

DOI: 10.18721/JCSTCS.12406
УДК 621.396.67

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ИНТЕРМОДУЛЯЦИОННЫХ ПОМЕХ ГРУППЫ РАДИОСТАНЦИЙ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ

А.А. Боробов, Р.Ю. Бородулин

Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Будённого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Представлена методика оценки интермодуляционных помех, действующих на входе одного из приёмников группы радиостанций средней мощности. Данная методика построена на определении мощностей мешающих сигналов на зажимах приёмной антенны путем вычисления узловых потенциалов. Узловые потенциалы отличаются от обычных тем, что находятся не внутри сегментов, на которые разбивается провод, а в местах соединения проводников, в том числе с нагрузкой. Для расчетов используется вычислительная схема, основанная на методе моментов. В качестве объекта исследования рассмотрена группа радиостанций в составе двух аппаратных. Описан алгоритм расчета мощности интермодуляционной помехи, пересчитанной ко входу приёмника. С помощью данного алгоритма на основе справочных данных произведено численное моделирование помеховой обстановки в районе размещения объекта. Доказано, что представленный способ позволяет упростить задачу расчета мощности в нагрузке приёмной антенны, а также расширить область применения известных методик оценки помеховой обстановки.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, интермодуляционные помехи, развязка антенн, группа радиостанций средней мощности, помеховая обстановка, метод моментов.

Ссылка при цитировании: Боробов А.А., Бородулин Р.Ю. Методика оценки интермодуляционных помех группы радиостанций средней мощности // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2019. Т. 12. № 4. С. 72–83. DOI: 10.18721/JCSTCS.12406

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

METHOD FOR ASSESSING INTERMODULATION INTERFERENCE OF A GROUP OF MEDIUM-POWER RADIO STATIONS

A.A. Borobov, R.Yu. Borodulin

Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budenny,
St. Petersburg, Russian Federation

The article presents a methodology for assessing intermodulation interference at the input of one of the receivers of a group of medium-sized radio stations. This technique is based on determining the powers of interfering signals at the terminals of the receiving antenna by calculating the nodal potentials. Nodal potentials differ from ordinary ones in that they are not inside the segments into which the wire is divided, but at the junctions of the conductors, including the load. For calculations, a computational scheme based on the method of moments is used. As an object of study, a group of radio stations consisting of two hardware stations is considered. The authors presented an algorithm for calculating the

power of intermodulation interference, counted to the input of the receiver. Using this algorithm, based on the reference data, a numerical simulation of the interference situation in the area of the object is performed. It is proved that the presented method allows us to simplify the task of calculating the power in the load of the receiving antenna, as well as expand the scope of known methods for evaluating the interference environment.

Keywords: electromagnetic compatibility, intermodulation interference, decoupling of antennas, a group of medium-sized radio stations, interference environment, method of moments.

Citation: Borobov A.A., Borodulin R.Yu. Method for assessing intermodulation interference of a group of medium-power radio stations. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems, 2019, Vol. 12, No. 4, Pp. 72–83. DOI: 10.18721/JCSTCS.12406

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение

Обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) является одним из основных требований, предъявляемых к узлам связи различного назначения.

Для определения перечня мероприятий, необходимых для обеспечения ЭМС, в каждом конкретном случае требуется качественная оценка помеховой обстановки, сложившейся в районе развертывания узла связи. Данная оценка должна включать анализ потенциальных помех, возникающих из-за нелинейных эффектов в приёмниках. Этот анализ может заключаться не только в определении нежелательных номиналов рабочих частот (для близко расположенных радиостанций), но и в оценке уровней интермодуляционных помех (ИМП) на входе конкретного приёмника.

Цель исследования – разработка методики оценки интермодуляционных помех группы радиостанций средней мощности, работающих на проволочные коротковолновые антенны, расположенные в ближней зоне излучения или вблизи её границы.

Методика расчета узловых потенциалов

В соответствии с рекомендациями союза электросвязи, исходными данными методики расчета ИМП являются уровни мешающих сигналов на входе приёмника [2].

При рассмотрении приёмника (рецептора помех) с подключенной к нему проволочной приёмной антенной и мешающего

передатчика (эмиттера помех) с подключенной к нему проволочной передающей антенной, значения ИМП можно рассчитать, например, путём решения системы интегральных уравнений методом моментов (ММ). Данная система формулируется в частотном представлении и основывается на методе комплексных амплитуд [10]. При составлении подобных вычислительных схем, в том числе и при использовании известных программ, значения токов можно получить либо на поверхности, либо в узлах соединения проводов, в том числе на зажимах нагруженной приёмной антенны [11].

При расчете мощности принимаемого сигнала, выделяемой на нагрузке (приёмнике), возникают существенные трудности вычислительного характера, вызванные многократным ручным перезапуском программ с различным набором исходных данных, что может привести к накоплению различного рода ошибок. Так, для нахождения тока в нагрузке (имитации приёмника) потребуются проведение ряда манипуляций, таких как нахождение ЭДС на разомкнутых зажимах антенны (без нагрузки) и вычисление входного сопротивления приёмной антенны в режиме передачи.

