

**АЛГОРИТМ ПОИСКА НАИХУДШЕГО,
ИЗ УСЛОВИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ,
ВАРИАНТА ЧАСТОТ ДЛЯ РАДИОСРЕДСТВ
СОСРЕДОТОЧЕННОГО КОМПЛЕКСА РАДИОСВЯЗИ**

А.В. Федин, А.С. Коломиец
(Полтавский военный институт связи)

В статье рассмотрен алгоритм определения наилучшего, по условиям электромагнитной совместимости (ЭМС), варианта сочетаний частот для радиосредств (РС), входящих в состав сосредоточенного комплекса радиосвязи. В соответствии с предложенным алгоритмом в процессе нахождения данного варианта частот определяются максимально возможные уровни взаимных помех между РС комплекса. Это позволяет при проектировании комплекса предъявить требования к элементам его высокочастотного (ВЧ) тракта, обеспечивающие ЭМС радиосредств в комплексе.

электромагнитная совместимость, высокочастотный тракт, радиосредства

Работа совокупности РС на ограниченное число антенн, размещаемых на подвижном объекте приводит к возникновению взаимных радиопомех в сосредоточенном комплексе радиосвязи. Существенное уменьшение уровня взаимных помех возможно при использовании частотно-разделительных систем между РС, составляющих элементы ВЧ тракта этого комплекса. Определение требований к элементам ВЧ тракта целесообразно провести для наилучшего по условиям ЭМС варианта частот для РС, входящих в комплекс.

Постановка задачи. Для совокупности РС, входящих в состав подвижного комплекса радиосвязи разработать алгоритм поиска наилучшего с точки зрения ЭМС между РС комплекса варианта частот.

Анализ литературы, посвященной проблеме назначения частот РС комплексов и группировкам РС, показывает, что она решается применением частотного, территориального и частотно-территориального разнесения работающих РС [1 – 5]. В большинстве из указанных источников проблема ЭМС решается на стадии развертывания новых РС или уже развернутых и работающих РС с учетом их типовых характеристик.

При синтезе ВЧ тракта комплекса представляют интерес те частоты, на которых уровень взаимных помех между РС достигает своего наибольшего значения. Для этого необходимо рассмотреть попарное взаимо-

действие каждого приемника (приемопередатчика в режиме приема) с каждым передатчиком (приемопередатчика в режиме передачи). При определении наихудшего плана частот используется энергетический критерий несовместимости i -го передатчика комплекса с j -м приемником:

$$I_{\text{вх.ij}} \geq I_{\text{вх.j доп}}, \quad (1)$$

где $1 < j < M$, $1 < i < N$; $I_{\text{вх.ij}}$ – уровень взаимной помехи на входе j -го приемника от i -го передатчика комплекса; $I_{\text{вх.j доп}}$ – допустимый уровень помехи на входе j -го приемника при котором еще обеспечивается требуемое качество приема информации [6]; M – число приемников в составе комплекса; N – число приемопередатчиков (передатчиков) в составе комплекса. При этом наихудшему по условиям ЭМС варианту частот будет соответствовать условие:

$$I_{\text{вх.ij}} - I_{\text{вх.j доп}} = I_{\text{max j}}, \quad (2)$$

где $i = \overline{1, N}$; $j = \overline{1, M}$.

Число наихудших вариантов частот определяется числом приемников и режимом работы РС комплекса (одночастотный или двухчастотный симплекс).

Такой вариант для каждого приемника (радиостанции в режиме приема) будет содержать $M + N$ значений частот при работе РС в одночастотном и $M + 2N - 1$ значений частот при их работе в двухчастотном симплексе.

