

РАДИОТЕХНИКА



О.М. Булгаков,
доктор технических наук, профессор



В.П. Удалов,
кандидат физико-математических наук,
доцент

АНАЛИЗ МОДЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ОХРАННО-ПОЖАРНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ

THE ANALYSIS OF THE SECURITY-FIRE ALARM SYSTEM RELIABILITY MODEL

Рассмотрена структура декомпозиционной модели системы охранно-пожарной сигнализации. Найдена вероятность безотказной работы системы при наличии детерминированных и случайных интенсивностей отказов составляющих элементов. Показана взаимосвязь стохастических и детерминированных подходов к построению и анализу надежности моделей систем охранно-пожарной сигнализации.

The structure of the de-compositional model of the security-fire alarm system is considered. The probability of the system reliable operation in the presence of the deterministic and random failure rates of the constituent elements is obtained. The association of the random and deterministic approach to the construction and analysis of the reliability of the models of the security-fire alarm systems is indicated.

В связи с тем что система охранно-пожарной сигнализации (ОПС) за последние 10 лет претерпела серьезные изменения, в частности существенно выросло количество компонентов системы, усложнились используемые каналы связи и др., актуальной становится проблема усовершенствования используемых моделей надежности ОПС.

Для анализа надежности функционирования комплексной системы охранно-пожарной сигнализации рассмотрим широко используемую систему ПРИТОК, которая

охватывает все возможные виды охраны и сигнализации объектов различного назначения (рис. 1).

Структура системы является достаточно сложной, разветвленной, состоящей из большого количества устройств и каналов связи, причем возможно их использование в различных сочетаниях. Предусмотрена возможность наращивания аппаратуры и подключения новых устройств.

Можно выделить следующие основные подсистемы, входящие в состав системы ПРИТОК, обладающие полной интеграцией:

Централизованная охрана по телефонным каналам.

Радиоохрана.

Охрана по каналам GSM.

Контроля доступа.

Видеонаблюдение.

Мониторинг подвижных объектов ГЛОНАСС/GPS.

Регистрация телефонных и радиопереговоров.

На рис. 1 приведена схема взаимодействия указанных подсистем с указанием каналов обмена информацией между ними. Подключение устройств можно представить в виде последовательно-параллельной схемы, объединяющей устройства и каналы связи. Анализ надежности функционирования системы в целом является достаточно объемной задачей, причем схема функционирования будет отличаться в каждом конкретном случае. Одним из вариантов решения задачи анализа надежности является создание декомпозиционной модели системы охраны, представляющей собой объединение отдельных элементарных частей в более крупные блоки для упрощения анализа.

Рассмотрим в качестве примера функционирование пульта централизованной охраны (ПЦО), являющегося частью системы охраны, оборудованного пультом централизованного наблюдения (ПЦН), который расположен в отдельном помещении, состоит из нескольких рабочих мест дежурных ПЦН, объединенных локальной сетью ПЦО и связан с другими устройствами системы сетью с протоколом обмена данных ТСР/IP (рис. 1).

Вероятность безотказной работы блока ПЦО может быть записана на основе схемы для подключенных последовательно и параллельно элементов. Объединение элементов блока ПЦО, соединенных с локальной сетью ПЦН, можно представить в виде схемы с m -кратным резервированием, представленной на рис. 2. В данной схеме можно выделить m соединенных параллельно модулей, состоящих из n элементов каждый.

Структурная схема ПЦН (рис. 1) может быть представлена в виде последовательно-параллельной структуры (рис. 2).

