

УДК 621.396.67

**А.В. ФЕДИН**

*Полтавский военный институт связи, Украина*

## **МЕТОДИКА СИНТЕЗА ОПТИМАЛЬНОГО ПО КРИТЕРИЮ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ТРАКТА СОСРЕДОТОЧЕННОГО ПОДВИЖНОГО КОМПЛЕКСА РАДИОСВЯЗИ**

В статье рассмотрена методика синтеза оптимального по критерию электромагнитной совместимости высокочастотного тракта сосредоточенного подвижного комплекса радиосвязи. Приведены результаты расчетов структур высокочастотных трактов подвижных комплексов радиосвязи для разных поколений радиосредств.

**электромагнитная совместимость, высокочастотный тракт, частотно-разделительная система**

### **Введение**

**Постановка проблемы.** Совместное размещение в сосредоточенном комплексе значительного числа радиосредств (от 4 до 8), одновременно работающих на ограниченное число антенн комплекса, приводит к необходимости решения проблемы электромагнитной совместимости (ЭМС) в нем.

**Анализ литературы** [1 – 5] показывает, что проблема ЭМС в таких комплексах, в большинстве случаев, решается проведением организационных мероприятий, заключающихся в оптимальном назначении частот для радиосредств (РС) комплекса. Одним из направлений решения данной проблемы является оптимальное построение их высокочастотных (ВЧ) трактов. Под ВЧ трактом комплекса будем понимать элементы частотно-разделительных систем (ЧРС), между входами и выходами РС комплекса при их совместной работе на ограниченное число антенн.

**Целью работы** является разработка методики синтеза оптимального по критерию электромагнитной совместимости ВЧ тракта сосредоточенного подвижного комплекса радиосвязи.

### **Основная часть**

Методика предназначена для аналитического определения требований к частотно-разделительным

системам высокочастотных трактов подвижных комплексов радиосвязи на этапе их разработки.

Для проведения расчетов по предлагаемой методике необходимы следующие исходные данные:

1) количество РС, порядок их использования, возможные структуры ВЧ трактов комплексов и степень их автоматизации;

2) характеристики РС (режимы работы, виды работы, диапазон и шаг сетки частот, характеристики ЭМС РС – уровень шумовых, побочных, внеполосных, гармонических, субгармонических и комбинационных излучений передатчиков; одно-сигнальная и многосигнальная избирательность приемников);

3) количество антенн, используемых в комплексе, их типы и характеристики;

4) характеристики потоков информации, обслуживаемых РС комплекса.

При проведении расчетов приняты следующие ограничения и допущения:

1) РС комплекса работают в составе абонентских групп;

2) на абонентскую группу выделяется  $Q$  частот, каждая из которых может быть использована любым абонентом группы для передачи сообщения;

3) считаем, что требования, поступающие на РС комплекса, подчиняются пуассоновскому закону;

4) время пребывания сообщения в системе связи не превышает допустимое;

5) достоверность передаваемых сообщений не хуже заданной;

6) рассматривается конечное число возможных структур ВЧ тракта комплекса;

7) при синтезе учитываются наихудшие по условиям ЭМС варианты частот, используемых РС [6];

8) учитываются взаимные помехи, возникающие между РС комплекса, а также преднамеренные помехи.

Методика представляет собой ряд последовательных процедур.

1. Определение наихудшего по условиям ЭМС варианта рабочих частот для РС комплекса [6].

2. Определение минимально-необходимых коэффициентов развязки между элементами ВЧ тракта из условия минимизации уровня взаимных помех между его РС.

3. Анализ и оптимальное распределение полученных на 2-м этапе коэффициентов развязки между элементами ВЧ тракта и оценка возможности их технической реализуемости [7].

4. Расчет вероятности своевременности обслуживания заданного потока сообщений с требуемым качеством РС комплекса. Оценка на основе проведенного расчета степени соответствия комплекса своему целевому назначению.

Рассмотрим математическое описание процедуры синтеза ВЧ тракта комплекса.

