

МЕТОДИЧЕСКИЙ АППАРАТ ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ РАДИОСВЯЗНЫХ СРЕДСТВ ОБЪЕКТОВ МОРСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Грачев Николай Николаевич

К.т.н., профессор, Московский институт
электроники и математики (МИ-ЭМ НИУ ВШЭ)
nngachev@mail.ru

Лазарев Дмитрий Владимирович

К.т.н., доцент, Московский институт
электроники и математики (МИЭМ НИУ ВШЭ)
qsk@mail.ru
05.12.04

Аннотация. В статье представлены основные положения аналитической методики оценки электромагнитной совместимости радиосвязных средств морских судов по критерию ширины полос блокирования взаимными радиопомехами на основе использования смешанного опытно-теоретического подхода.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, радиосвязные средства морских судов, оценка электромагнитной совместимости, программно-алгоритмическое обеспечение.

ANALYTICAL TECHNIQUE OF AN ESTIMATION OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF RADIO COMMUNICATION MEANS OF SEA VESSEL ON THE BASIS OF THE SKILLED-THEORETICAL APPROACH

Grachev N.N., Lazarev D.V.

Moscow State Institute of Electronics and Mathematics (Technical University)

Abstract. In the report substantive provisions of an analytical technique of an estimation of electromagnetic compatibility of radio communication means of sea vessel by criterion of width of strips of blocking by a mutual radio interferences on the basis of use of the mixed skilled-theoretical approach are presented.

Key words: Electromagnetic compatibility and radio communication facilities vessels, evaluation of electromagnetic compatibility, software and algorithmic support.

На морских судах, укомплектованных с большой плотностью разнообразными радиосвязными средствами (РСС) Глобальной морской системы связи при бедствии и для обеспечения безопасности (ГМССБ), складывается сложная электромагнитная обстановка (ЭМО), которая препятствует их совместному эффективному функционированию. При этом условия эксплуатации радиосвязных средств характеризуются своими особенностями. Одна из них заключается в наличии на судах разветвлённой верхнепалубной архитек-

туры, состоящей из проводящих элементов, искажающих нормированные характеристики эксплуатируемых приёмных и передающих антенн. Решение проблемы электромагнитной совместимости (ЭМС) РСС начинается с этапа проектирования морского судна при разработке или подборе соответствующих средств радиосвязи с необходимыми параметрами и продолжается в течение всего его жизненного цикла.

Спецификой морских судов является наличие большого количества всевозможных РСС,

имеющих большие излучаемые мощности и занимающих различные диапазоны радиочастот, при этом его радиоприемные устройства имеют высокую чувствительность, что налагает жёсткие ограничения на допустимые уровни возможных радиопомех, создаваемых, в том числе, соседствующими РСС. Всё это усложняет обеспечение совместной работы РСС морских судов.

Для примера на рисунке 1 показана зависимость уровня наводимого напряжения при

ненаправленные антенны метровых и дециметровых волн. При этом число таких антенн может достигать более десятка при ограниченных возможностях по их размещению. Поэтому большинство из них не может быть размещено выше верхнепалубных надстроек морских судов и горизонтальное расстояние между антеннами и металлическими элементами верхнепалубной архитектуры часто невелико. По этой причине диаграммы направленности большинства, как приёмных, так и