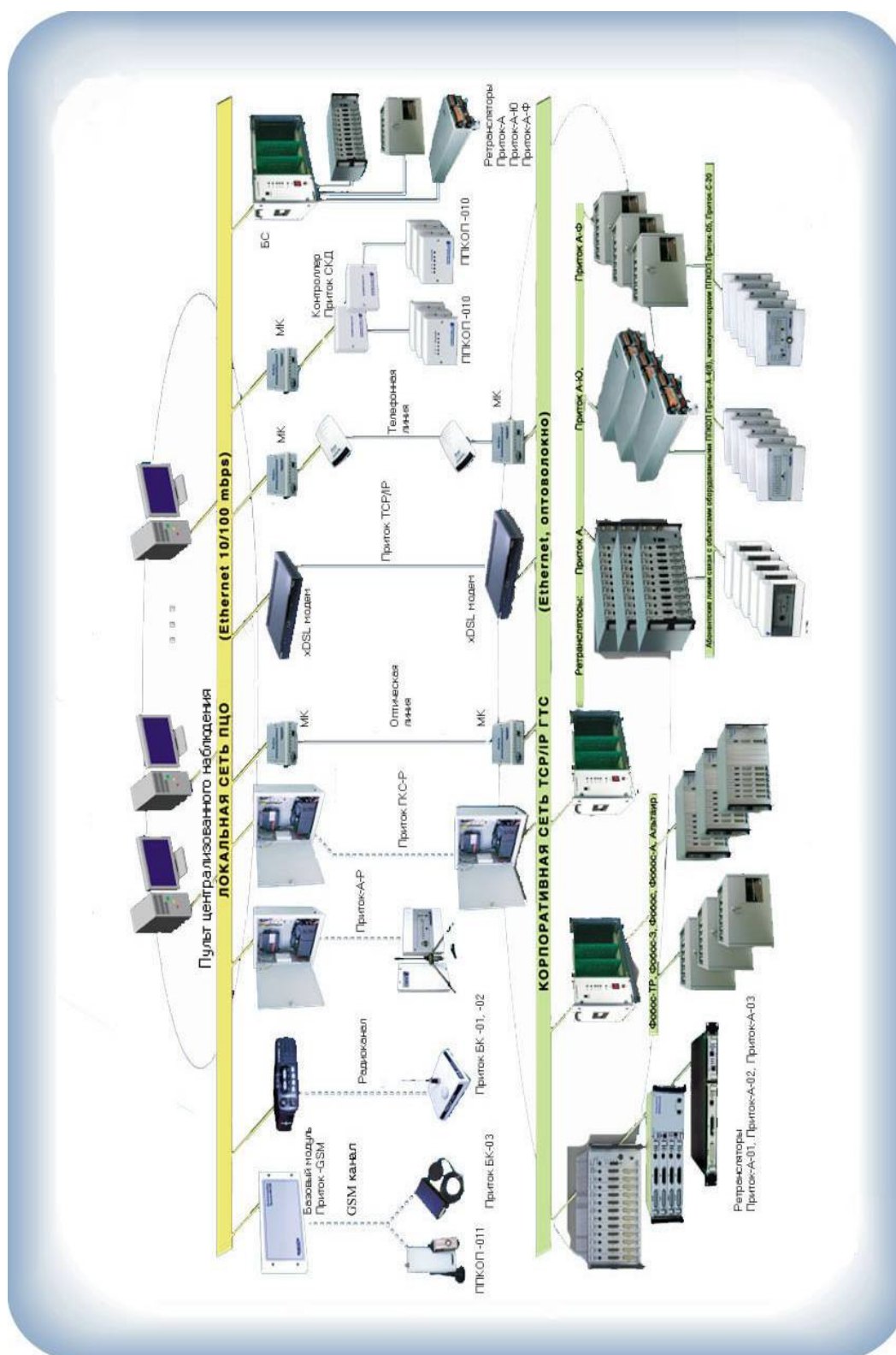


Рис. 1. Система охранно-пожарной сигнализации ПРИТОК

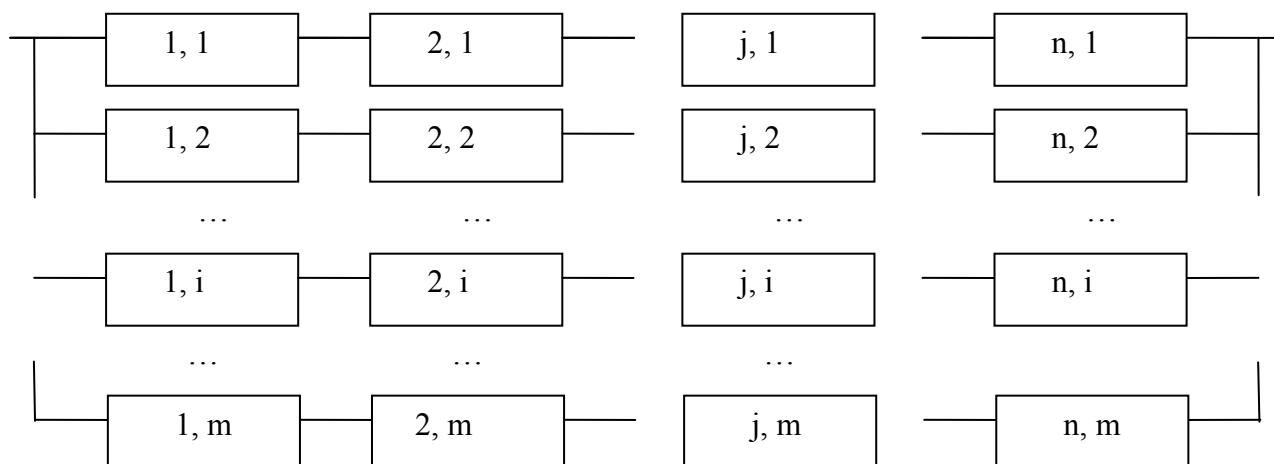


Рис. 2

Из анализа рис. 2 следует, что блок ПЦО состоит из m параллельно соединенных модулей и может быть изображен в более компактном виде (рис. 3) [1, 3].

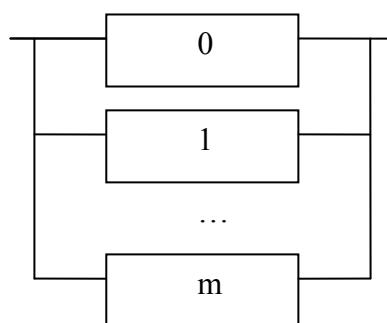


Рис. 3

Вероятность безотказной работы блока ПЦО, состоящего из m параллельно соединенных модулей, как схемы с общим резервированием с постоянно включенным резервом может быть записана в виде [1]:

$$P_C(t) = 1 - \prod_{i=0}^m (1 - P_i(t)), \quad (1)$$

где $P_i(t)$ — вероятность безотказной работы i -го модуля схемы блока ПЦО (рис. 3). Число модулей m может быть различным и зависит от конкретного ПЦО.

Каждый модуль указанной схемы (рис. 3) имеет сложный состав элементов, влияющих на надежность функционирования всего блока ПЦО, включающий в себя компьютеры с установленным программным обеспечением, дежурных ПЦН и ряд других. Фактически при детальном анализе надежности работы модели (рис. 3) необходимо учитывать состояние (надежность) программного обеспечения программно-аппаратного комплекса, плотность информационного потока, наличие информации, замедляющей работу ПЦН и др. [3, 4]. Как видно, часть этих факторов являются детерминированными, а часть из них необходимо рассматривать как случайные. Отказ любого из указанных элементов приводит к отказу i -го модуля схемы рис. 3. Следовательно,

каждый i -й модуль может быть представлен последовательным соединением n элементов (рис. 4).

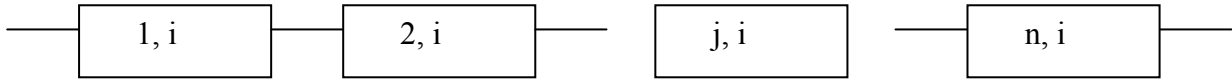


Рис. 4

Показатель надежности i -го модуля — вероятность безотказной работы — может быть записан в виде [3]:

$$P_i(t) = \prod_{j=1}^n P_{ji}(t), \quad (2)$$

где $P_{ji}(t)$ — вероятность безотказной работы j -го элемента в составе i -го модуля схемы.