Условие ЭМС, в общем, виде, между любой парой РС комплекса можно записать в виде [3]:

$$IM(f, d, p) = \Psi_i(f_i) + G_i(f_i, t, p_{ij}) + G_j(f_j, t, p_{ij}) - \varphi_j(f_j) - L(\Delta f_{ij}, t, d_{ij}, p_{ij}) + CF(\Pi_j, \Pi_i, \Delta f_{ij}) < 0, \quad (1)$$

где  $IM(f, t, d, p)$  – превышение уровня взаимных помех над порогом чувствительности приемника;  $f$  – частота (МГц);  $t$  – время (с);  $d$  – расстояние между антеннами в (м);  $p$  – разнесение передающей и приемной антенн по поляризации;  $\Psi_i(f_i)$  – мощность  $i$ -го передатчика, создающего помехи на  $i$ -й рабочей

частоте (дБ);  $G_i, G_j$  – коэффициенты усиления передающей и приемной антенн комплекса;  $\varphi_j(f_j)$  – порог восприимчивости приемника на частоте  $f_j$ ;  $L(\Delta f_{ij}, t, d_{ij}, p_{ij})$  – потери на трассе распространения радиоволн;  $\Delta f_{ij} = f_i - f_j$  – расстройка по частоте между рассматриваемыми передатчиком и приемником комплекса;  $CF(\Pi_i, \Pi_j, \Delta f_{ij})$  – поправка, зависящая от ширины необходимой полосы излучения передатчика  $\Pi_i$ , ширины полосы основного канала приема приемника  $\Pi_j$ .

Для сосредоточенного подвижного комплекса радиосвязи в общем виде условие ЭМС любой пары РС в соответствии с (1) представим в виде:

$$IM(\Delta f_{ij}, t_{ij}, P_{ij}) = \Psi_i(f_i) + CF(\Pi_i, \Pi_j, \Delta f_{ij}) - \varphi_j(f_j) - B_a - B_{сфсij}, \quad (2)$$

где  $B_a$  – развязка между приемной и передающей антеннами комплекса (дБ) за счет их пространственного разнесения (причем  $B_a \neq 0$  при работе двух РС на различные антенны);  $B_{сфсij}$  – развязка между согласующе-фильтрующими элементами ВЧ тракта комплекса.

Значение величины  $B_{сфсij}$  зависит от вида структуры и варианта построения ВЧ тракта сосредоточенного подвижного комплекса радиосвязи и может быть определено в соответствии с выражением

$$B_{сфсij} = B_{вчпрj} + B_{разв.устр.ij} + B_{вчпрj}, \quad (3)$$

где  $B_{вчпрj}$  и  $B_{вчпрj}$  – затухания (развязки), обеспечиваемые за счет избирательности элементов ВЧ тракта, соответственно, передающей и приемной части сосредоточенного подвижного комплекса;  $B_{разв.устр.ij}$  – затухание (развязка), обеспечиваемое частотно-развязывающими устройствами ВЧ тракта комплекса.

Для проведения расчетов коэффициентов развязки между РС сосредоточенного подвижного комплекса радиосвязи необходимо знать характеристики ЭМС этих РС и их изменение в диапазоне частот. Для этого производится аппроксимация характеристик излучения передатчиков и чувствительности приемников в широком диапазоне частот в соответ-

ствии с аппроксимирующими функциями, приведенными в [3].

Для сосредоточенных подвижных комплексов радиосвязи основным видом помех, при условии качественного проведения выбора и назначения рабочих частот РС комплекса являются шумовые излучения передатчиков и интермодуляционные помехи [3].

