

## **Метод оценки влияния промышленных радиопомех от воздушных линий электропередач и высоковольтного оборудования на высокочувствительные радиолокационные станции**

**Боев С.Ф.\*, Пилков А.В.\*\*, Купцов Н.М.\*\*\*, Радомский А.Н.\*\*\*\***

*Радиотехнический институт имени академика А. Л. Минца,*

*ул. 8 Марта, д.10, стр. 1, Москва, 127083, Россия*

*\*e-mail: kantselariya@oaorti.ru*

*\*\*e-mail: apilkov@rti-mints.ru*

*\*\*\*e-mail: nkupcov@rti-mints.ru*

*\*\*\*\*e-mail: aradomskiy@rti-mints.ru*

### **Аннотация**

В данной статье предложен метод оценки влияния промышленных радиопомех от воздушных линий электропередач (ВЛЭП) и высоковольтного оборудования на высокочувствительные радиолокационные станции (РЛС), который состоит из двух методик: экспериментальной методики измерений промышленных радиопомех от ВЛЭП и высоковольтного оборудования и расчетной методики оценки влияния промышленных радиопомех от ВЛЭП и высоковольтного оборудования на высокочувствительные РЛС, а также составления зоны помехового воздействия при различных положениях трассы прохождения ВЛЭП относительно точки размещения РЛС.

**Ключевые слова:** электромагнитная совместимость, высокочувствительные РЛС, воздушные линии электропередач, высоковольтное оборудование, промышленная радиопомеха, широкополосная помеха.

## **Введение**

Под электромагнитной совместимостью (ЭМС) понимается способность радиоэлектронных средств (РЭС) функционировать в реальных условиях эксплуатации с требуемым качеством при воздействии на них непреднамеренных радиопомех и не создавать недопустимых радиопомех другим радиоэлектронным средствам [1].

Для выполнения задач по предназначению РЛС должны устойчиво функционировать в условиях заданной электромагнитной обстановки (ЭМО), т.е. в совокупности электромагнитных полей в определенной области пространства, полосе частот и интервале времени.

Решение проблемы обеспечения ЭМС требует своевременного решения комплекса задач внутрисистемной и межсистемной ЭМС[2,3].

В целях обеспечения беспомехового функционирования разрабатываемой РЛС необходимо на этапе рекогносцировочных работ определить оптимальное местоположение, с точки зрения минимального помехового воздействия. Для решения данной задачи необходимо знать технические характеристики РЛС, отвечающие за помехоустойчивость, данные по электромагнитной обстановке в предполагаемом районе дислокации РЛС, провести работы по выявлению потенциальных источников непреднамеренных радиопомех и организационно-

технические мероприятия, направленные на устранение влияния со стороны группировки.

Воздушные ЛЭП, находясь в рабочих или аварийных режимах, являются источниками электромагнитных помех (ЭМП). Актуальность исследования обусловлена тем, что вследствие коронирования проводов, изоляторов и арматуры линий электропередач возникают широкополосные радиопомехи случайного характера нарушающие устойчивое функционирование РЛС. Причины возникновения радиопомех от ВЛЭП более подробно рассмотрены в руководящих документах по стандартизации [4].

В связи с недостаточной чувствительностью измерительной аппаратуры по сравнению с РПУ РЛС не представляется возможным провести экспериментальный анализ ЭМО с заданным качеством. Данная проблема остро стоит в отношении воздушных линий электропередач, уровень промышленных радиопомех от которых с помощью измерительного оборудования не представляется возможным зафиксировать в точке дислокации РЛС.

В настоящей статье предложен метод оценки влияния промышленных радиопомех от ВЛЭП и электрических подстанций на высокочувствительные РЛС.

### **Экспериментальная методика измерения промышленных радиопомех от ВЛЭП и электрических подстанций**

Измерение уровней промышленных радиопомех от воздушных ЛЭП в диапазоне рабочих частот высокочувствительной РЛС проводится в соответствии с

ГОСТ 22012-82 [5] путем измерения электрической составляющей напряженности поля в контрольных точках напротив опор ВЛЭП на нормированных расстояниях.