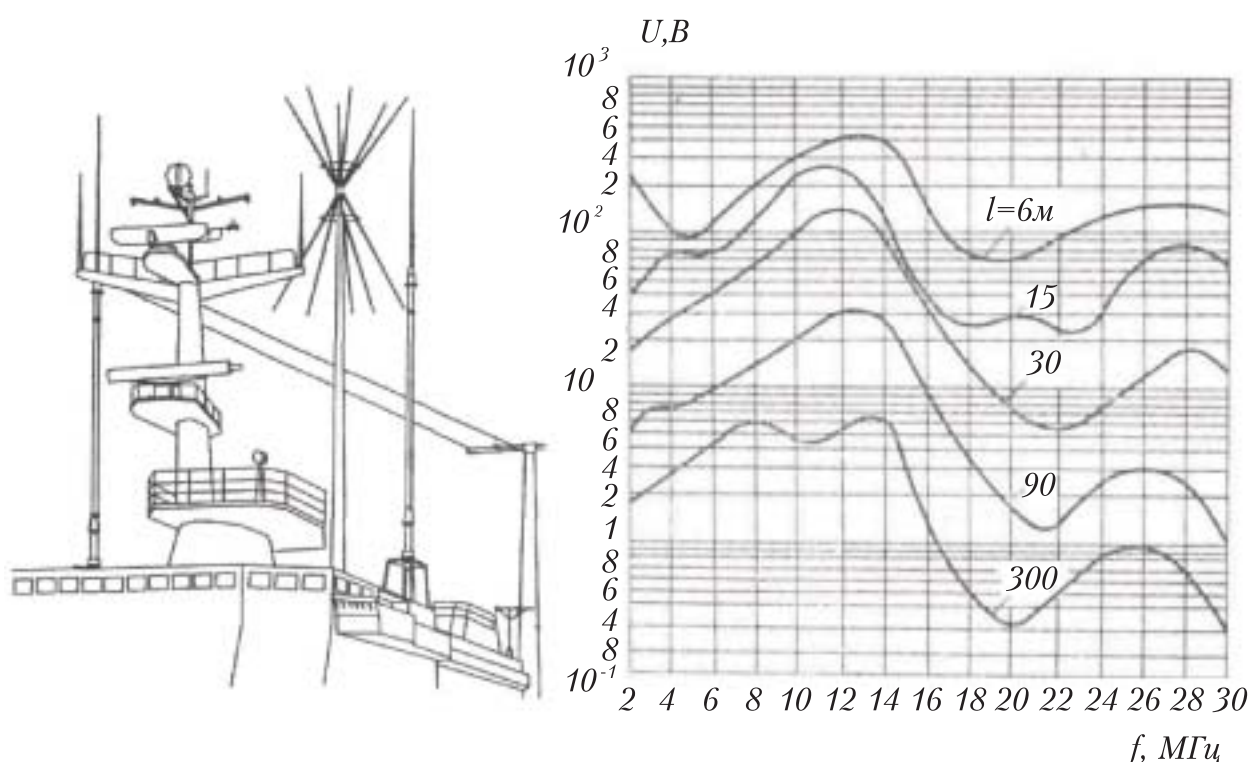


Рис. 1. Эскиз взаимодействующих антенн радиосвязи на ТОМБ и зависимость уровня наведённого напряжения при взаимодействии приёмной и передающей антенн в зависимости от расстояния между ними и радиочастотного диапазона их работы.

взаимодействию приёмной и передающей антенн РСС в зависимости от расстояния между ними и радиочастотного диапазона их работы. Наличие таких больших уровней наведённых напряжений приводит к широким полосам частот блокирования радиоприёма и существенно усложняет совместное одновременное функционирование таких радиоэлектронных средств.

Для ведения радиосвязи с морских судов используют вертикальные поляризованные

передающих антенн радиосвязи, размещенных на морских судах значительно отличаются от круговых [7].

При этом не стоит забывать, что в основном в пределах морских судов электромагнитное поле (ЭМП) радиопередатчиков РСС окончательно не сформировано и структура электромагнитных волн соответствует ближней зоне излучения, что сильно усложняет возможность расчёта взаимных влияний. К этому

также добавляется то, что помимо основного излучения радиопередатчиков существует наличие внеполосного и побочного излучения, также существуют и побочные каналы радиоприёма у приёмных устройств, которые за счёт этого являются рецепторами большого количества взаимных радиопомех.

