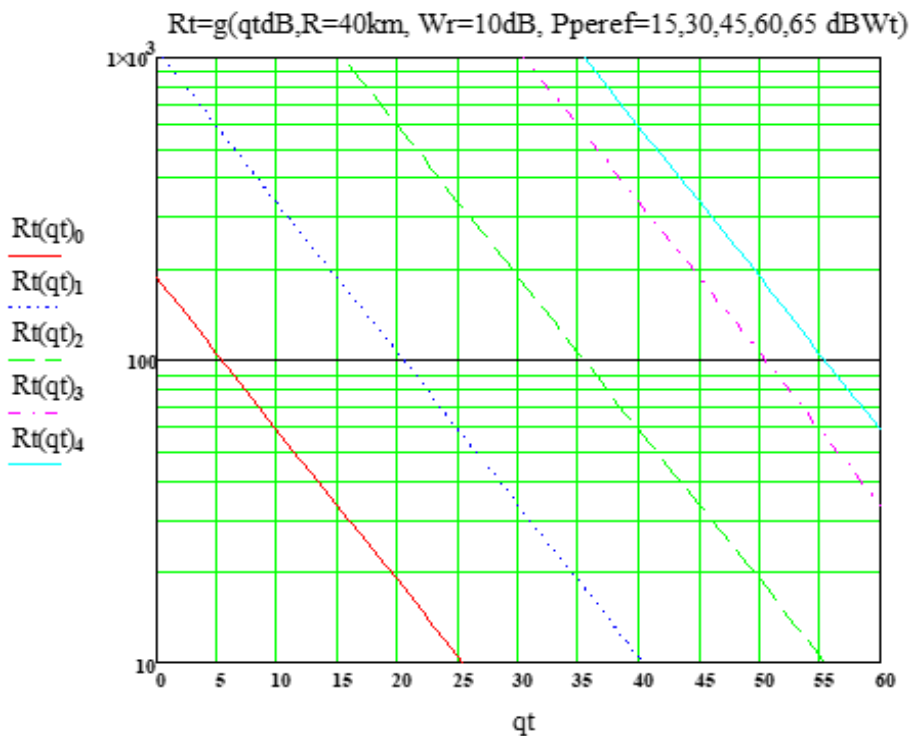


Рис. 7. Зависимость дальности РЭП (R_t , км) от суммарного коэффициента помехозащиты (q_i , дБ) и эффективной мощности ПП ($P_{\text{эф.пп}} = P_{\text{пп}} + G_{\text{Апп}}$, дБ) при $f = 5$ ГГц, $h_{\text{ст}} = 4$ м, $W_{\text{рп}} = 0$ дБ

Полученные результаты справедливы для открытых интервалов РЭП.

Основными способами защиты ТРЛ от РЭП могут быть: ослабление мощности преднамеренных помех на входе приемни-

ка за счет использования защитных свойств местности и направленных свойств антенн, пространственной и поляриационной селекции, а также компенсации помех; повышение энергетического

потенциала радиолинии, за счет повышения мощности передатчика, снижения скорости передачи данных и т.п.

Заключение

В данной работе основное внимание уделялось количественным оценкам. В результате рассмотрения были получены следующие результаты: выполнена оценка открытости интервала РЭП при размещении передатчиков помех на ЛПС, барражирующих на высоте до 10 км; показано, что для данных высот протяжённость открытого интервала приближается к предельной дальности; предложена и описана простая методика оценки ПМЗ станций ТРС; оценена дальность подавления ТРС,

где показано, что в условиях открытого интервала при отсутствии мер защиты, станция ТРС подавляется по главному лепестку на сотни километров; при эффективной мощности ПП 65 дБВт нормальная работа ТРЛ достигается при коэффициенте помехозащиты в десятки дБ.

Полученные количественные результаты могут быть использованы при разработке технических заданий на новую технику, при модернизации и доработке существующей техники, а также при оценке принимаемых технических решений по защите от помех и при планировании развёртывания тропосферных линий в сложной сигнально-помеховой обстановке [5].

Библиографический список

1. Радиорелейные и спутниковые системы передачи специального назначения: учебник / Якушенко С.А., Сазонов М.А., Бибарсов М.Р. Под ред. Якушенко С.А. – СПб.: ВАС, 2016. – 486 с.
2. Михайлов. Р.Л. Радиоэлектронная борьба в Вооружённых силах США: военно-теоретический труд. – СПб.: Научно-технические технологии, 2018. – 131 с.
3. Методика расчёта тропосферных и тропосферных линий при планировании их развёртывания. Учеб. пособие / Е.А. Волков, В.В. Куликов. – Ленинград.
4. Вентцель Е.С. Исследование операций. – М.: Советское радио. 1972. – 552 с.
5. Методология создания перспективных средств многоканальной радиосвязи на новых технических принципах / Якушенко С.А., Сазонов М.А. // Успехи современной радиоэлектроники. – 2016. – № 11. – С. 18-24.

NOISE IMMUNITY OF TROPOSPHERIC RADIO COMMUNICATION LINES FOR SPECIAL PURPOSES

V.C. Snezhko, *Candidate of Technical Sciences, Associate Professor*

S.A. Yakushenko, *Candidate of Technical Sciences, Associate Professor*

V.E. Egrushev, *Candidate of Technical Sciences, Associate Professor*

S.S. Verkin, *Candidate of Technical Sciences*

V.V. Antonov, *Lecturer*

E.V. Chekanova, *Lecturer*

Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union

S.M. Budyonny

(Russia, St. Petersburg)

Abstract. *The article discusses an approach to assessing the noise immunity of tropospheric radio communication lines in the conditions of radio-electronic exposure to intentional interference. The methodology and quantitative estimates in the work are based on the interaction of the tropospheric interval and the interval of electronic suppression. A special feature is taking into account the curvature of the earth on line-of-sight lines with a high-altitude antenna. The results of the work can be used in the modernization of existing and the creation of promising noise-proof special-purpose tropospheric communication stations.*

Keywords: *tropospheric radio communication line, noise immunity, electronic suppression, radio horizon, direct visibility, flight lifting equipment.*