В соответствии с ГОСТ Р 51319-99 [6] ширина полосы измерения должна составлять 120 кГц. Для получения достоверных результатов при проведении измерений необходимо использовать измерительный приемник, обладающий мгновенной полосой обзора. Одним из параметров измерительного приемника, влияющим на результат измерений, является используемый тип детектора дисплея (выборки). При измерениях в задачах ЭМС обычно используют максимально пиковый (Max peak), квазипиковый детекторы (Quasi peak) и детектирование среднего значения (AV) [7]. Для задач, рассматриваемых в данной работе наиболее актуальны первые два типа детектора, отличие которых состоит в постоянных времени заряда и разряда. Значение постоянной времени заряда у пикового детектора намного меньше, а значение постоянной разряда намного больше чем у квазипикового. При этом пиковое значение напряжения сигнала всегда равно или больше квазипикового[8].

В целях экономии временных ресурсов применяют пиковый детектор и нормы на квазипиковые значения, однако в случае, если результаты измерений уровня радиопомех превышают нормированные, то их необходимо перепроверить с использованием квазипикового детектора.

Результаты измерений уровня напряжённости электрического поля промышленных радиопомех от линий электропередач в метровом диапазоне длин волн представлены в [9]. Спектрограммы зафиксированных промышленных

радиопомех от воздушных ЛЭП в метровом диапазоне волн при использовании максимально пикового детектора представлены на рисунках 1-3.

Поскольку измерения проводятся многократно при различных погодных условиях, то на соответствие норме оценивают статистическое значение напряженности электрического поля радиопомех  $E_{0,8}$  по соотношению

$$E_{av} + k \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{(E_i - E_{av})^2}{m-1}} \leq E_n(f_{PL}) \quad (1)$$

$$E_{0,8} \leq E_n(f_{PL}) \quad (2)$$

где  $E_{av}$  – среднее арифметическое значение результатов измерений напряженности электрического поля промышленных радиопомех, дБмкВ/м,

$k$  – коэффициент, зависящий от объема выборки измерений [5],

$m$  – число измерений,

$E_i$  –  $i$ -ый результат измерения напряженности электрического поля промышленных радиопомех, дБмкВ/м, на расстоянии  $R_n$ .

Удовлетворение вышеприведенному условию будет означать, что в течение года не менее 80 % значений напряженности поля радиопомех с доверительной вероятностью не менее 0,8 соответствуют нормам [10].