Таким образом, актуально создание доступной научно-технической инженерной методики по расчёту электромагнитного взаимовлияния РСС, расположенных на морских судах, с целью обоснования технических решений по обеспечению их электромагнитной совместимости. При этом данная методика должна основываться на экспериментальных данных испытаний РСС при их эксплуатации на морских судах. А также необходима её автоматизация для выполнения большого количества и с заданной точностью трудоёмких расчётов различных вариантов размещения антенных устройств и анализ их зависимостей от различных параметров их эксплуатации.

На основе теоретических материалов и результатов экспериментальных исследований взаимного влияния РСС в пределах морских судов была разработана методика аналитической оценки ЭМС РСС для диапазона радиочастот $0,3 \div 400$ МГц.

Исходными данными для неё служат:

1. Радиочастота электромагнитных волн, излучаемых передающим устройством (основная, внеполосная, на гармониках, на субгармониках, комбинационная, интермодуляционная, паразитная, шумовая): $f_{\text{прд}}$, МГц;

2. Мощность передающего устройства, излучающего электромагнитные волны на рассматриваемой радиочастоте (для основных, боковых, дальних, задних лепестков диаграммы направленности антенны): $P_{\text{прд}}$, Вт;

3. Полоса частот излучения радиопередатчика на p -ой гармонике (1-й, 2-й, ... 5-й) на уровне X дБ (-3дБ, -30 дБ, -60 дБ), МГц $\Delta f_{\text{хрпрд}}$;

4. Тип антенны радиопередатчика;

5. Геометрические размеры антенны радиопередатчика;

6. Вид поляризации электромагнитных волн, излучаемых передающим устройством: вертикальная, горизонтальная, круговая;

7. Полное сопротивление антенны радиопередатчика $Z_{\text{вх}}$, Ом;

8. Активное сопротивление антенны радиопередатчика $R_{\text{вх}}$, Ом;

9. Коэффициент усиления антенны радиопередатчика для основного, бокового, дальнего и заднего лепестка на рабочих частотах, $G_{\text{прд}}$, в раз;

10. Ширина диаграммы направленности передающей антенны $\Psi_{\text{прд}}$, град;

11. Погонная емкость вертикальной $C_{\text{вер}}$ и горизонтальной $C_{\text{гор}}$ части проволочных (лучевых) антенн радиопередатчика, Ф/м;

12. Тип применяемого кабеля для антенно-фидерного тракта передатчика с указанием следующих параметров:

Диэлектрическая проницаемость изоляции ϵ , тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$, диаметр внешнего проводника (экрана) D , диаметр внутреннего проводника d , длина применяемого кабеля l ;

13. Радиочастота электромагнитных волн, принимаемых приёмным устройством (основная, промежуточная, зеркальная, комбинационная, на субгармониках): $f_{\text{прм}}$, МГц;

14. Промежуточная частота радиоприёмника $f_{\text{пч}}$, МГц;

15. Частота гетеродина радиоприёмника $f_{\text{г}}$, МГц;

16. Полоса пропускания усилителя промежуточной частоты радиоприёмника на уровне X дБ (-3дБ, -30 дБ, -60 дБ) $\Delta f_{\text{хпрм}}$, МГц;

17. Чувствительность радиоприёмника σ , В;

18. Полное сопротивление антенны радиоприёмника $Z_{\text{вх}}$, Ом;

19. Активное сопротивление антенны радиоприёмника $R_{\text{вх}}$, Ом;

20. Тип антенны радиоприёмного устройства;

21. Геометрические размеры радиоприёмного устройства;

22. Вид поляризации электромагнитных волн, принимаемых приёмным устройством: вертикальная, горизонтальная, круговая;

23. Коэффициент усиления антенны радио-приёмника для основного, бокового, дальнего и заднего лепестка на рабочих частотах, $G_{\text{прм}}$, в раз;

24. Параметры аппроксимации двухсигнальной частотной характеристики приёмника по блокированию $\Delta f_0, \%$, $U_0, \text{В}$;

25. Ширина диаграммы направленности приёмной антенны $\Psi_{\text{прм}}$, град;