Задаваясь разномом между рабочими частотами РС комплекса рассчитываем варианты частот каждой пары приемник-передатчик, а также частоты интермодуляционных составляющих РС, входящих в комплекс, на которых уровень помех на входе приемника превышает допустимый при условии, что любое основное либо побочное излучения передатчика воздействуют по основным и побочны каналам приема любого приемника. Излучения передатчиков и восприимчивость приемников аппроксимируются специально сконструированными функциями. При конструировании апроксимирующих функций полагаем, что передатчик может создавать излучение на любой частоте и его побочные излучения (излучения на гармониках) являются непрерывными функциями частоты, уровень которых с достаточной для практики точностью аппроксимируется функцией вида [6 – 8]:

$$\begin{cases} P_i(f) = P_{0i} + A_i \lg \frac{f}{f_0} + B_i & \text{при } f > f_0; \\ P_i(f) = P_{0i} + A'_i \lg \frac{f}{f_0} + B'_i & \text{при } f < f_0. \end{cases} \quad (3)$$

где P_{0i} – уровень излучения передатчика на основной частоте; A_i, A'_i, B_i, B'_i – коэффициенты постоянные для каждого передатчика; A_i, A'_i – наклон прямой дБ/декада; B_i, B'_i – ордината начальной точки ограниченной линией аппроксимирующей излучения передатчика на гармониках.

Аппроксимирующая функция восприимчивости приемника вне полосы пропускания имеет вид [6 – 8]:

$$\begin{cases} P_j(f) = P_{0j} + L_j \lg \frac{f}{f_0} + M_j & \text{при } f > f_0; \\ P_j(f) = P_{0j} + L'_j \lg \frac{f}{f_0} + M'_j & \text{при } f < f_0, \end{cases} \quad (4)$$

где P_{0j} – чувствительность приемника на основной частоте; M_j и M'_j – коэффициенты превышения над порогом восприимчивости приемника на основной частоте; L_j и L'_j – наклон прямой дБ/декада.

Ориентировочные значения коэффициентов аппроксимирующих функций (3) и (4), полученных в результате обработки результатов измерения характеристик ЭМС радиосредств различного диапазона частот и назначения приведены в [6, 7].

Частотные и энергетические условия возникновения взаимных помех между радиосредствами комплекса определяются в соответствии с выражениями, приведенными в табл. 1.

В табл. 1 приняты следующие обозначения:

f_j, f_i – частоты настройки j -ого приемника и i -го передатчика;

ΔF_j – полоса частот соседнего канала j -го приемника, в которой нормируется ослабление (S_{kj}) этого вида помех;

f_{nkj} – частота побочного канала приема;

f_r – частота гетеродина;

P_{0i} – уровень излучения i -ого передатчика на основной частоте;

$P_j(\Delta f_{ij})$ – восприимчивость j -ого приемника на частоте i -ого передатчика при условии настройки его на частоту f_j ;

$\Delta F_{kj}, L_{kj} = \frac{\Delta F_{kj}}{f_0}$ – абсолютная и относительная расстройки приемника

ка относительно номинальной частоты, на которых нормируется его восприимчивость к помехам соответствующего вида;

$P_i(f)$ – уровень излучения i -го передатчика на входе j -го приемника;

$P_j(f)$ – уровень чувствительности приемника на частоте f_i ;