Учитывая эти два вида помех, аналитическое выражение порога восприимчивости приемника можно записать в виде [3]:

$$\varphi_j(\Delta f_{ij}) = \frac{D_j^2}{k_j^2(f)} \times \sqrt[3]{\frac{2}{3} \cdot \left(\frac{\Delta f_{npj}}{\Delta f_\Sigma}\right)^2 \cdot P_{npj}^2 \cdot \left(\frac{P_{cj}}{F_j} - P_{швхj}\right)}, \quad (4)$$

где  $D_j$  – динамический диапазон приемника по интермодуляции третьего порядка;  $k_j(f)$  – нормированный коэффициент передачи входной цепи по напряжению;  $P_{npj}$  и  $\Delta f_{npj}$  – чувствительность и полоса пропускания приемника по основной промежуточной частоте;  $P_{cj}$  – заданный уровень полезного сигнала на входе, обеспечивающий на выходе приемника требуемое напряжение;  $F_j$  – допустимое отношение сигнал/помеха для условий неискаженного приема;  $P_{швхj}$  – мощность шумов на входе приемника;  $\Delta f_\Sigma$  – суммарная полоса частот основных излучений передатчиков комплекса, которая определяется по формуле:

$$\Delta f_\Sigma = \sum_{i=1}^N \Delta f_{неpi}, \quad (5)$$

где  $\Delta f_{неpi}$  – полоса частот основного излучения  $i$ -го передатчика;  $N$  – количество передатчиков комплекса.

Выражение (4) определяет допустимый уровень мощности узкополосной помехи, сосредоточенной в окрестности частоты  $f_j$  в полосе  $\Delta f_{np}$  за пределами основного канала приема.

Величина  $P_{швх}$  в (4) определяется мощностью шумов излучений, попадающих в основной канал

приемника, уровнем стационарного фона и шумов атмосферы  $P_{швн}$  и собственными шумами приемника.

С учетом (5) условие ЭМС  $j$ -го приемника с  $i$ -м передатчиком сосредоточенного подвижного комплекса радиосвязи можно записать в виде

$$\varphi_j(\Delta f_{ij}) \geq \sum_{i=1}^N Q_{ij} \cdot \frac{1}{R_{ij}} \cdot \psi_i(\Delta f_{ij}), \quad (6)$$

где  $i = \overline{1, N}$ ;  $j = \overline{1, M}$ ;  $M$  – количество приемников в комплексе;  $R_{ij}$  – величина развязки между  $i$ -м передатчиком и  $j$ -м приемником комплекса;  $Q_{ij}$  – отношение полосы пропускания  $j$ -го приемника к полосе излучения  $i$ -го передатчика:

$$Q_{ij} = \frac{\Delta f_{npj}}{\Delta f_{неpi}}. \quad (7)$$

В правой части каждого  $j$ -го неравенства (6) записано распределение по частоте суммарной мощности, создаваемой передатчиками комплекса. Таким образом, уровень шумов на входе  $j$ -го приемника определяется выражением:

$$P_{швхj} = P_{0j} + P_{швнj} + \sum_{i=1}^N \frac{1}{R_{ij}} \cdot Q_{ij} \cdot \psi_i(\Delta f_{ij}), \quad (8)$$

где  $P_{0j}$  – чувствительность  $j$ -го приемника на рабочей частоте;  $P_{швнj}$  – мощность шумов атмосферы на входе  $j$ -го приемника.

Подставляя в (6) выражение (4), получаем:

$$\frac{1}{R_{ij}} Q_{ij} \psi_i(0) \leq \frac{D_j^2}{K_j^2(\Delta f_{ij})} \times \sqrt[3]{\frac{2}{3} \cdot \left(\frac{\Delta f_{npj}}{\Delta f_\Sigma}\right)^2 \cdot P_{npj}^2 \cdot \left(\frac{P_{cj}}{F_j} - P_{швхj}\right)}, \quad (9)$$

где  $\psi_i(0)$  – мощность  $i$ -го передатчика на рабочей частоте.

Система неравенств (9) устанавливает необходимые количественные соотношения между основными параметрами РС, определяющие условия ЭМС в комплексе.