Существенно упростить задачу расчета мощности в нагрузке можно путём модернизации известных вычислительных алгоритмов с целью нахождения так называемых узловых потенциалов. Узловые потенциалы отличаются от обычных тем, что находятся

не внутри сегментов, на которые разбивается провод, а в местах соединения проводников, в том числе с нагрузкой.

Рассмотрим процедуру нахождения узловых потенциалов на примере известной вычислительной схемы, основанной на ММ с кусочно-постоянными базисными функциями.

Одним из типов интегральных уравнений, решаемых методом моментов, является интегральное уравнение для электрического поля (ИУЭП), которое для тонкопроволочных структур может иметь вид уравнения Харрингтона [12]:

$$E_z^i(0, z) = \int_{-L/2}^{L/2} \left[i\omega\mu I(z') - \frac{1}{i\omega\epsilon} \frac{\partial I(z')}{\partial z'} \frac{\partial}{\partial z} \right] \times \frac{\exp(-ikr)}{4\pi r} dz', \quad (1)$$

где L – длина провода.

Здесь неизвестными являются значения токов $I(z')$ в выбранных точках z проводов приёмной и передающей антенн. Искомое электромагнитное поле (ЭМП) – это касательные к проводникам составляющие вектора электрического и магнитного полей \mathbf{E}_τ , \mathbf{H}_τ , что есть сумма рассеянного на проводниках поля (поля, создаваемого токами, текущими по проводникам) \mathbf{E} , \mathbf{H} и заданного действующего поля (поля источника) \mathbf{E}_0 , \mathbf{H}_0 .

Выражение для скалярного потенциала $V(r)$ через решение уравнений Гельмгольца имеет вид [1]:

$$V(r) = -\frac{1}{i\omega\epsilon} \int \mathbf{j}^{\text{CT}}(\mathbf{r}') \cdot \text{grad}'(G(|\mathbf{r}' - \mathbf{r}'|)) d\mathbf{r}'^3 = \frac{1}{i\omega\epsilon} \text{div} \int G(|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|) \mathbf{j}^{\text{CT}}(\mathbf{r}') \cdot d\mathbf{r}'^3, \quad (2)$$

где $G(|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|) = G(R) = \frac{e^{ikR}}{4\pi R}$ – функция Грина.

Выражение для нахождения потенциала V рассеянного поля, наводимого касательной составляющей к поверхности провода вектора напряженности электрического поля E падающей волны, можно представить в виде [13]:

$$V^{(n)}(s) = \frac{1}{i\omega\epsilon} \sum_{m=1}^{N_w} \int_0^l G(R^{(n,m)}(s, s')) \frac{d}{ds'} I^{(m)}(s') ds', \quad (3)$$

где s, s' – расстояния вдоль n -го и m -го сегментов разбиения, отсчитываемые от их начала, соответственно; N_w – общее число сегментов проволочной структуры; l – длина сегмента; $G(R)$ – функция Грина; $R^{(n,m)}$ – расстояние между n -м и m -м сегментами; $I^{(m)}$ – комплексная амплитуда тока m -го сегмента на расстоянии s' от его начала.

Алгоритм нахождения потенциала на n -м сегменте в его точках s (во всех точках, кроме узловых) включает следующие шаги.

1. Найти токи в точках s' m -го сегмента путем решения системы линейных алгебраических уравнений, составленной из уравнения Харрингтона.

2. Найти производные токов на m -м сегменте в точках s' путём разбиения сегментов на отрезки, воспользовавшись разностной схемой.

3. Вычислить функцию Грина между точками s, s' n -го и m -го сегментов.

4. Численно проинтегрировать вдоль сегмента найденные величины.

5. Повторить шаги 1–4 для каждого сегмента проволочной структуры и просуммировать полученные значения интегралов с учётом первого множителя.

Далее находятся узловые потенциалы. Для этих целей можно использовать два типа граничных условий:

- условие, основанное на выполнении закона Кирхгоффа для токов проводников, сходящихся в узел (сумма токов равна нулю);

- условие, основанное на выполнении условия непрерывности зарядов (потенциалов) при переходе от сегмента к сегменту, на которые разбивается анализируемый проводник.

Для метода моментов с кусочно-постоянным базисом идея соблюдения непрерывности потенциала заключается в том, что ставится задача выполнения не только условия равенства производных токов в узлах, но и условия равенства потенциалов в узлах соединения проводов. Это требуется для исключения их «скачков» при переходе через узлы, соединяющие соседние сегменты проводов.

Можно экстраполировать значения потенциалов с отрезков сетки разбиения сегментов, граничащих с узлом, в данный узел, согласно следующим выражениям:

$$U = V^{(n)}(h_n) - h_n \frac{d}{ds} V^{(n)}(h_n) \quad (4 \text{ а})$$

или

$$U = V^{(n)}(h_n) + h_n \frac{d}{ds} V^{(n)}(l_n - h_n), \quad (4 \text{ б})$$

где U – значение потенциала в узле; h_n – шаг сетки на n -м проводе.