Частотные и энергетические условия наличия взаимных помех
в комплексе радиосвязи

Вид воздействия	Условия, при которых наблюдается воздействие помех на приемные устройства комплекса		Примечание
	частотные	энергетические	
Основное излучение передатчика по соседнему каналу приемника	$ f_i - f_j \leq \Delta F_j$	$P_i(f) \geq S_{скj} + P_j(f)$	
Основное излучение по побочному каналу приема	$f_i = f_{пкj} = \frac{\alpha}{m} f_j + \frac{B-n}{m} f_j \pm \frac{1}{2} \Delta F_{m_j}$	$P_{0i} > P_j(\Delta f_{ij})$	$\alpha, \beta, n = (0, 1, 2, \dots)$ $m = \pm 1$ β – число преобразований частоты j-го приемника; условия воздействия по ПЧ и ЗК приемника
	Выражения при нормировании заданного вида помех		
	$f_j + \Delta F_{1j} \leq f_j \leq L_{1j} \cdot f_j$	$P_j \geq P_{0j} - S_{kj}$	
	$L_{2j} f_j \leq f \neq \{f_{зк\beta j}\}$	$P_j \geq P_{0j} - S_{2j}$	
	$f_j = f_{зк\beta j}$	$P_j \geq P_{0j} - S_{3j}$	
Побочные излучения передатчиков по основным каналам приема А) шумовые излучения	$ f_i - f_j = \Delta f_{ij}$	$P_{0i} + K_i(\Delta f_{ij}) \geq P_{0j}$	
	Выражения при нормировании заданного вида помех		
	$f_i + \Delta F_{1i} \leq f_j \leq f_i + \Delta F_{2i}$	$P_i = P_{0i} - S_{4i}$	
	$f_i + \Delta F_{3i} \leq f_j \leq f_i \cdot L_{1i}$	$P_i = P_{0i} - S_{5i}$	
	$L_{2i} \cdot f_i \leq f_j \neq n f_i$	$P_i = P_{0i} - S_{6i}$	
	$f_i + \Delta F_{1i} \leq f_j \leq f_i + \Delta F_{2i}$	$P_i = P_{0i} - S_{4i}$	
	$f_i + \Delta F_{3i} \leq f_j \leq f_i \cdot L_{1i}$	$P_i = P_{0i} - S_{5i}$	
	$L_{2i} \cdot f_i \leq f_i \neq n f_i$	$P_i = P_{0i} - S_{6i}$	
Б) гармоники передатчика	$n f_{0i} = f_j \pm 1/2 \cdot \Delta F_{пчj}$	$P_i(f) \geq P_{0j}$	$n = 2, 3 \dots$ если
В) интермодуляционные излучения передатчиков	$f_{им} = f_{0j} \pm 1/2 \cdot \Delta F_{пчj}$	$\sum_{i=1}^3 (P_{0i} - S_j) - K_j \geq P_{0i}$	$ f_i - f_j = \Delta F_j$, то $S_{kj} = 0$

ΔF_{ki} , L_{ki} – абсолютная и относительная расстройки передатчика относительно номинальной частоты, на которых нормируется уровень ослабления соответствующих излучений выходными каскадами передатчика (S_{ki});

$f_{зк\beta j}$ – значение номинала зеркального канала от β -го преобразования частоты j -го приемника;

$K_i(\Delta f_{ij})$ – уровень ослабления шумовых излучений относительно несущей при отстройке от нее на Δf_{ij} .

Анализ известных процедур и методов поиска позволяет сделать вывод о том, что наиболее оптимальным из них, позволяющим выявить самые наихудшие по условиям ЭМС варианты частот является метод перебора. Существенным недостатком этого метода являются большие временные затраты. Поэтому данный метод может использоваться лишь на этапе проектирования комплекса, когда не требуется решение задачи в реальном масштабе времени.

Расчет вариантов пораженных частот осуществляется в соответствии с обобщенным алгоритмом, структурная схема которого приведена на рис. 1.

В результате расчета по данному алгоритму получаем наихудшие по условиям ЭМС варианты частот. Это осуществляется путем последовательного перебора всех возможных вариантов рабочих частот радиосредств комплекса.

Рассмотрим кратко назначение и работу каждого из блоков алгоритма, представленного на рис. 1.

В соответствии со структурной схемой блок 1 осуществляет ввод исходных данных:

- диапазон рабочих частот радиосредств ($f_{\text{mini}(j)}$, $f_{\text{maxi}(j)}$);
- шаг сетки частот радиосредств ($\Delta f_{\text{ci}(j)}$);
- число приемников (M) и передатчиков (приемопередатчиков) (N);
- ширина необходимой полосы B_n передатчика и полосы пропускания основного тракта приемника $\Delta F_{\text{пр}}$, определяемые видом модуляции;
- чувствительности приемников (P_{0j});
- относительные $L_{ki(j)}$ и абсолютные расстройки по частоте относительно основных частот приемников и передатчиков ($\Delta F_{ki(j)}$), в пределах которых нормируется ослабление побочных излучений (S_{kj}) и внеполосных каналов приема (S_{ki});
- минимально необходимый частотный разнос между радиосредствами комплекса ($\Delta f_{ij\text{min}}$);