Интенсивность отказа i -го модуля схемы:

$$\lambda_i(t) = \sum_{j=1}^n \lambda_{ji}(t), \quad (3)$$

где $\lambda_{ji}(t)$ — интенсивность отказа j -го элемента в составе i -го модуля схемы. Для наших условий мы можем полагать интенсивности отказа постоянными во времени, тогда формула (2) может быть записана в виде

$$P_i(t) = \exp(-\lambda_i t) = \exp\left(-\sum_{j=1}^n \lambda_{ji} t\right). \quad (4)$$

Среднее время безотказной работы i -го модуля схемы

$$T_i = \int_0^{\infty} P_i(t) dt = \prod_{j=1}^n \int_0^{\infty} P_{ji}(t) dt. \quad (5)$$

Численные значения интенсивности отказа элементов λ_{ji} определяются в каждом конкретном случае эмпирическим методом, экспертными оценками либо берутся из справочников.

Для рассматриваемого случая каждый из m параллельно соединенных модулей системы состоит из n последовательно соединенных элементов. Вероятность безотказной работы системы (рис. 2):

$$P_C(t) = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - P_i(t)) = 1 - \prod_{i=1}^m \left(1 - \prod_{j=1}^n P_{ji}(t)\right). \quad (6)$$

Все интенсивности отказа i -х модулей λ_i в силу их идентичности одинаковы. При одинаковых $\lambda_i = \lambda$ каждого из m модулей, приняв распределения времени до отказа элементов экспоненциальными, вероятность безотказной работы ПЦН можем записать как

$$P_C(t) = 1 - (1 - \exp(-\lambda t))^{m+1}. \quad (7)$$

Тогда (6) получим в виде

$$P_C(t) = 1 - \prod_{i=0}^m (1 - \prod_{j=1}^n P_{ji}(t)) = 1 - \left(1 - \exp\left(-\sum_{j=1}^n \lambda_{ji} t\right) \right)^{m+1}. \quad (8)$$

Здесь n — число элементов нерезервированной системы, входящих в каждый модуль; m — число модулей (рабочих мест дежурных ПЦН).

Рассмотрим случай, когда в (8) один или часть параметров λ_{ji} могут оказаться случайными величинами. Примером может быть наличие человеческого фактора за счет участия нескольких дежурных ПЦН, обладающих такими специфическими для каждого из них субъективными свойствами, как состояние здоровья, психическое состояние, усталость, рассеяние внимания, ошибки при считывании показаний и т.д. На указанные свойства операторов, в свою очередь, оказывает влияние ряд таких факторов, как погода, перенесенные заболевания, наследственные предрасположенности, качество и образ жизни и др. Неоднозначность влияния указанных факторов на человека, их взаимное действие и практическая невозможность корректного и однозначного учета приводят к необходимости введения случайного параметра и последующей статистической обработки параметров надежности системы [2]. Помимо указанных факторов, существует еще ряд причин, влияющих на надежность работы ОПС и имеющих случайный характер [3]. Сюда можно отнести проведение работ на телефонных линиях, отключение электроэнергии, несвоевременное уведомление о снятии с охраны, срабатывание от проезда крупнотоннажного транспорта, от сильного ветра и прочие стохастические факторы.

Предположим, что из всего комплекса возможных параметров, влияющих на надежность функционирования системы, только один является случайной величиной. Это означает, что в (3) надо выделить случайный параметр λ_q и переписать в виде

$$\lambda_i(t) = \lambda_q + \sum_{j=1}^{n-1} \lambda_{ji}(t). \quad (9)$$

Выражение (8) запишется в виде

$$P_C(t) = 1 - \prod_{i=0}^m (1 - \prod_{j=1}^n P_{ji}(t)) = 1 - \left(1 - \exp\left(-(\lambda_q + \sum_{j=1}^{n-1} \lambda_{ji}(t))\right) \right)^{m+1}. \quad (10)$$

Следовательно, для нахождения вероятности безотказной работы системы необходимо выполнить статистическое усреднение распределения времени отказов $\overline{P_C(t, \lambda_q)}$ по ансамблю реализаций случайного параметра λ_q .