26. Тип применяемого кабеля для антенно-фидерного тракта приёмника с указанием следующих параметров:

Диэлектрическая проницаемость изоляции ϵ , тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$, диаметр внешнего проводника (экрана) D , мм, диаметр внутреннего проводника d , мм, длина применяемого кабеля l , м;

27. Угол между линиями, соединяющими расчётную точку в пространстве с концами вертикальной $\gamma_{\text{вер}}$ и горизонтальной $\gamma_{\text{гор}}$ частями проволочной (лучевой) антенны, град;

28. Угол между осью штыревой антенны и линией, соединяющей расчётную точку в пространстве и основание антенны α , град;

29. Вид расположения взаимодействующих антенн: на одном уровне, на разных уровнях;

30. Процент затенённости препятствиями взаимодействующих антенн $\chi, \%$;

31. Расстояние между взаимодействующими антеннами r , м.

Порядок расчёта

1. Частотный анализ.

На данном этапе вычисляются возможные частотные каналы влияния при взаимодействии приёмных и передающих устройств.

$$K_{\text{max}} = \frac{f_{\text{max прд}}}{f_{\text{min прм}}}; \quad K_{\text{min}} = \frac{f_{\text{min прд}}}{f_{\text{max прм}}};$$

Если

$K_{\text{max}} > 1; 1 < K_{\text{min}} < 1,3$ внеполосное излучение

$K_{\text{max}} \geq 1; K_{\text{min}} \leq 1$; основное излучение

$0,7 < K_{\text{max}} < 1; 0,5 < K_{\text{min}} < 1,3$ внеполосное излучение

$K_{\text{max}} \geq 0,5; K_{\text{min}} < 0,5$ вторая гармоника

$K_{\text{max}} \geq 0,33; K_{\text{min}} < 0,33$ третья гармоника

$K_{\text{max}} \geq 0,25; K_{\text{min}} < 0,25$ четвертая гармоника

$K_{\text{max}} \geq 0,2; K_{\text{min}} < 0,2$ пятая гармоника

Для однократного преобразования частот в радиоприёмниках при выполнении неравенства будет иметь место влияние

$$\left| pf_{\text{прд}} - \frac{m}{n} f_{\text{прм}} - \nu f_{\text{пч}} \frac{n - \nu \zeta}{m} \right| - \frac{\Delta f_{\text{хпрд}}(p) + \Delta f_{\text{хпрм}}}{2} \leq 0,$$

где

$p=1,2,3,\dots,p_{\text{max}}$ – порядковый номер гармоники центральной частоты радиопередатчика,

$n = 0,1,2,\dots,n_{\text{max}}$ – порядковый номер частот гетеродина;

$m = 0,1,2,\dots,m_{\text{max}}$ – порядковый номер побочного канала;

ν – признак настройки гетеродина радиоприёмника (+1 – для верхней настройки, -1 – для нижней настройки);

ζ – признак зеркального канала радиоприёмника ((+1 – для верхней настройки, -1 – для нижней настройки);

$$p_{\text{max}} = 10^{\frac{E-B}{A}}, \quad n_{\text{max}} = 10^{\frac{E-D}{C}},$$

$$E = \lg\left(\frac{P_{\text{прд}}}{\sigma} G_{\text{прд}} G_{\text{прм}} \left(\frac{3 \cdot 10^8}{4\pi r f_{\text{прд}}}\right)\right)$$

Коэффициенты выбираются из таблицы 1.

Таблица 1

Рабочие частоты, МГц	A	B	C	D
Менее 30 МГц	7,0	2,0	2,5	8,5
От 30 до 300 МГц	8,0	3,0	3,5	8,5
Более 300 МГц	6,0	4,0	4,0	6,0

2. Энергетический анализ.

На данном этапе вычисляются возможные уровни электромагнитных полей в заданной области.