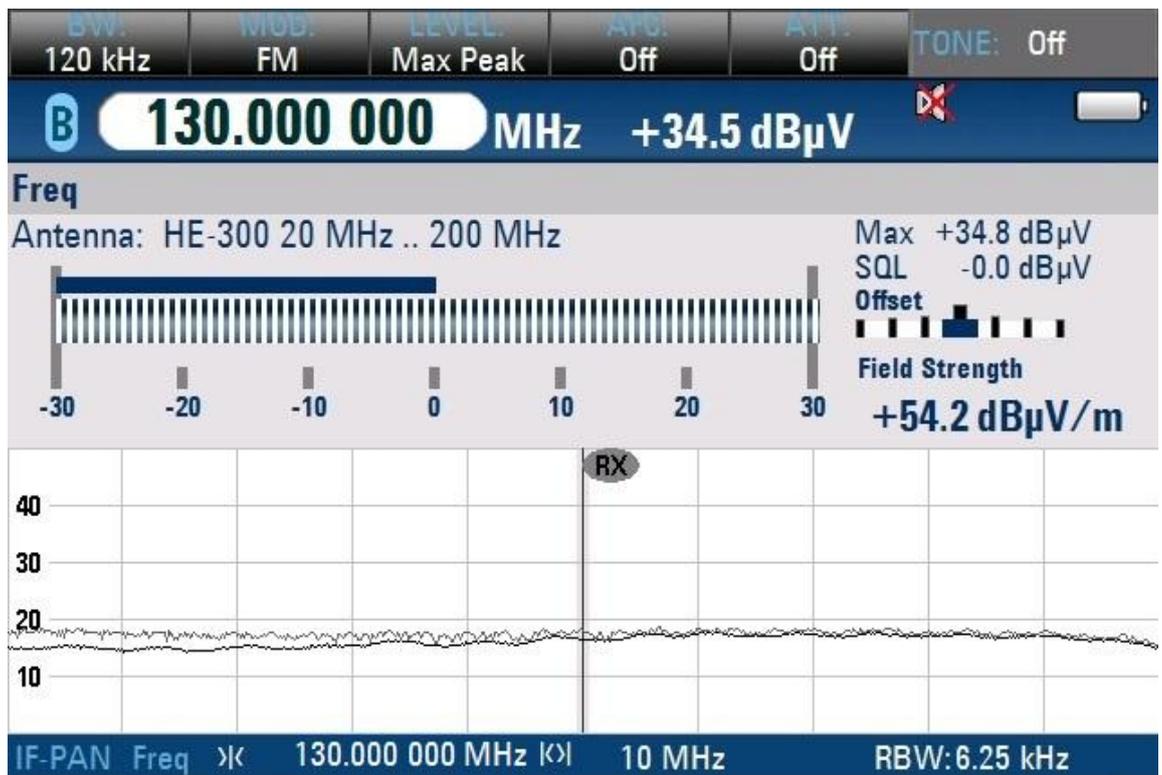


Рисунок 1. Спектрограмма зафиксированных промышленных радиопомех от  
ВЛЭП



Рисунок 2. Спектрограмма зафиксированных промышленных радиопомех от  
ВЛЭП

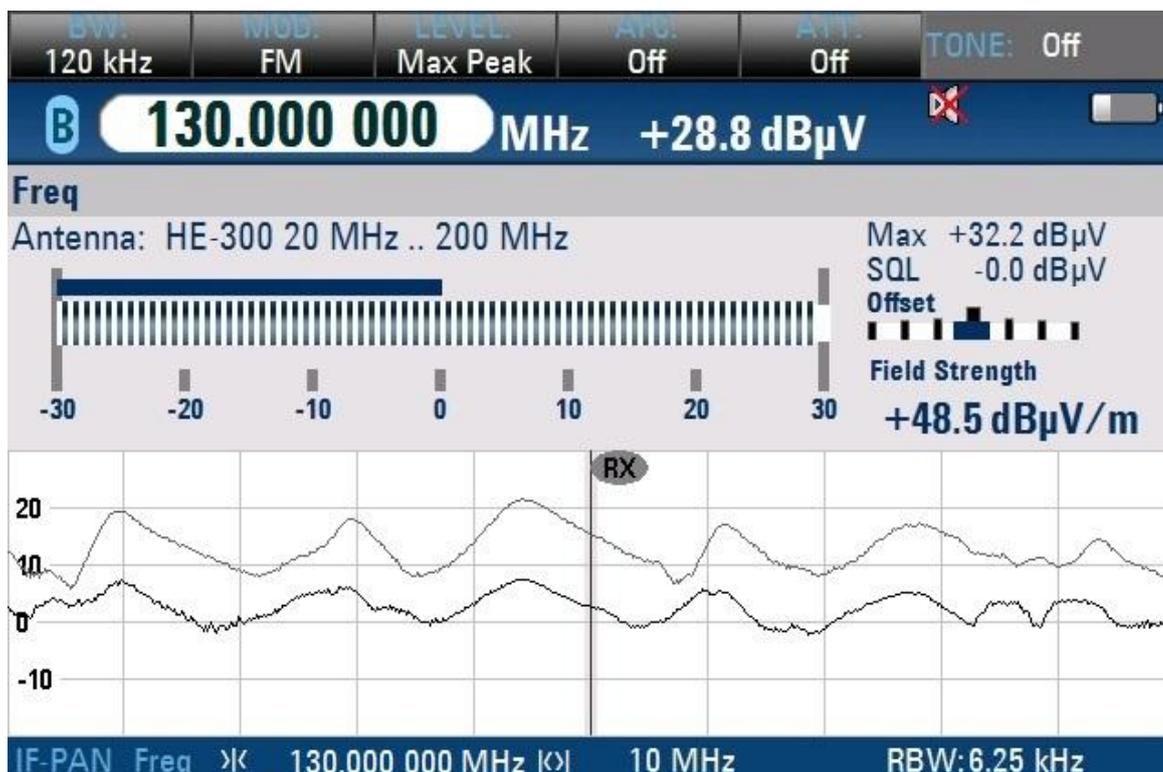


Рисунок 3. Спектрограмма зафиксированных промышленных радиопомех от ВЛЭП

### Расчетная методика оценки влияния промышленных радиопомех от ВЛЭП и высоковольтного оборудования на высокочувствительные РЛС

В данном разделе оценка влияния промышленных радиопомех от ВЛЭП представлена в виде зон помехового воздействия. Под зоной помехового воздействия для рассматриваемой РЛС понимается зона, за пределами которой источник промышленных помех (ЛЭП и высоковольтное оборудование) не создаёт мешающих излучений, превышающих допустимый уровень.