Выражение (4 а) используется в том случае, когда начало n -го провода подключено к узлу. Выражение (4 б) – когда подключен конец.

Таким образом, требование непрерывности зарядов заключается в том, что потенциалы, экстраполированные в узел, становятся равны одной и той же постоянной величине U . В случае если узел является свободным (например, конец проволочной антенны), потенциал V в свободном пространстве определяется согласно выражению (3).

После применения выражений (3) и (4) средняя мощность может быть получена через ток в первом и втором узлах, подключенных к нагрузке I_{n1} , I_{n2} , и потенциалы данных узлов U_{n1} , U_{n2} , соответственно, как

$$P_n = 0,5 \operatorname{Re}(I_{n1} U_{n1}^* + I_{n2} U_{n2}^*). \quad (5)$$

Определив мощности мешающих сигналов на входе приёмника, можно с высокой точностью рассчитать и уровень ИМП, создаваемой ими, воспользовавшись рекомендациями союза электросвязи [2].

Алгоритм оценки интермодуляционных помех

Алгоритм оценки интермодуляционных помех (рис. 1) может включать в себя определение номиналов потенциально опасных частот передачи близко расположенной радиостанции и мощностей сигналов на данных частотах. Далее по методике [2] можно рассчитать уровни ИМП, пересчитанные ко входу приёмника.

В качестве исходных данных алгоритма вводятся следующие показатели:

$f_{\text{пер}}, f_{\text{пр}}$ – частоты передачи и приёма;

x_1, y_1, z_1 – координаты точки установки мачты передающей антенны;

x_2, y_2, z_2 – координаты точки установки мачты приёмной антенны;

h_1, h_2 – высота подъёма передающей и приёмной антенн соответственно;

$\epsilon_1, \mu_1, \sigma_1$ – электрические параметры воздуха;

$\epsilon_2, \mu_2, \sigma_2$ – электрические параметры почвы;

L_1 – расстояние между передающей и приёмной антеннами собственной радиостанции;

P_s – уровень полезного сигнала на входе приёмника;

$P_{\text{ш}}$ – уровень шума на входе приёмника;

A – требуемое превышение уровня сигнала над уровнем помехи.

После ввода исходных данных счётчикам потенциально опасных частот соседнего передатчика присваиваются нулевые значения (блок 2). В блоках 3–14 производится вычисление и запись всех возможных номиналов частот соседнего передатчика, способных сформировать ИМП m -го и k -го порядков. Далее в блоках 15–17 производится расчёт развязки B между антеннами эмиттера и рецептора помех. Для расчёта развязки на вход передающей антенны подаётся сигнал генератора постоянного тока с уровнем P_t на исследуемой частоте f_k , затем по методике, описанной выше, рассчитывается выделяемая на нагрузку приёмной антенны мощность P_r . Развязка B определяется как отношение [8]:

$$B = 10 \lg \left(\frac{P_t(f_k)}{P_r(f_k)} \right). \quad (6)$$

Далее вычисляется мощность мешающего сигнала на зажимах приёмной антенны на всех определенных частотах простым вычитанием величины B из номинальной мощности передатчика $P_{\text{пер}}$ (блок 18). Имея значения данных мощностей, можно вычислить уровни ИМП по любой из известных методик (блоки 19–21).

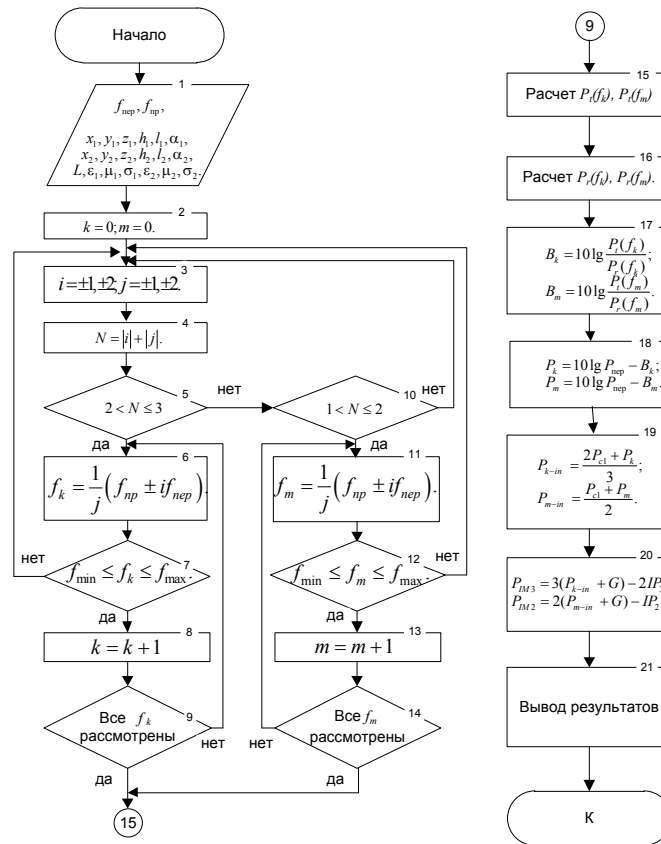


Рис. 1. Алгоритм расчета уровня ИМП на входе приёмника
 Fig. 1. The algorithm for calculating the level of IPM at the input of the receiver