В общем случае выражение для электрической составляющей напряженности электромагнитного поля равна

$$E = \Im(C_A, Z_A) * \Re(P_{\text{прд}}, R, f_{\text{прд}}) * G_{\text{прд}}(f_{\text{прд}}, R) * \xi_{\text{прд}} *$$

$$* \eta_{\text{фпрд}}(l_{\text{прд}}, \epsilon, \text{tg}(\delta), d, D, f_{\text{прд}}) * K_3 * K_{\Gamma} * \sin \frac{\alpha}{2},$$

где

$\mathfrak{Z}(C_A, Z_A)$ – выражение, зависящее от погонных емкостей и входных сопротивлений антенны радиопередающего устройства;

$$\Re(P_{\text{прд}}, R, f) = Q_1(P, f) * R^{-6} + Q_2(P, f) * R^{-5} + Q_3(P, f) * R^{-4} + Q_4(P, f) * R^{-3} + Q_5(P, f) * R^{-2} + Q_6(P, f) * R^{-1}$$

где $Q_1 \div Q_6$ – коэффициенты аппроксимации полинома,

R – расстояние между антенной и анализируемой точкой пространства,

P – мощность передатчика,

f – радиочастота передатчика,

$$G_{\text{прд}}(f_{\text{прд}}, R) = G_0(0,7 + 0,3e^{-0,6 \frac{\Delta f}{f_0}}) - 15e^{-4 \frac{R}{R_{\text{дз}}}}$$

G_0 – коэффициент антенны передатчика по техническим условиям;

Δf – отстройка по частоте от номинальной;

$R_{\text{дз}}$ – граница дальней зоны для данной радиочастоты;

$$\eta_{\text{Фпрд}}(l_{\text{прд}}, \varepsilon, \text{tg}(\delta), d, D, f_{\text{прд}}) = e^{-2l(2,62 * 10^3 \sqrt{\varepsilon f(1+D/d)/D \lg(D/d)} + (9,1 * 10^3 f \sqrt{\varepsilon \text{tg}(\delta)})}$$

K_3 – коэффициент, учитывающий затенение препятствиями между взаимодействующими антеннами;

K_r – коэффициент, учитывающий уменьшение уровня сигнала на гармонических составляющих;

3. Уровень наводимых напряжений.

На данном этапе рассчитывается уровень наводимых напряжений на входе приемного устройства, учитывающий распространение сигнала по антенно-фидерному тракту

$$U = E * ((\lambda / \pi) \sqrt{G_{\text{прм}} R_A / 73,1}) * K_{\Pi} * \eta_{\text{Фпрм}}(l_{\text{прм}}, \varepsilon, \text{tg}(\delta), d, D, f_{\text{прм}}),$$

где

λ – длина волны принимаемых радиоволн;

K_{Π} – коэффициент, учитывающий разную рабочую поляризацию для взаимодействующих приёмной и передающей антенны.

$$\eta_{\text{Фпрм}}(l_{\text{прм}}, \varepsilon, \text{tg}(\delta), d, D, f_{\text{прм}}) = e^{-2l(2,62 * 10^3 \sqrt{\varepsilon f(1+D/d)/D \lg(D/d)} + (9,1 * 10^3 f \sqrt{\varepsilon \text{tg}(\delta)})}$$

4. Ширина полосы блокирования радиопомехами.

На данном этапе рассчитывается ширина полосы радиочастот приёмного устройства, заблокированная радиопомехами от работы радиопередающего устройства, в зависимости от уровня наведённого напряжения.

$$\Delta f_{\text{БЛ}} = \pm \sqrt{-2 * \Delta f_0^2 * \ln(1 - \frac{U}{2U_0})}$$

На основе разработанной методики были рассчитаны графические зависимости уровня наведённого напряжения от различных параметров при парном взаимодействии приёмного и передающего устройства (рис. 2÷4).

На основе разработанной методики оценки электромагнитной совместимости РСС был сформирован алгоритм функционирования её программной реализации.

На рисунке 5 показан укрупнённый алгоритм функционирования программы расчёта электромагнитной совместимости РСС, в котором можно выделить последовательность и основные этапы расчёта.