Зона помехового воздействия определяется путём вычисления расстояний от источника промышленных радиопомех до РЛС для всех азимутальных направлений, при которых помеховое воздействие лежит в допустимых пределах.

При определении помехового воздействия необходимо определить ожидаемую мощность помехи на входе радиоприёмного устройства РЛС и сравнить с допустимым уровнем. В качестве допустимого выступает пороговая или реальная чувствительность РЛС  $MDS_{radar}$ , дБВт, в зависимости от требуемого отношения уровня полезного сигнала и шума  $SNR_{required}$ , дБ, на выходе РПУ

$$MDS_{radar} = 10 \lg(kTBW_{signal}) + NF_{cascaded\_total} + SNR_{required}, \quad (3)$$

где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана,

$T$  – шумовая температура приёмного устройства РЛС, К,

$BW_{signal}$  – полоса частот, используемого в РЛС сигнала, Гц,

$NF_{cascaded\_total}$  – коэффициент шума приёмного устройства РЛС, дБ.

Чтобы определить ожидаемую мощность помехи на входе приёмного устройства необходимо оценить уровень промышленных радиопомех, создаваемых ВЛЭП в точке дислокации РЛС.

Вблизи ЛЭП существуют два поля помех - поле основной волны и поле излучения. Поле излучения является результатом неоднородности ЛЭП (наличие набросов на проводах, анкерных опор и конечных значений проводимости земли). Поле основной волны ослабляется пропорционально квадрату расстояния от ЛЭП, а поле излучения - пропорционально этому расстоянию. Около ЛЭП преобладает поле основной волны, а на более значительных расстояниях - поле излучения [4].

Плотность потока энергии (вектор Пойнтинга)  $P_n$  на расстоянии  $R_n$ , м от источника радиоволн мощностью  $P_1$

$$\Pi_n = 10 \lg(P_1) - 10 \lg(4\pi R_n^2) + 10 \lg(F_n^2) \quad (4)$$

где  $F_n$  – множитель ослабления поля радиоволны при распространении в реальных условиях по сравнению с ослаблением, которое наблюдалось бы при распространении в свободном пространстве для расстояния  $R_n$  [11].

В то же время плотность потока энергии на расстоянии  $R_1$ , м от того же источника, т.е. в точке дислокации РЛС определяется

$$\Pi_1 = 10 \lg(P_1) - 10 \lg(4\pi R_1^2) + 10 \lg(F_1^2), \quad (5)$$

где  $F_1$  – множитель ослабления поля радиоволны при распространении в реальных условиях по сравнению с ослаблением, которое наблюдалось бы при распространении в свободном пространстве для расстояния  $R_1$ .

Вычитая (5) из (4), получаем

$$\Pi_n - \Pi_1 = 20 \lg\left(\frac{R_1}{R_n}\right) + 20 \lg(F_n) - 20 \lg(F_1), \quad (7)$$

В соответствии с [11] множитель ослабления равен

$$20 \log(F_1) = L_{fs}(R_1) - L_g(R_1), \quad (8)$$

где  $L_{fs}(R_1)$  – потери при распространении в свободном пространстве для расстояния  $R_1$ , дБ,

$L_0(R_1)$  – потери при распространении в реальных условиях для расстояния  $R_1$ , дБ.

На основе данных, изложенных в [12], для расстояний  $R_n$  величина  $20 \log(F_n) \approx 0$ . Принимая данное допущение и учитывая формулу (8), получаем

$$\Pi_1 = \Pi_n + 20 \log\left(\frac{4\pi R_n}{\lambda}\right) - L_0(R_1) \quad (9)$$

В ряде областей радиоэлектроники, а также в ГОСТ 22012-82 предпочитают пользоваться напряжённостью поля, а не плотностью потока мощности. Эти величины связаны между собой зависимостью

$$\Pi \left[ \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right] = \frac{E [\text{В/м}]^2}{Z [\text{Ом}]} \quad (10)$$

$$\Pi \left[ \frac{\text{дБВт}}{\text{м}^2} \right] = E \left[ \frac{\text{дБмкВ}}{\text{м}} \right] - 146 \text{ дБ}, \quad (11)$$

где  $Z = 377 \text{ Ом}$  – волновое сопротивление, определённое для дальнего поля.