Представленный способ определения мощности помехи на входе приёмника впервые позволяет с высокой точностью рассчитывать развязку между близкорасположенными проволочными коротковолновыми антеннами, произвольно ориентированными в пространстве. Кроме того, он учитывает влияние подстилающей поверхности и металлических конструкций (антенных мачт) на токи, наводимые в проводниках.

Сравним результаты анализа развязки антенн по методике расчёта узловых потенциалов с результатами, полученными другими известными способами. Один из них основан на вычислении взаимного сопротивления антенн:

$$S_{nm}(f) = 10 \lg \left\{ \frac{1}{2} \frac{\left[\operatorname{Re} \left(\frac{Z_{12}^2}{Z_{11}^2} \right) \right]^2 + \left[\operatorname{Im} \left(\frac{Z_{12}^2}{Z_{11}^2} \right) \right]^2}{2 - \left[\operatorname{Re} \left(\frac{Z_{12}^2}{Z_{11}^2} \right) \right]^2 + \left[\operatorname{Im} \left(\frac{Z_{12}^2}{Z_{11}^2} \right) \right]^2} \right\}, \quad (7)$$

где Z_{11} – собственное сопротивление передающей антенны; Z_{12} – взаимное сопротивление передающей и приёмной антенн.

Величину взаимного сопротивления Z_{12} можно определить различными способами, например, методом наводимых ЭДС, подробно описанном в [9].

Достоинством данного метода является достаточно высокая точность результатов и возможность расчета развязки антенн в ближней зоне. Существенными недостатками являются критические ограничения на взаимное размещение, ориентацию и форму антенн (симметричные проволочные вибраторы в параллельных плоскостях). Кроме того, при определении взаимных сопротивлений методом наводимых ЭДС не учитываются параметры подстилающей поверхности и влияние мачты приёмной антенны.

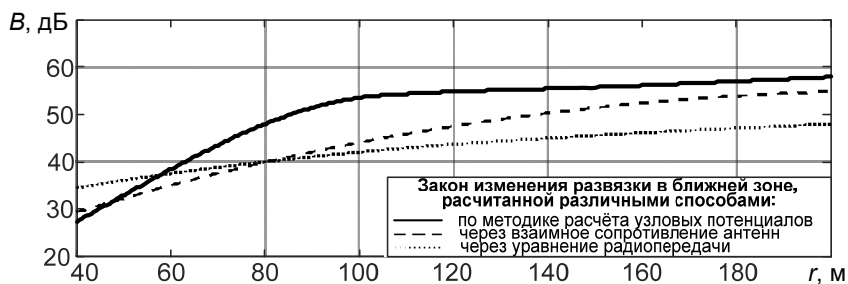


Рис. 2. Сравнение способов определения развязки антенн
 Fig. 2. Comparison of methods for determining the isolation of antennas

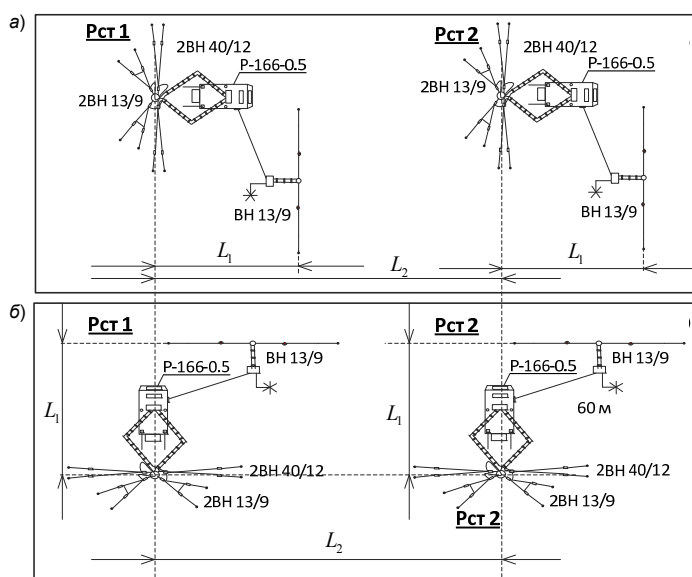


Рис. 3. Группа радиостанций средней мощности (вариант)
 Fig. 3. A group of medium-sized radio stations (option)

При рассмотрении помехи с позиции полезного сигнала её мощность на входе рецептора оценивается на основе уравнения радиопередачи [18]. При таком подходе определяющим фактором является уровень потерь сигнала на трассе распространения электромагнитной волны от эмиттера к рецептору. К сожалению, существующие модели расчёта данного параметра, подробно описанные в [14, 15], неприменимы либо для декаметрового диапазона волн, либо для ближней зоны излучения антенн.