Пусть параметр λ_q является случайной величиной, распределенной по нормальному закону с математическим ожиданием m_λ и дисперсией σ^2 . Введем ограничения на параметры нормального распределения для того, чтобы их можно было использовать в неотрицательной области ($m > 3\sigma$).

Тогда усредненное по ансамблю реализаций выражение (10) [5]:

$$\overline{P_C(t, \lambda_q)} = 1 - \overline{\left(1 - \exp\left(-(\lambda_q + \sum_{j=1}^{n-1} \lambda_{ji}(t))\right) \right)^{m+1}} = \int_{-\infty}^{\infty} P_C(t, \lambda_q) p(\lambda_q) d\lambda_q, \quad (11)$$

где $p(\lambda_q)$ — нормальная одномерная плотность вероятности

$$p(\lambda_q) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{(\lambda_q - m)^2}{2\sigma^2}\right). \quad (12)$$

Проведем усреднение (11) для более простого случая нерезервированной системы. В этом случае вместо двойных индексов достаточно использовать одинарные:

$$P_C(t) = \prod_{j=1}^n P_j(t), \quad (13)$$

$$\lambda_C(t) = \sum_{j=1}^n \lambda_j(t). \quad (14)$$

Для постоянных интенсивностей отказа

$$P_C(t) = \exp(-\lambda_C t), \quad (15)$$

$$\lambda_C(t) = \sum_{j=1}^n \lambda_j(t). \quad (16)$$

В нашем случае, когда один из параметров $\lambda_j(t)$ является случайной величиной:

$$\lambda_i(t) = \lambda_q + \sum_{j=1}^{n-1} \lambda_j(t),$$

вероятность безотказной работы системы $P_C(t)$:

$$P_C(t, \lambda_q) = \exp\left(-\sum_{j=1}^{n-1} \lambda_j t\right) \exp(-\lambda_q t) = \alpha \exp(-\lambda_q t), \quad (17)$$

где α — множитель, не зависящий от случайной величины.

Усреднение (17) по ансамблю реализаций имеет вид

$$\overline{P_C(t, \lambda_q)} = \alpha \overline{\exp(-\lambda_q t)} = \alpha \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-\lambda_q t) p(\lambda_q) d\lambda_q. \quad (18)$$

Подставив (12) в (18), получим

$$\overline{P_C(t, \lambda_q)} = \alpha \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-\lambda_q t) \exp\left(-\frac{(\lambda_q - m)^2}{2\sigma^2}\right) d\lambda_q. \quad (19)$$

Проведя усреднение выражения (19), получим вероятность безотказной работы системы:

$$\begin{aligned} P_C(t) = \overline{P_C(t, \lambda_q)} &= \alpha \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-\lambda_q t) \exp\left(-\frac{(\lambda_q - m)^2}{2\sigma^2}\right) d\lambda_q = \\ &= \exp\left(-\sum_{j=1}^{n-1} \lambda_j t\right) \exp\left(\frac{\sigma^2}{2} t^2 - mt\right). \end{aligned} \quad (20)$$

Сравнивая выражения (17) и (20), можно сделать вывод, что в случае, когда один из параметров $\lambda_j(t)$ является случайной величиной, для нахождения вероятности безотказной работы системы необходимо знать математическое ожидание и дисперсию интенсивности отказа λ_q элемента, соответствующего наличию человеческого фактора либо другого случайного параметра. При стремлении дисперсии интенсивности отказа