Перепишем выражение (9) и получаем напряжённость поля промышленных радиопомех  $E_1$ , дБмкВ/м, на расстоянии  $R_1$  от источника

$$E_1 = E_n(f_{PL}) + 20 \log \left( \frac{4\pi R_n(f_{PL}, U_{PL})}{\lambda} \right) - L_0(R_1, h_{radar}, h_{PL}) \quad (12)$$

Таким образом, плотность потока мощности помехи от ВЛЭП или высоковольтного оборудования на входе антенны рассматриваемого РЛС  $P_r$ , дБВт, в общем виде по результатам проведенных измерений определяется

$$P_r = E_{0,8} - 146 + 20 \log \left( \frac{4\pi R_n(f_{PL}, U_{PL})}{\lambda} \right) + 10 \log A + G(\varphi) - OCR(\Delta F) - L_0(R_1, h_{radar}, h_{PL}) - \Delta Z, \quad (13)$$

где  $A$  – эффективная площадь приёмной антенны рассматриваемого РЛС,  $\text{м}^2$ ,

$G(\varphi)$  – коэффициент усиления антенны РЛС в направлении источника помех  $\varphi$ , град, дБ,

$OCR(\Delta F)$  – коэффициент ослабления воздействия непреднамеренной помехи за счёт частотного разнеса и несовпадения ширины полосы приёмника и мешающего радиосигнала (off-channel-rejection factor), дБ,

$L_0(R_1, h_{radar}, h_{PL})$  – затухание мешающего сигнала на трассе распространения, дБ,

$d$  – расстояние между РЛС и ВЛЭП, м,

$h_{radar}, h_{PL}$  – высоты подъёма антенн РЛС и ВЛЭП, м,

$\Delta Z$  – дополнительное ослабление сигнала за счёт применения методов уменьшения помех, м.

Точное выражение для коэффициента ослабления воздействия непреднамеренной помехи за счёт частотного разнеса и несовпадения ширины полосы приёмника и мешающего радиосигнала приводится в [13] и имеет следующий вид

$$OCR(\Delta F) = -10 \log \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} P(f) |H(f + \Delta F)|^2 df}{\int_{-\infty}^{+\infty} P(f) df} \quad (14)$$

где  $P(f)$  – спектральная плотность мощности мешающего сигнала, Вт/Гц.

$H(f)$  – эквивалентная амплитудно-частотная характеристика по ПЧ приёмника, на который воздействует помеха.

$\Delta F$  – частотный разнос между приёмником и мешающим передатчиком, Гц.

Величина  $OCR(\Delta F)$  зависит от степени перекрытия между полосой пропускания приёмника и спектром мощности мешающего сигнала. По мере увеличения частотного разнеса степень такого перекрытия уменьшается, что приводит к уменьшению мощности помехи или соответственно к более высоким значениям OCR.

Мощность помехи от ЛЭП или электрической подстанции на входе антенны РЛС должна быть меньше допустимой, т.е. удовлетворять выражению

$$P_r \leq MDS_{radar} \quad (15)$$

Учитывая предыдущие выражения, определяется величина требуемого ослабления сигнала помехи  $L_0(R_1, h_{radar}, h_{PL})$

$$L_0(R_1, h_{radar}, h_{PL}) \geq E_{0,8} - 146 + 20 \log \left( \frac{4\pi R_n(f_{PL}, U_{PL})}{\lambda} \right) + 10 \log A + \\ + G(\varphi) - OCR(\Delta F) - \Delta Z - MDS_{radar} \quad (16)$$

Искомое расстояние помехового воздействия  $R_1$  для рассматриваемого азимута определяется из зависимости ослабления радиосигнала от расстояния между рассматриваемой ВЛЭП и РЛС, высот подъёма ВЛЭП и антенны РЛС над поверхностью земли, а также с учётом особенностей рельефа местности.