Сравнение результатов расчёта развязки различными способами в зависимости от расстояния между антеннами (рис. 1) показывает, что способ анализа, основанный на расчёте узловых потенциалов, даёт более

объективную картину помеховой обстановки за счёт учёта влияния земли и мачты антенны.

Применим описанный выше алгоритм для расчёта уровней потенциальных ИМП 2-го и 3-го порядка на входе произвольного приёмника КВ диапазона группы радиостанций средней мощности, состоящей из двух аппаратных (рис. 2).

При одновременной работе передатчиков обеих станций на приёмник одной из них действуют три сигнала, один из которых S_0 является полезным, а два других – мешающими. Они исходят от собственного передатчика S_{m1} и передатчика соседней радиостанции S_{m2} . Определение мощности полезного сигнала производится по методикам, подробно описанным в [4–6].

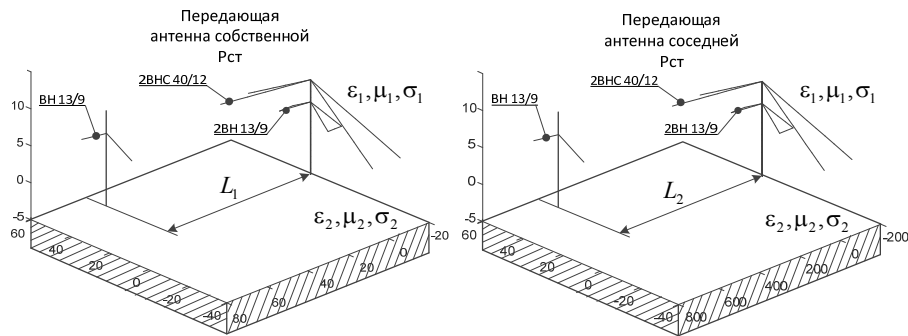


Рис. 4. Модель антенного поля группы радиостанций средней мощности
 Fig. 4. Model of the antenna field of a group of medium-sized radio stations

Для расчета мощностей сигналов S_{m1} и S_{m2} необходимо отдельно рассмотреть дуэльные ситуации взаимодействия приёмника (рецептора помех) с каждым из мешающих передатчиков (эмиттерами помех).

Постановка задачи

Пусть имеются две близко расположенные радиостанции средней мощности РСт1 и РСт2, работающие в разных радионаправлениях (см. рис. 2). Район развёртывания – Санкт-Петербург. Радиостанция РСт1 работает в радионаправлении с корреспондентом, находящимся в районе г. Мурманск (расстояние между корреспондентами около 1000 км). Частота передачи $f_{пер} = 12\,200$ кГц, частота приёма $f_{пр} = 12\,000$ кГц. Вид работы – однополосная модуляция (ОМ) с подавленной несущей (ЖЭ)¹. Минимально необходимый уровень полезного сигнала на входе приёмника $P_s = -76$ дБм. Антенна, работающая на передачу – 2ВН 13/9, приёмная антенна – ВН13/9². Почва в районе развёртывания радиостанций влажная ($\epsilon_2 = 10$, $\mu_2 = 1$, $\sigma_2 = 10^{-2}$).

Расстояние между передающей и приёмной антеннами радиостанции РСт1 $L_1 = 60$ м. Дистанция между передающей антенной РСт2 и приёмной антенной РСт1 (L_2) выбирается поочередно равной 200, 300, 400 и 500 м.

Необходимо рассчитать уровень потенциальных интермодуляционных помех,

создаваемых на входе приёмника радиостанции РСт1 (рецептора помех) передатчиками радиостанций РСт1 и РСт2 (эмиттерами помех), и сделать вывод о степени выполнения условия ЭМС при различных вариантах настройки передатчика РСт2.

Для вычисления номиналов частот соседнего передатчика $f_{пер 2}$, способных вызывать ИМП в приёмнике радиостанции РСт1, воспользуемся известным условием возникновения интермодуляционных составляющих [16]:

$$nf_1 \pm mf_2 = f_3, \quad (8)$$

где f_1, f_2 – частоты мешающих сигналов; f_3 – частота приёма полезного сигнала; $n, m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

Из уравнения (8) получим:

$$f_2 = \frac{1}{m}(f_3 \pm nf_1). \quad (9)$$

Решая уравнение (9) с учетом условия

$$N = |n| + |m| \leq 3, \quad (10)$$

находим возможные значения $f_{пер 2}$: 36400, 24200, 12100, 12400 кГц.

Далее по описанному выше алгоритму (рис. 1) рассчитаем уровни мощности мешающих сигналов на входе приёмника.

Численное моделирование помеховой обстановки группы радиостанций

Проведём моделирование работы передающей и приёмной антенн, развёрнутых на модели местности (рис. 4).