Совокупность значений  $R_{ij}$  можно найти, используя целевую функцию вида:

$$F = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \frac{1}{R_{ij}} \rightarrow \min. \quad (10)$$

Задача (10) представляет собой задачу линейного программирования, которая имеет единственное решение и решается известными из литературы [8, 9] методами.

Используя структуры ВЧ тракта, синтезированные ранее, осуществляется распределение полученных коэффициентов развязки по элементам структуры ВЧ тракта.

Оптимальным с позиции ЭМС будет ВЧ тракт, обеспечивающий максимум коэффициента использования диапазона частот, выделенного комплексу:

$$K_F = \frac{\sum_{v=1}^N \Delta W_{\text{ППВ}}}{\Delta W_F} = \max \quad (11)$$

при ограничениях:

$$\sum_{v=1}^{N-1} n_v \leq n_{\min}, \quad (12)$$

$$P(\bar{T}_{cc} \leq t_{\text{дон}}; Q \geq Q_{\text{мп}}) \geq P_{\text{дон}}, \quad (13)$$

$$\sum_{v=1}^N \Delta W_{\text{ППВ}} \leq \Delta W_F, \quad (14)$$

где  $\Delta W_{\text{ППВ}}$  – полоса пропускания  $v$ -го канала ЧРС;  $\Delta W_F$  – полоса частот, выделенная комплексу;  $v$  – число каналов ЧРС ( $v = 1, 2, \dots, (N-1)$ );  $N$  – число радиосредств в комплексе, работающих на общую антенно-фидерную систему;  $n_v$  – число реактивных элементов в составе  $v$ -го канала ЧРС;  $n_{\min}$  – минимальное число элементов в составе ЧРС;  $\bar{T}_{cc}$  – среднее время нахождения сообщения в комплексе радиосвязи;  $t_{\text{дон}}$  – допустимое время нахождения сообщения в комплексе радиосвязи;  $Q, Q_{\text{мп}}$  – обеспечиваемое и требуемое качество обслуживания сообщения комплексом радиосвязи;  $P_{\text{дон}}$  – допустимая (требуемая) вероятность своевременного обслуживания сообщения комплексом радиосвязи.

Ограничение (12) определяет минимальное число реактивных элементов в составе ЧРС комплекса. Ограничение (13) определяет степень соответствия

комплекса своему целевому предназначению. Ограничение (14) связано со структурой ВЧ тракта комплекса и ограничивает суммарную полосу пропускания ЧРС ВЧ тракта комплекса диапазоном частот, выделенного радиосредствам комплекса.

В соответствии с приведенным критерием и выражением (10) осуществляется расчет параметров ЧРС ВЧ тракта и оценивается возможность технической реализации рассчитанных элементов ЧРС. При невозможности их технической реализации для анализа и расчета выбирается очередная структура ВЧ тракта или проводятся организационные мероприятия связанные, например, с увеличением величины частотного разнесения между РС комплекса и расчеты повторяются снова.

Синтез завершается проведением моделирования функционирования комплекса с целью расчета вероятности своевременной передачи сообщения с заданным качеством [10, 11].

По предложенной методике проведен расчет структур ВЧ тракта подвижного комплекса радиосвязи для разных поколений РС. Структуры представлены на рис. 1.

В результате расчетов получены значения коэффициентов использования диапазона частот комплекса и число реактивных элементов в составе ЧРС ВЧ тракта комплекса, которые приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчетов структур ВЧ трактов для РС третьего и четвертого поколений

Показатель	Структура № 1 (рис. 1, а)	Структура № 2 (рис. 1, б)
Коэффициент использования диапазона частот ( $K_F$ )	0,89	0,56
Число реактивных элементов в составе ЧРС ВЧ тракта комплекса ( $n_{\Sigma}$ )	96	181

Рассмотренные структуры построения ЧРС ВЧ тракта предусматривают комплектование комплекса типовыми РС.