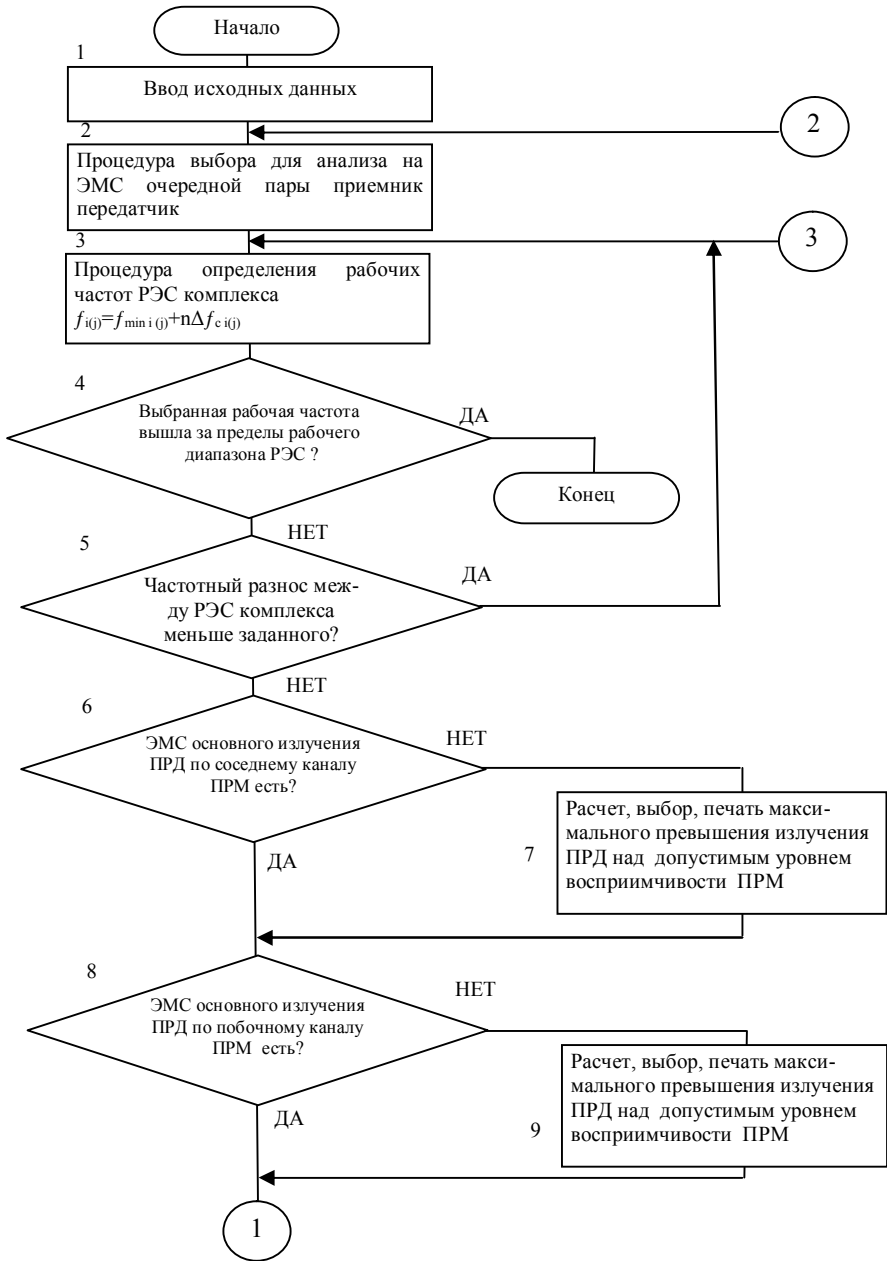


Рис. 1. Структурная схема алгоритма расчета “М” наихудших вариантов частот

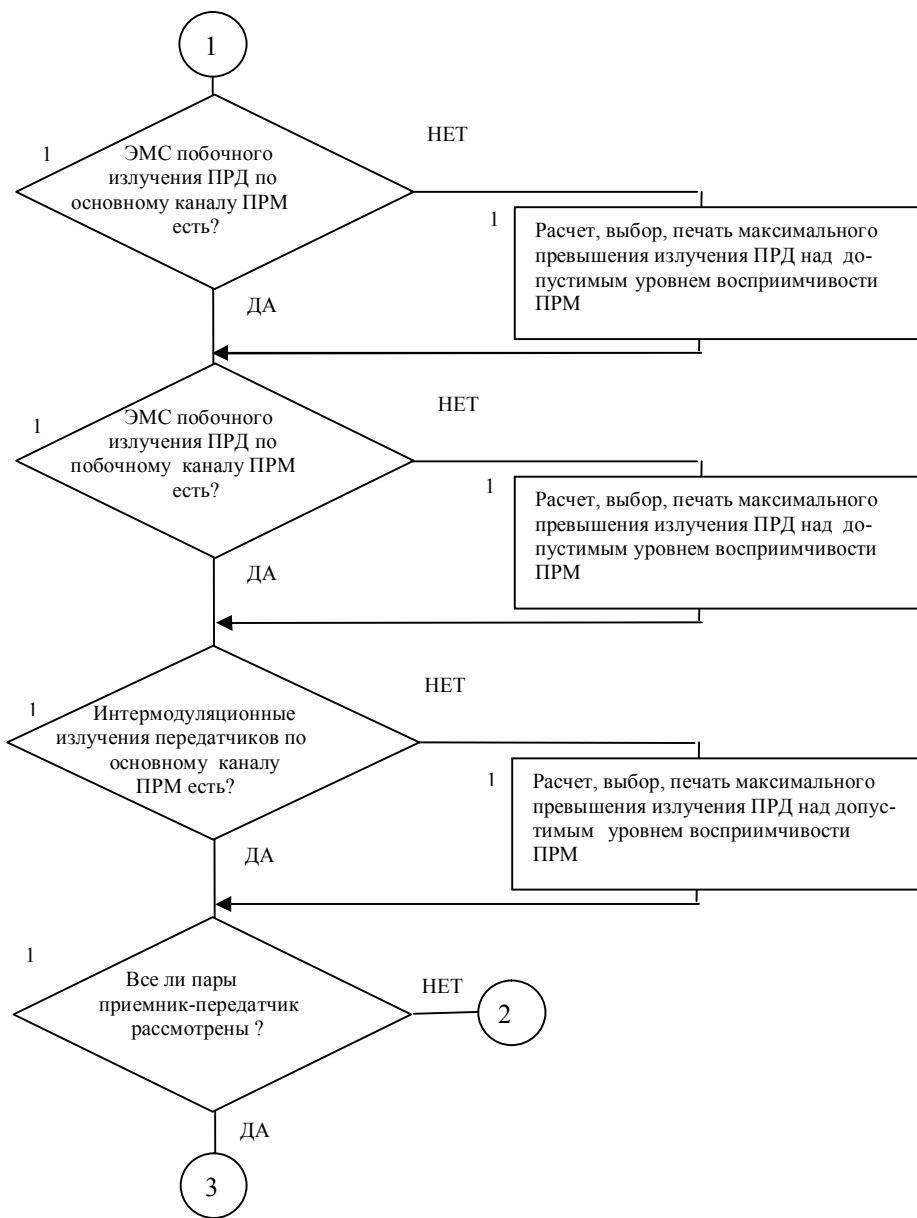


Рис. 1. Структурная схема алгоритма расчета “М”
наихудших вариантов частот (окончание)

- чувствительности приемников (P_{0j}) на основной частоте;
- мощности излучения передатчиков (P_{0i}) на основной частоте.

Далее производится выбор для анализа ЭМС очередной пары “приемник-передатчик” комплекса (блок 2) и вычисление номиналов рабочих частот радиосредств комплекса (блок 3). В начальный момент всем РС присваивается значение частоты, соответствующее минимальной частоте их рабочего диапазона. В дальнейшем значение частоты увеличивается в соответствии с правилом: $f_{i(j)} = f_{\text{mini}(j)} + n\Delta f_{\text{ci}(j)}$, где $n = 0, 1, 2 \dots$ до тех пор, пока назначенная частота находится в диапазоне радиосредства. В блоке 4 проверяется условие нахождения назначенной частоты в пределах рабочего диапазона частот радиосредства. В противном случае расчет заканчивается. В блоке 5 проверяется условие наличия между рабочими частотами радиосредств комплекса минимально необходимого частотного разнесения и производится выбор нового значения частоты передатчика, для которого не выполняется условие $|f_i - f_j| \geq \Delta f_{ij\text{min}}$.