$\sigma^2 \rightarrow 0$ выражение (20) для $P_c(t)$ переходит в выражение (17) для неслучайных параметров $\lambda_j(t)$, что говорит о необходимости сочетания стохастических и детерминированных подходов к построению и анализу надежности моделей систем безопасности и охранно-пожарной сигнализации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. Практикум. — СПб.: БХВ-Петербург, 2006. — 560 с.
2. Булгаков О.М., Ахлюстин С.Б. К вопросу о формализации антропометрических параметров эргатических моделей безопасности // Вестник Воронежского института МВД России. — 2010. — №1. — С.131—137.
3. Острейковский В.А. Теория надежности: учеб. для вузов. — М.: Высш. шк., 2003. — 463 с.
4. Гуров С.В., Половко А.М. Основы теории надежности. — СПб.: БХВ-Петербург, 2005. — 702 с.
5. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учебное пособие для вузов. — Изд. 5-е, перераб. и доп. — М.: Высшая школа, 1977. — 479 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Булгаков Олег Митрофанович. Заместитель начальника по учебной работе. Доктор технических наук, профессор.

Воронежский институт МВД России.

E-mail: ombfrier@yandex.ru.

Россия, 394065, г. Воронеж, проспект Патриотов, 53. Тел. (473)2-735-290.

Удалов Валерий Петрович. Доцент кафедры радиотехники. Кандидат физико-математических наук, доцент.

Воронежский институт МВД России.

E-mail: uvalery@yandex.ru.

Россия, 394065, г. Воронеж, проспект Патриотов 53. Тел. (473)2-735-290.

Bulgakov Oleg Mitrofanovich. The deputy head on study. Doctor of technical sciences, professor.

Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of Russia.

Work address: Russia, 394065, Voronezh, Prospect Patriotov, 53. Tel. (473)2-735-290.

Udalov Valery Petrovich. The assistant professor of the radio engineering chair. Candidate of physical and mathematical sciences, assistant professor.

Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of Russia.

Work address: Russia, 394065, Voronezh, Prospect Patriotov, 53. Tel. (473)2-735-290.

Ключевые слова: интенсивность отказов; модель надежности; охранно-пожарная сигнализация; последовательно-параллельная схема; вероятность безотказной работы; стохастические факторы.

Key words: failure rate; reliability model; security-fire alarm system; serial-parallel scheme; probability of reliable operation; random factors.

УДК 624.381



П.Б. Абрамов,
*кандидат технических наук, доцент,
Военный авиационный инженерный
университет (г. Воронеж)*



А.В. Леньшин,
*доктор технических наук, доцент,
Военный авиационный инженерный
университет (г. Воронеж)*

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ПРИ АППРОКСИМАЦИИ ДИСЦИПЛИНЫ ОБСЛУЖИВАНИЯ ПОТОКАМИ ЭРЛАНГА

ESTIMATION OF MASS SERVICE SYSTEMS PARAMETERS AT APPROXIMATION OF SERVICE DISCIPLINE BY ERLANG STREAMS

Приводятся результаты аналитического моделирования одноканальных систем массового обслуживания с ожиданием для случая, когда потоки обслуженных заявок аппроксимируются потоками Эрланга. Результаты моделирования сопоставлены с расчетами классической теории, на этой основе получены коэффициенты коррекции, позволяющие учесть последствие в системах массового обслуживания.

Results of analytical modeling of single-channel mass service systems with expectation are discussed in the article for a case when streams of the served demands are approximated by Erlang streams. Results of modeling are compared with classical theory calculations, and on this basis correction factors are received, allowing to consider postaction in mass service systems.

Моделирование систем массового обслуживания (СМО) в настоящее время приобретает все большую актуальность. Это обусловлено тем фактом, что современные системы и сети передачи и обработки информации по своей сути являются системами массового обслуживания. Разветвленность структуры информационных сетей, их достаточно сложная архитектура и значительный объем передаваемого трафика требуют адекватной оценки возможностей подобных систем с целью минимизации риска потери информации.

Исследованию и оптимизации сетей массового обслуживания посвящено большое количество научных трудов. Особенный интерес вызывает моделирование систем, в которых потоки событий являются не вполне пуассоновскими. Для этой цели применяются самые различные модели и методики, начиная от алгоритмов решения задач на графах и заканчивая теорией нечетких множеств. Заметную роль среди научных подходов в данной предметной области занимают полумарковские модели и методы, основанные на моментах вероятностных распределений случайных величин. Полученные авторами расчетные соотношения достаточно сложны и позволяют учесть многие существенные аспекты реальных процессов.