Наиболее перспективным направлением создания единого унифицированного комплекса военного назначения является переход к модульному принципу построения такого комплекса. Данный принцип предусматривает использование приемо-

возбудителей, работающих в диапазоне 30-120 МГц, или специализированных устройств, позволяющих, за счет программного обеспечения, формировать аналоговые и цифровые сигналы с современными видами модуляции.

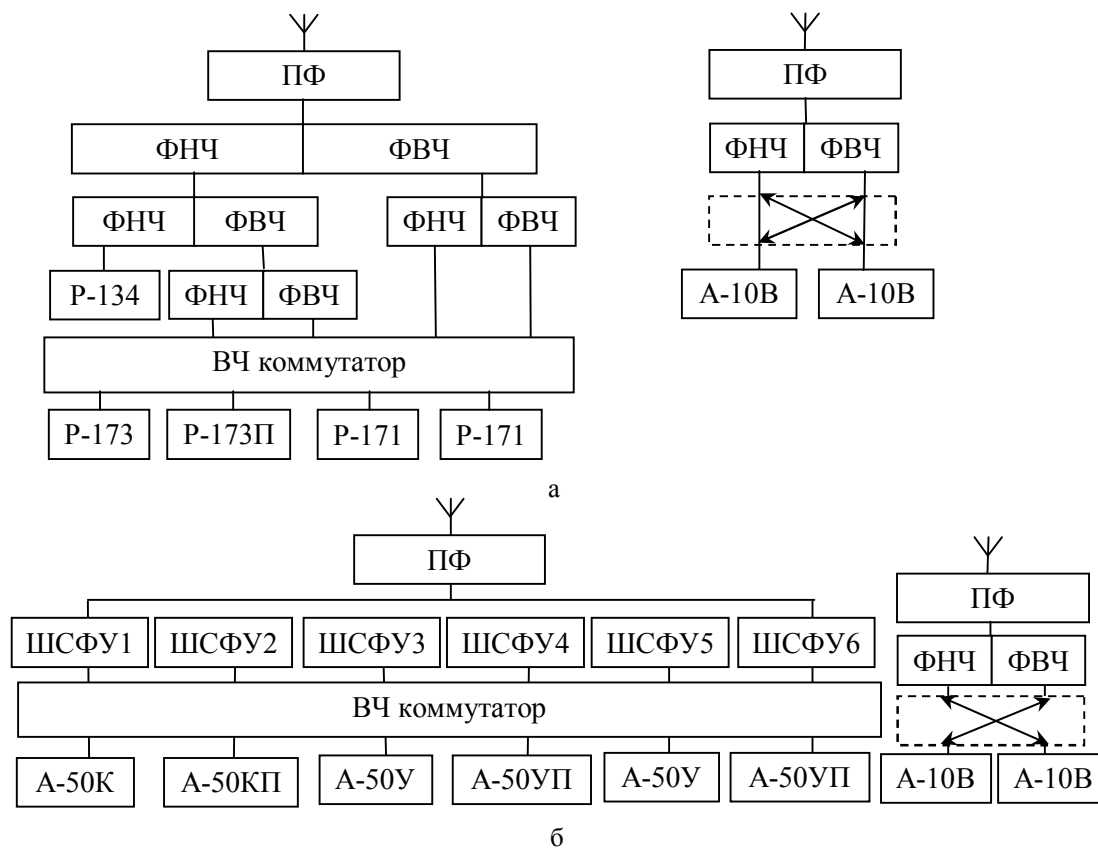


Рис. 1. Структуры ЧРС ВЧ трактов подвижных комплексов радиосвязи на базе РС третьего и четвертого поколений:

ПФ – полосовой фильтр;

ФНЧ – фильтр нижних частот;

ФВЧ – фильтр верхних частот;

ШСФУ – широкополосное согласующее - фильтрующее устройство

Такой подход позволит за счет модульного принципа построения усилительного тракта комплекса наряду с адаптацией по частоте обеспечить адаптивное управление мощностью и создать для любой радиосвязи, обеспечиваемой комплексом, максимальное использование его мощностного ресурса. Это позволит использовать декаметровый диапазон радиосвязи, выделенный комплексу, в качестве резервного.