¹ Изделие Р–170П. Техническое описание. ЦЛ2.003.143 ТО.

² Передатчик Артек-1-КВ. Техническое описание. ШКИС.464124.002.

Таблица 1

Уровни мощности мешающих сигналов на входе приёмника

Table 1

Power levels of interfering signals at the receiver input

| $f_{пр},$ кГц | Параметры мешающего сигнала собственного передатчика | | Параметры мешающего сигнала соседнего передатчика | | $L_1, м$ | $L_2, м$ |
|------------------|---|----------|--|----------|----------|----------|
| | $f_{пер1},$ кГц | $P, дБм$ | $f_{пер2},$ кГц | $P, дБм$ | | |
| 12000 | 12200 | 4,5 | 36400 | -55,5 | 60 | 200 |
| | | 4,5 | 24200 | -70,5 | | |
| | | 4,5 | 12100 | -3 | | |
| | | 4,5 | 12400 | -3 | | |
| 12000 | 12200 | 4,5 | 36400 | -50 | 60 | 300 |
| | | 4,5 | 24200 | -59 | | |
| | | 4,5 | 12100 | -9 | | |
| | | 4,5 | 12400 | -9,5 | | |
| 12000 | 12200 | 4,5 | 36400 | -52,5 | 60 | 400 |
| | | 4,5 | 24200 | -65 | | |
| | | 4,5 | 12100 | -14 | | |
| | | 4,5 | 12400 | -14 | | |
| 12000 | 12200 | 4,5 | 36400 | -55 | 60 | 500 |
| | | 4,5 | 24200 | 70,5 | | |
| | | 4,5 | 12100 | -17 | | |
| | | 4,5 | 12400 | -18 | | |

В результате расчетов методом моментов получаем значения мощности P (дБм) мешающих сигналов S_{m1} и S_{m2} на частотах $f_{пер2}$ (табл. 1).

Теперь по методике [2] вычислим мощности потенциальных интермодуляционных помех, пересчитанные ко входу приёмника.

На графике (рис. 5) пунктирной горизонтальной линией обозначен минимально допустимый уровень сигнала для данной радиотрассы, при котором выполняется требуемое превышение уровня сигнала над уровнем помехи.

Как видно из результатов расчёта, на некоторых частотах приёмник оказывается поражённым (уровень помехи превышает уровень сигнала), и требование по ЭМС не выполняется.

При повороте передающей и приёмной антенн на угол 90° (рис. 3 б), уровень ИМП, в целом, снижается (рис 5 б). Таким образом, из графика видно, что эффект от изменения угла направленности антенн соизмерим с эффектом от территориального разнеса в ближней зоне.

Согласно исследованиям помеховой обстановки на территории Ленинградской области, число и уровень мешающих сигналов описывались данными, представленными в табл. 2 [7].

В качестве примера проведем моделирование работы радиостанции Rst1 в помеховой обстановке, описанной в табл. 2. Для упрощения исследования ограничимся анализом интермодуляционных продуктов третьего порядка.

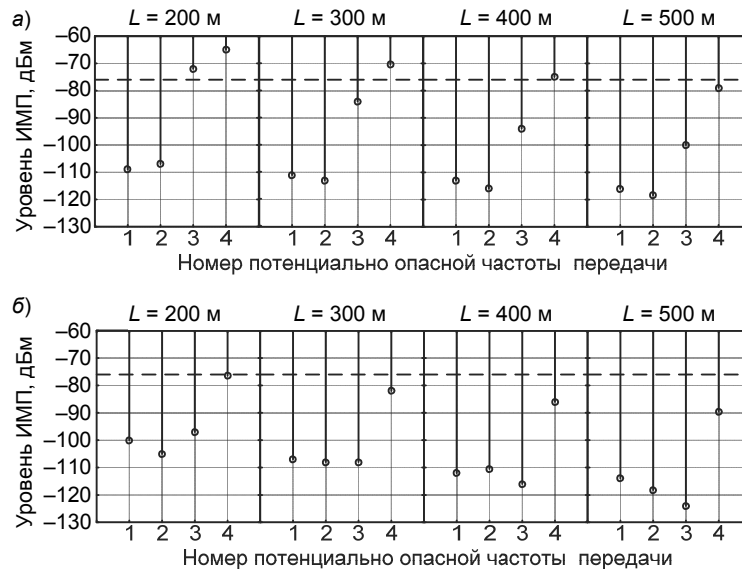


Рис. 5. Уровни мощности ИМП при различных вариантах взаимного расположения антенн
 Fig. 5. The power levels of the IMP with various options for the relative positioning of the antennas

Таблица 2

Данные помеховой обстановки в диапазоне частот 12000...13000 кГц на территории Ленинградской области

Table 2

Data interference environment in the frequency range 12000...13000 kHz in the Leningrad Region

| Диапазон частот, кГц | Число мешающих сигналов при уровнях, дБ/мкВ (дБ относительно 1 мкВ) | | | | | |
|----------------------|---|---------|---------|---------|---------|----------|
| | 40...50 | 50...60 | 60...70 | 70...80 | 80...90 | 90...100 |
| 12000...13000 | 30 | 20 | 10 | 5 | 2 | 2 |