В блоках 6, 8, 10, 12, 14 осуществляется проверка выполнения частотных и энергетических условий. Далее производится расчет превышения помехой от передатчика допустимого порогового уровня восприимчивости приемника, запоминание максимального из вычисленных значений для каждого из приемников. (Блоки 7, 9, 11, 13, 15). Блок 16 устанавливает, все ли пары частот приемник-передатчик просмотрены и если нет, то управление передается в блок 2. Если просмотрены все пары частот приемник-передатчик, то шаг сетки частот для приемника увеличивается на единицу ($n = n + 1$) и описанная выше процедура повторяется вновь.

Для уменьшения вычислительных затрат и в соответствии с рекомендациями [9 – 11] при разработке алгоритма введены следующие ограничения и допущения:

- при анализе ЭМС не учитываются воздействия основных излучений передатчиков по основным каналам приема приемников;
- при выборе рабочих частот вводится требование выполнения необходимого частотного разнесения между работающими РС комплекса;
- при учете интермодуляционных помех рассматриваются как наиболее опасные интермодуляционные излучения передатчиков не выше 3-го порядка;
- для анализа совместности РС комплекса используются аппроксимированные характеристики излучений передатчиков и приемников. Для аппроксимации используются численные значения, взятые из нормативных документов определяющих ЭМС радиосредств.

В комплексах радиосвязи наихудшими по условиям ЭМС будут варианты частот, для которых уровни интермодуляционных составляющих имеют максимально возможные значения [11, 12]. Наихудшими, с точки

зрения ЭМС, следует считать частоты, соответствующие минимально необходимому разному между рабочими частотами радиосредств, на которых отношение $\Delta f_{ij}/f_0 = \min$ т.е. частоты, на которых пороговая восприимчивость приемника к воздействующим на него взаимным помехам будет наименьшей [6].

Разработанный алгоритм целесообразно использовать на этапе проектирования комплекса. Алгоритм позволяет определить частоты радиосредств комплекса с максимально возможным уровнем взаимных помех между его радиосредствами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воронин А.А. Оценка параметров ЭМС при выборе оборудования и проектировании сетей связи // *Технология и средства связи*. – 1998. – № 3. – С. 24 – 27.
2. Баринов А.А. Метод частотного анализа электромагнитной совместимости радиосредств системы связи по помехам интермодуляции // *Техника средств связи*. – 1990. – № 8. – С. 35 – 39.
3. Быховский М.А. Частотное планирование сотовых сетей подвижной радиосвязи // *Электросвязь*. – 1993. – № 8. – С. 30 – 32.
4. Воронин А.А. Обеспечение электромагнитной совместимости на этапе эксплуатации // *Технология и средства связи*. – 1998. – № 5. – С. 70.
5. Радиочастотный ресурс комплекса РЭС связи и ИМ излучения передатчиков / К.И. Насыров, А.М. Поляков, А.Ф. Проскурня и др. // *Техника средств связи*. – 1989. – № 1. – С. 96 – 100.
6. Бабанов Ю.Н., Силин А.В. *Электромагнитная совместимость радиоэлектронных систем*. – Горький: ГТУ им. Н.И.Лобачевского, 1976. – 86 с.
7. *Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи. Вып.1. Общие вопросы ЭМС. Межсистемные помехи / Составитель Д.Р.Ж. Уайт. Пер. с англ.* – М.: Сов. радио, 1977. – 350 с.
8. Князев А.Д. *Элементы теории и практики обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств*. – М.: Радио и связь, 1984. – 336 с.
9. Иванов В.А., Ильницкий Л.Я., Фузик М.И. *Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств*. – К.: Техника, 1983. – 120 с.
10. *Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и систем / Под ред. Н.М. Царькова*. – М.: Радио и связь, 1985. – 272 с.
11. Круглов В.П., Силин А.В. *Задача об оптимальном выборе рабочих частот группы взаимодействующих радиолиний // Техника средств связи. Серия Техника радиосвязи*. – 1978. – № 9. – С. 36 – 43.
12. Круглов В.П. *Организационные меры обеспечения независимой работы радиосредств комплексов связи // Специальная радиоэлектроника*. – 1974. – № 2 – 3. – С. 30 – 3.

Поступила 25.03.2005

Рецензент: доктор технических наук, профессор Ю.В. Стасев,
Харьковский университет Воздушных Сил.