В качестве антенных систем комплекса целесообразно использовать цифровую антенную решетку

(ЦАР), цифровой принцип диаграммообразования. Это позволит дополнительно повысить дальность, помехозащищенность и разведзащищенность радиосвязи. Целесообразно в составе комплекса иметь две ЦАР. Одну для работы на стоянке, а вторую вмонтированную в кузов автомобиля для работы в движении и на стоянке.

В качестве резервной антенны в декаметровом диапазоне волн целесообразно использовать типовую антенну зенитного излучения существующих комплексов.

Для решения проблемы ЭМС комплекса необходимо наряду с оптимизацией ВЧ тракта использовать систему адаптивного подавления взаимных помех между его модулями.

Анализ теории усиления модулированных сигналов показывает, что даже при использовании цифровых сигналов возникает необходимость фильтрации нежелательных излучений на выходе усилителя мощности и его согласования с антенной, а, следовательно, и необходимость применения согласующе-фильтрующих устройств в составе ВЧ тракта комплекса радиосвязи. Поэтому предлагаемая методика является актуальной для любого принципа построения ВЧ тракта комплекса.

### Выводы

Методика синтеза оптимального по критерию электромагнитной совместимости высокочастотного тракта сосредоточенного подвижного комплекса радиосвязи позволяет:

1) с единых системных позиций рассмотреть и рассчитать любой сосредоточенный подвижный комплекс радиосвязи независимо от его целевого назначения;

2) при проектировании ВЧ тракта сосредоточенного комплекса радиосвязи учесть взаимное влияние между радиосредствами комплекса и предъявить технически реализуемые требования, как к элементам его структуры, так и к самим параметрам радиосредств, определяющих виды помех (взаимных помех).

### Литература

1. Голяницкий И.А., Годунов В.И., Седлецкий Р.М. и др. Электромагнитная совместимость радиосистем. – М.: МАИ, 1997. – 72 с.
2. Основы обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств / В.Р. Вахлаков и др.: Под ред. Б.В. Сосунова. – С.-Пб., 1991. – 322 с.

3. Князев А.Д. Элементы теории и практики обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств – М.: Радио и связь, 1984. – 336 с.

4. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств / Под ред. Н.М. Царькова – М.: Радио и связь, 1985. – 272 с.

5. Радиосистемы передачи информации: Учеб. пособие для вузов / В.А. Васин, В.В. Калмыков и др.: Под ред. И.Б. Федорова – М.: Горячая линия - Телеком, 2005. – 472 с.

6. Федин А.В., Коломиец А.С. Алгоритм поиска наихудшего, из условий электромагнитной совместимости, варианта частот для радиосредств сосредоточенного комплекса радиосвязи // Системы обработки информации. – Х.: ХУ ПС. – 2005. – Вып. 4 (44). – С. 156-164.

7. Федин А.В., Ивасюк А.О. Алгоритм распределения избирательности между элементами высокочастотного тракта подвижного комплекса радиосвязи // 2-й международный форум “Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития” МРФ-2005. Сборник научных трудов. Том. VI. Международная конференция “Электромагнитная совместимость и живучесть”. – Х.: АНПРЭ, ХНУРЭ. – 2005. – С. 13-16.

8. Батишев Д.И. Методы оптимального проектирования. – М.: Радио и связь, 1984. – 248 с.

9. Петров А.В., Яковлев А.А. Анализ и синтез радиотехнических комплексов / Под ред. В.Е. Дубевича – М.: Радио и связь, 1984. – 248 с.

10. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. – М.: Наука, 1978. – 399 с.

11. Голяницкий И.А. Математические модели и методы в радиосвязи / Под ред. Ю.А. Громакова. – М.: Эко - трендз. 2005. – 440 с.

*Поступила в редакцию 14.03.2006*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Н.В. Галай, Полтавский государственный технический университет, Полтава.