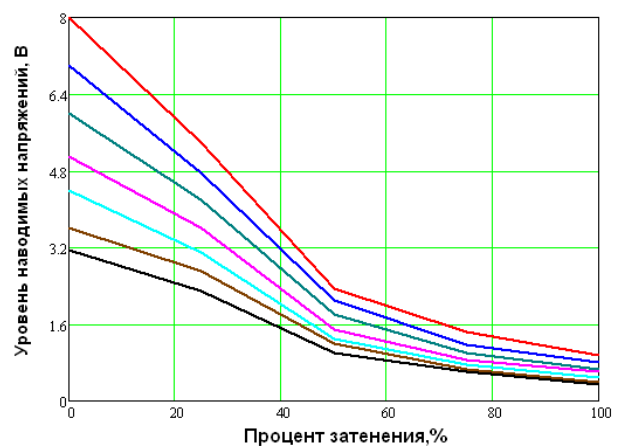


Рис. 2. Зависимость уровня наводимых напряжений от процента затенённости препятствиями между взаимодействующими антеннами для различных значений мощности радиопередающего устройства.

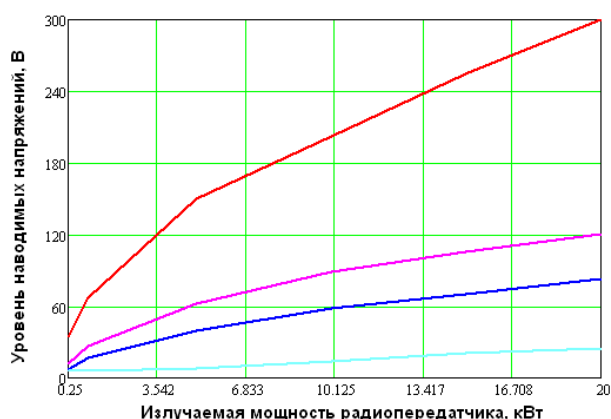


Рис. 3. Зависимость уровня наводимых напряжений от мощности радиопередающего устройства при различных расстояниях между взаимодействующими антеннами.

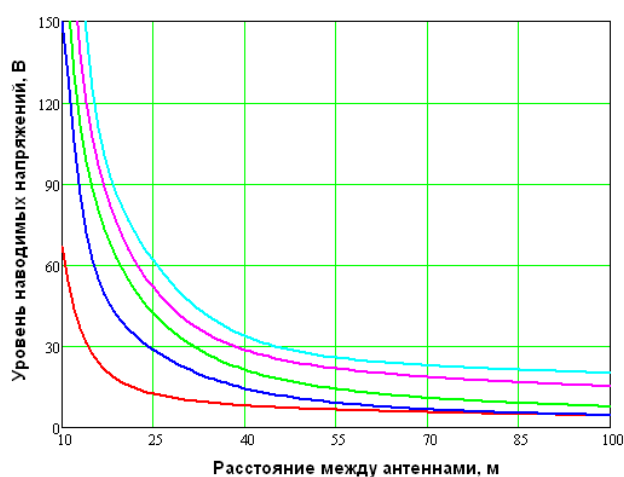


Рис. 4. Зависимость уровня наводимых напряжений от расстояния между взаимодействующими антеннами при различных мощностях радиопередающего устройства.

В соответствии с сформированным алгоритмом была разработана программа расчёта взаимного влияния РЭС при их совместном функционировании на морских судах.

На рисунке 6 представлены результаты расчёта данной программы по разработанному алгоритму при парном взаимодействии приёмной и передающей антенн РЭС. На нём приводятся значения ширины полос блокирования



Рис. 5. Укрупнённая структура алгоритма программной реализации методики расчёта ЭМС РЭС.

взаимными помехами при их совместном функционировании в пределах морского судна в зависимости от расстояния между ними.