В низкочастотной области диапазона значительный вклад в общий уровень помех вносят промышленные помехи, которые, складываясь на входе приёмного устройства, образуют примерно равный по спектру шум, статистические свойства которого достаточно точно описываются стационарным случайным процессом с нормальным распределением вероятностей мгновенных значений амплитуд [17]:

$$\Phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u e^{-\frac{\xi^2}{2}} d\xi, \quad (11)$$

где $u = \bar{z} - z_{тр} / \sigma_z$ — аргумент функции; $\bar{z} = P_c - P_n$, дБ — отношение медианных значений мощности сигнала к мощности помехи; $\sigma_z = \sqrt{\sigma_c^2 + \sigma_n^2}$ — среднеквадратическое отклонение величины z ; σ_c^2, σ_n^2 — дисперсия уровней сигналов и помех соответственно.

Очевидно, что при формировании интермодуляционных продуктов в приёмнике наибольший вклад в мощность помехи вносит передатчик собственной радиостанции. Здесь важен номер гармоники излучения, поскольку уровень гармоник значительно ослаблен по сравнению с полезным сигналом (как правило, уровень высших гармонических составляющих сигнала не превышает -65 дБ).

Подставим в алгоритм (см. рис. 1) вместо мощности мешающих сигналов соседнего передатчика $P_k(P_m)$ уровни помех из табл. 2, значения которых в указанных диапазонах распределены по закону (11). Тогда, предполагая, что в формировании ИМП участвует первая гармоника сигнала собственного передатчика, получим около 20 возможных помех с мощностью выше допустимой (рис. 6).



Рис. 6. Уровни мощности возможных ИМП третьего порядка с учётом помеховой обстановки в районе расположения рецептора

Fig. 6. Power levels of possible third-order UTIs taking into account the interference environment in the region of the receptor location

Учитывая существенный прирост количества РЭС (по сравнению с концом XX века) и малую область анализируемого диапазона частот, можно сделать вывод о неблагоприятной помеховой обстановке, в которой будет находиться исследуемый приёмник в современных условиях.

Для борьбы с интермодуляцией наиболее эффективными и целесообразными мерами являются те, которые направлены на снижение влияния излучения собственного передатчика при формировании ИМП. Такими мерами могут быть частотный, территориальный и поляризационный разнос эмиттера и рецептора помех. К сожалению, манёвр частотами при современном уровне освоения диапазона затруднён, а территориальный разнос ограничен возможностями кабельного оборудования.

Наиболее перспективным направлением является улучшение пространственной селективности антенн за счет изменения их конфигурации с минимальным усложнением конструкции. При этом основным объектом оптимизации должна выступать приёмная антенна, поскольку изменение направленных свойств передающей антен-

ны повлияет на уровень сигнала на входе приёмника корреспондента и, как следствие, может снизиться качество связи.

Улучшение электрических характеристик приёмной антенны в определённых направлениях прихода волны позволит изменять её ориентацию относительно собственной передающей антенны. Такая мера позволит снижать уровень помех от близко расположенного передатчика, избегая при этом недопустимых потерь мощности полезного сигнала на входе приёмника, обусловленных несовпадением максимума характеристики направленности приёмной антенны.

Заключение

Представленная методика оценки ИМП на входе приёмника позволяет с большой точностью определять мощность мешающих сигналов на зажимах проводочной антенны. Она даёт возможность производить расчеты для ближнего поля излучения, что расширяет область применения некоторых известных методик оценки ИМП (например, [3]) и впервые позволяет применить их для декаметрового диапазона радиоволн.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бородулин Р.Ю. Численные методы электродинамики: Монография. СПб.: ВАС, 2016. 180 с.
2. Рекомендация Международного союза электросвязи МСЭ-R SM.1134-1. Расчет интермодуляционных помех в сухопутной подвижной службе.
3. ГОСТ Р 55898–2013. М.: Стандартинформ, 2014.
4. Серков В.П. Распространение радиоволн и антенные устройства. СПб.: ВАС, 1981. С. 1–468.
5. Мешалкин В.А., Сосунов Б.В. Основы энергетического расчёта радиоканалов. СПб.: ВАС, 1991. С. 110.

6. Прохоров В.К., Шаров А.Н. Расчёт показателей эффективности радиосвязи. СПб.: ВАС, 1982. С. 1–132.

7. Комарович В.Ф., Сосунов В.Н. Случайные радиопомехи и надёжность КВ связи. М.: Связь, 1977. 136 с.

8. Вахлаков В.Р., Рожков А.Г., Сосунов Б.В., Чернолес В.П., Школин Ю.Д., Ярошенко В.С. Основы обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств. СПб.: ВАС, 1991. 206 с.