Для любой РЛС существует рабочий диапазон азимутов, в пределах которых может работать РЛС. Соответственно для расчёта зоны помехового воздействия для РЛС необходимо рассчитать усиление приёмной антенны в направлении источника промышленных радиопомех для каждого рассматриваемого азимута (с требуемым шагом).

В качестве примера был выбран некоторый участок территории радиусом 55-60 км, в центре которого может быть расположена рассматриваемая РЛС. Пусть рабочий диапазон азимутов составляет 120 градусов в диапазоне от 300 до 60 градусов относительно севера. В направлениях от 270 до 300 градусов и от 60 до 90 градусов коэффициент усиления антенны в среднем на 30 дБ меньше, чем в рабочем диапазоне азимутов. В направлениях от 90 до 270 градусов – на 60 дБ меньше. Для

каждой точки этого участка было рассчитано затухание мешающего сигнала на трассе распространения  $L_0(R_1, h_{radar}, h_{PL})$ . Профиль рельефа местности был определён для каждого азимутального направления из точки размещения РЛС в диапазоне от 0 до 360 градусов с шагом 5 градусов. На рисунке 4 представлена диаграмма, отображающая ослабление сигнала радиопомехи при распространении в зависимости от направления от точки дислокации РЛС с учетом рельефа местности.

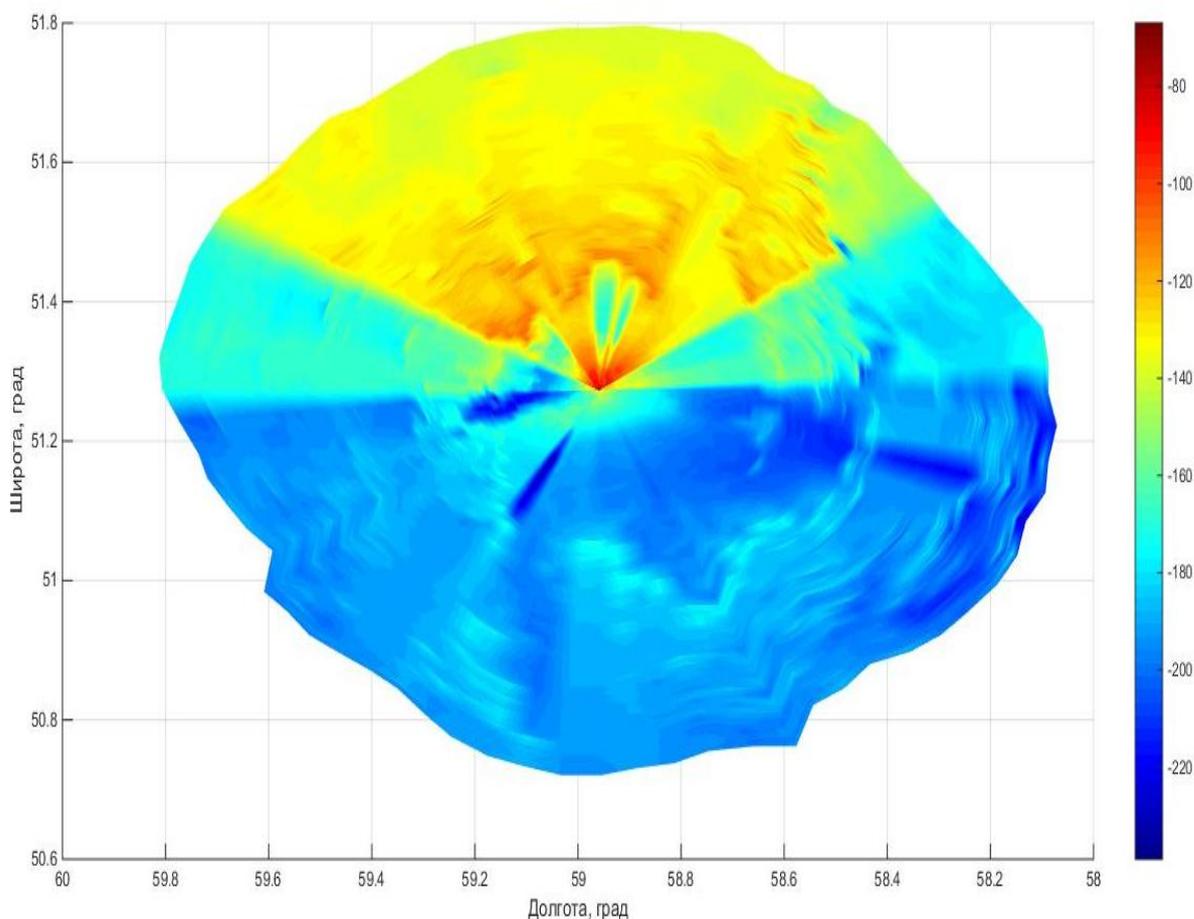


Рисунок 4. Диаграмма, отображающая ослабление сигнала радиопомехи при распространении с учетом рельефа местности