Разработанная программно-алгоритмическая реализация научно-технической методики по оценке электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств связного профиля позволяет осуществлять парную оценку электромагнитной совместимости РЭС при их расположении в пределах морского судна с наглядным отображением результатов в виде графиков по интересующим параметрам.

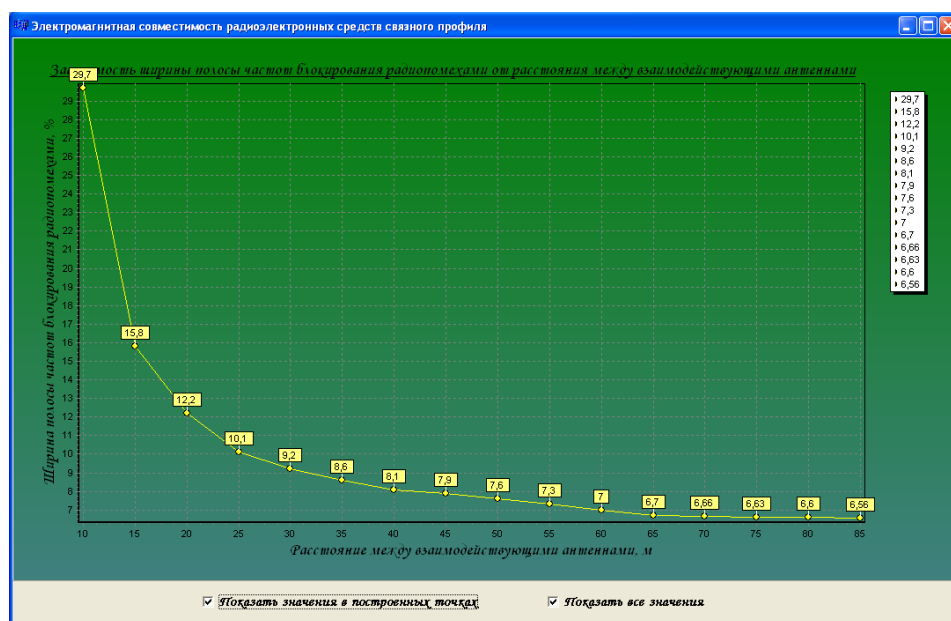


Рис. 6. Результаты расчёта зависимости ширины полосы блокирования радиопомехами от расстояния между взаимодействующими приёмной и передающей антеннами.

Разработанные научно-методическое и программно-алгоритмическое обеспечение оценки ЭМС РСС позволяет уменьшить вре-

менные, финансовые и материальные затраты при проектировании морских судов и комплексов их радиосвязными системами.

Список литературы

- ГОСТ Р 52691 – 2006. «Совместимость технических средств электромагнитная. Оборудование и системы морской навигации и радиосвязи. Требования и методы испытаний». – 28 с.
- Лысенко Э.Л., Сазонов С.П., Крупнов С.Р., Азаров Б.В. Проблемные вопросы в области электромагнитной совместимости и перспективные пути их решения // Морская радиоэлектроника, №1 (4), 2003. – Л.: Судостроение, 2003. – с. 14-18.
- РД 31.64.26-00. Нормы и правила обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) на морских подвижных объектах и методы комплексной оценки ЭМС. – СПб: ЦНИИ МФ, 2000. – 104 с.
- Григорьев А.Г., Матисен А.И., Патрин В.С. Защита радиоприема на судах от помех. – Л.: Судостроение, 1973. – 208 с.
- Вершков М.В. Судовые антенны. – С-Пб.: ЦНИИ МФ, 2008. – 414 с.
- Лазарев Д.В. Автоматизация управления параметрами электромагнитных полей в условиях корабля в интересах обеспечения электромагнитной совместимости его радиоэлектронных средств // Морской вестник №4 (36), СПб: Мор Вест, 2010. – С. 19-28.
- Яковлев А.Ф. Использование элементов надстроек корабля для улучшения характеристик коаксиальной логопериодической антенны // Судостроение, №5 (744), 2002. – С. 31-34.