9. Айзенберг Г.З. Коротковолновые антенны. М.: Гос. изд-во литературы по вопросам связи и радио, 1962. 815 с.

10. Бородулин Р.Ю. Применение концептуальных моделей численных методов электродинамики для анализа характеристик вибраторов в бесконечных диссипативных средах // Информатика. Телекоммуникации. Управление. Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2016. № 4 (236). С. 29–42. DOI: 10.5862/JCSTCS.252.3

11. Вычислительные методы в электродинамике. Под ред. Р. Миттра. М.: Мир, 1977. 243 с.

12. Richmond J. Computer program for Thin-Wire Structures in Homogeneous Conducting Medium // National Technical Information Service. Springfield: VA, NASA contractor Rep., July 1973. CR-2399.

13. Burke G.J., Poggio A.J. Numerical Electromagnetic Code (NEC) method of moments. Lawrence Livermore Laboratory, 1981. 81 p.

14. ITU-R Rec. P.368-7. Ground-wave propagation curves for frequencies between 10 kHz and 30 MHz. ITU, 1992.

15. ITU-R Rec. P.1546-1. Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3000 MHz. ITU, 2003.

16. Перцов С.В., Шуцкой К.А. Входные цепи радиоприёмников. М.: Энергия, 1973.

17. Головин О.В. Декаметровая связь. М.: Радио и связь, 1990. 240 с.

28. Бородулин Р.Ю., Борохов А.А. Методика анализа развязки проволочных антенн методом моментов с использованием выполнения условий непрерывности зарядов // Информация и космос. 2019. № 3. С. 18–24.

Статья поступила в редакцию 11.09.2019.

REFERENCES

1. Borodulin R.Yu. *Numerical methods of electrodynamics*: Monograph. St. Petersburg: Military Academy of Communications Publ., 2016. 180 p. (rus)

2. ITU-R Rec. P.SM.1134-1. *Calculation of intermodulation interference in the land mobile service*. (rus)

3. GOST R 55898–2013. Moscow: Standartinform, 2014. (rus)

4. Serkov V.P. *Radio wave propagation and antenna devices*. St. Petersburg: Military Academy of Communications Publ., 1981. Pp. 1–468. (rus)

5. Meshalkin V.A., Sosunov B.V. *Fundamentals of energy calculation of radio channels*. St. Petersburg: Military Academy of Communications Publ., 1991. P. 110. (rus)

6. Prokhorov V.K., Sharov A.N. *Calculation of indicators of the effectiveness of radio communications*. St. Petersburg: Military Academy of Communications Publ., 1982. Pp. 1–132. (rus)

7. Komarovich V.F., Sosunov V.N. *Random radio interference and HF communications reliability*. Moscow: Radio i Svyaz Publ., 1977. 136 p. (rus)

8. Vakhlov V.R., Rozhkov A.G., Sosunov B.V., Chernoles V.P., Shkolin Yu.D., Yaroshenko V.S. *Fundamentals of ensuring electromagnetic compatibility of electronic equipment*. St. Petersburg: Military Academy of Communications Publ., 1991. 206 p. (rus)

9. Eisenberg G.Z. *Shortwave antennas*. Moscow: Gos. izd-vo literatury po voprosam svyazi i radio Publ., 1962. 815 p. (rus)

10. Borodulin R.Yu. Using of numerical electrodynamic methods for analyzing the characteristics of vibrators in infinite dissipative media. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems*, 2016, No. 4 (236), Pp. 29–42. DOI: 10.5862/JCSTCS.252.3. (rus)

11. *Computational methods in electrodynamics*. Ed. R. Mittra. Moscow: Mir Publ., 1977. 243 p. (rus)

12. Richmond J. *Computer program for thin-wire structures in homogeneous conducting medium*. National Technical Information Service. Springfield: VA, NASA Contractor Rep., July 1973. CR-2399.

13. Burke G.J., Poggio A.J. *Numerical electromagnetic code (NEC) method of moments*. Lawrence Livermore Laboratory, 1981. 81 p.

14. ITU-R Rec. P.368-7. *Ground-wave propagation curves for frequencies between 10 kHz and 30 MHz*. ITU, 1992.

15. ITU-R Rec. P.1546-1. *Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3000 MHz*. ITU, 2003.

16. **Pertsov S.V., Shchutskaya K.A.** *The input circuit of the radio*. Moscow: Energiya Publ., 1973. (rus)

17. **Golovin O.V.** *Decameter connection*. Moscow: Radio i Svyaz Publ., 1990. 240 p. (rus)

18. **Borodulin R.Yu., Borobov A.A.** Analysis technique for decoupling wire antennas by the method of moments using the fulfillment of charge continuity conditions. *Informacy and Space*, 2019, No. 3, Pp. 18–24. (rus)

Received 11.09.2019.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

БОРОБОВ Антон Андреевич

BOROBOV Anton A.

E-mail: antonborobov@yandex.ru

БОРОДУЛИН Роман Юрьевич

BORODULIN Roman Yu.

E-mail: borodulroman@yandex.ru