На рисунке 5 представлена зона помехового воздействия при различных положениях трассы прохождения ЛЭП относительно точки дислокации РЛС.

Штриховой линией показана зона помехового воздействия ВЛЭП при условии, что измеренная напряженность электрического поля промышленных радиопомех равна 30 дБмкВ/м, сплошной линией – 40 дБмкВ/м, штрих-пунктирной – 50 дБмкВ/м. Радиусы концентрических окружностей со значениями радиусами 10, 20 и 30 км определяют расстояние от источника промышленных радиопомех до РЛС для всех азимутальных направлений.

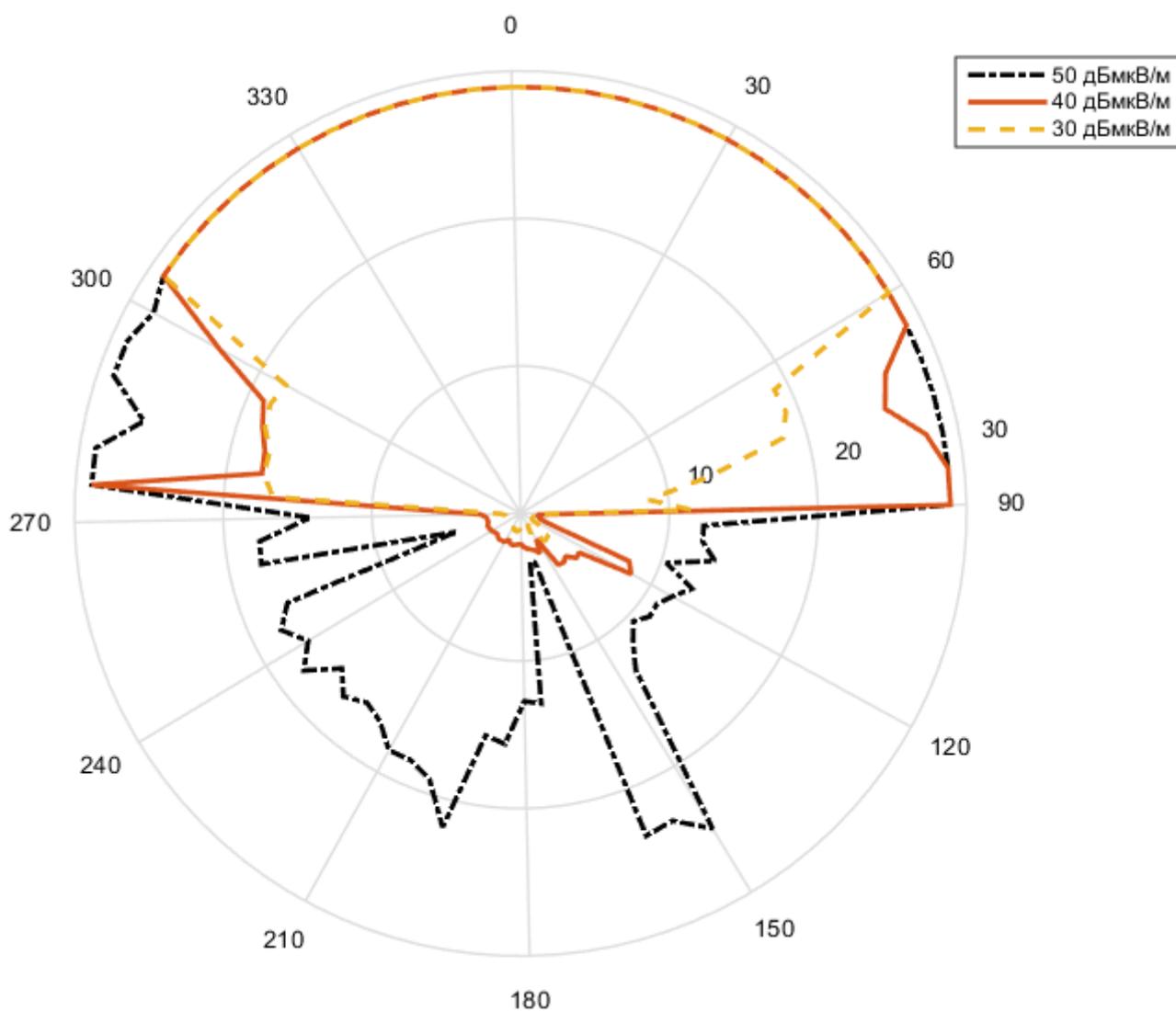


Рисунок 5. Зона помехового воздействия при различных положениях трассы прохождения ЛЭП относительно точки размещения РЛС

## **Выводы**

Предложенный метод оценки влияния промышленных радиопомех от воздушных линий электропередач (ВЛЭП) и высоковольтного оборудования на РЛС состоит из двух методик: экспериментальной методики измерений промышленных радиопомех от ВЛЭП и высоковольтного оборудования и расчетной методики оценки влияния промышленных радиопомех от ВЛЭП и высоковольтного оборудования на высокочувствительные РЛС.

Метод позволяет на этапе рекогносцировочных работ выбрать оптимальную точку дислокации РЛС, в которой уровни промышленных радиопомех от ВЛЭП и высоковольтного оборудования не будут превышать допустимых значений.

Метод позволяет проводить испытания с аппаратурой пониженной чувствительности по сравнению с чувствительностью РПУ РЛС и определить степень влияния промышленных радиопомех от ВЛЭП и высоковольтного оборудования на тактико-технические характеристики РЛС.

## **Библиографический список**

1. Совместимость радиоэлектронных средств электромагнитная. Термины и определения. ГОСТ 23611-79. - М.: Издательство стандартов, 1979. – 16 с.
2. Уайт Д.Р.Ж. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи. Выпуск 2. Внутрисистемные помехи и методы

их уменьшения: Сокр. пер. с англ. под редакцией А.И. Сапгира. - М.: Советское радио, 1978. – 272 с.

3. Уайт Д.Р.Ж. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи. Выпуск 1. Общие вопросы ЭМС. Межсистемные помехи: Сокр. пер. с англ. под редакцией А.И. Сапгира. Послесловие и комментарии А.Д. Князева. - М.: Советское радио, 1977. – 352 с.

4. Методические указания совместимости технических средств электромагнитная. Радиопомехи промышленные от воздушных линий электропередачи и высоковольтного оборудования. РД 50-723-93 (СИСПР 18-1). – М: Изд-во стандартов, 1993 – 70 с.

5. Радиопомехи промышленные от линии электропередачи и электрических подстанций. Нормы и методы измерений. ГОСТ 22012-82. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 8 с.

6. Совместимость технических средств электромагнитная. Приборы для измерения промышленных радиопомех. Технические требования и методы испытаний. ГОСТ Р 51319–99. – М.: Изд-во стандартов, 2000. – 57 с.

7. Раушер К., Йанссен Ф., Минихольд Р. Основы спектрального анализа: Пер. с англ. С.М. Смольского / Под редакцией профессора Ю.А. Гребенко – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 224 с.

8. Agilent Application Note 1303, Spectrum Analyzer Measurements and Noise – 89 с.

9. Пилков А.В., Купцов Н.М., Радомский А.Н. Экспериментальная оценка уровня напряженности электрического поля промышленных радиопомех от линий электропередач в метровом диапазоне длин волн // Технологии ЭМС, № 3 (50), 2014. – 15-20 с.
10. Совместимость технических средств электромагнитная. Радиопомехи промышленные. Методы испытаний технических средств – источников промышленных помех. ГОСТ Р 51320-99.– М.: Издательство стандартов, 2000. – 27 с.
11. Долуханов М.П. Распространение радиоволн: Учебник для вузов. - М.: Изд-во Связь, 1972. – 336 с.
12. Recommendation ITU-R P.1546-5 (09/2013). Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3 000 MHz – 58 с.
13. Recommendation ITU-R SM.337-6. Frequency and distance separations – 12 с.