Вместе с тем, представляется незаслуженно забытым такой классический подход, как метод расширения пространства фазовых состояний системы. Как известно [1], он основывается на аппроксимации потоков событий в системе массового обслуживания потоками Эрланга. Распределение времени как случайной величины между событиями в потоке Эрланга описывается гамма-распределением с целочисленными параметрами. Порядок потока Эрланга может быть достаточно просто оценен на основе выборки случайного процесса, методом сравнения математического ожидания временного интервала между событиями и дисперсии этой величины, согласно следующему выражению

$$K_{\text{Э}} = \frac{m^2}{\sigma^2}, \quad (1)$$

где m — математическое ожидание; σ — среднее квадратичное отклонение значения временного интервала между событиями в стохастическом потоке. После этого достаточно ввести на соответствующем переходе графа $K_{\text{Э}} - 1$ псевдосостояний, увеличив в $K_{\text{Э}}$ раз интенсивности потоков событий на вновь полученных дугах графа состояний системы, чтобы модель стала марковской, оставаясь при этом вполне адекватной моделируемым процессам.

Следует отметить, что подобный подход осложняется целым рядом затруднений, в силу чего не получил широкого распространения. Прежде всего, при расчете порядка потока по формуле (1) вероятнее всего будет получено не целое значение. Округление результата может привести к значительным погрешностям. Кроме того, при больших значениях последствий введение псевдосостояний существенно увеличивает количество уравнений в системе, описывающей моделируемый процесс. Вместе с тем, основные положения данного метода были сформулированы в 30-40-е годы XX столетия, когда возможности математических вычислений являлись весьма и весьма ограниченными. Современное развитие компьютерных технологий позволяет успешно преодолеть указанные трудности и получить полезные для практики расчетные соотношения для немарковских систем массового обслуживания.

Рассмотрим одноканальную СМО с ожиданием, в которой дисциплина обслуживания не может быть смоделирована простейшим потоком событий. Подобная модель представляется вполне адекватной для выделенных серверов локальных информационных сетей. Действительно, имеет место очередь, так как пришедшие заявки ожидают обслуживания, а значения временных интервалов их обслуживания, как правило, группируются около некоторого значения, что не отвечает экспоненциальному закону распределения.

В качестве отправной точки рассуждений возьмем классическую модель СМО с ожиданием. Граф переходов и состояний системы приведен на рис. 1.

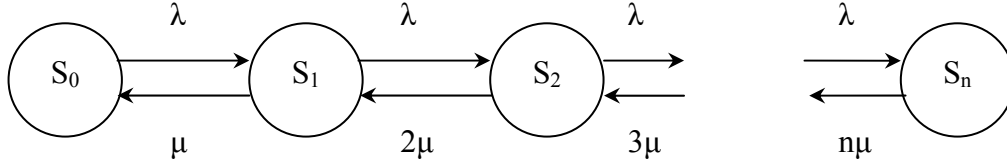


Рис. 1. Граф состояний и переходов одноканальной СМО

Здесь m — количество мест в очереди; λ — интенсивность входящего простейшего потока заявок; μ — интенсивность обслуживания заявок в канале. Будем полагать, что поток обслуженных заявок с достаточной точностью аппроксимируется потоком Эрланга порядка K_γ . Составим граф состояний и переходов для модели с введенными псевдосостояниями. Для одноканальной СМО с очередью в одно место он будет иметь вид, приведенный на рис. 2.

Можно видеть, что граф существенно усложняется не только из-за введения псевдосостояний, но также потому, что из каждого псевдосостояния S_{1k} возможен переход в старшее по номеру состояние графа S_2 . При увеличении количества мест в очереди происходит дальнейшее усложнение, с возникновением переходов из S_{2k} в S_3 , из S_{3k} в S_4 , и т.д. Количество уравнений, описывающих динамику модели, также существенно возрастает с увеличением порядка потока Эрланга K_γ .

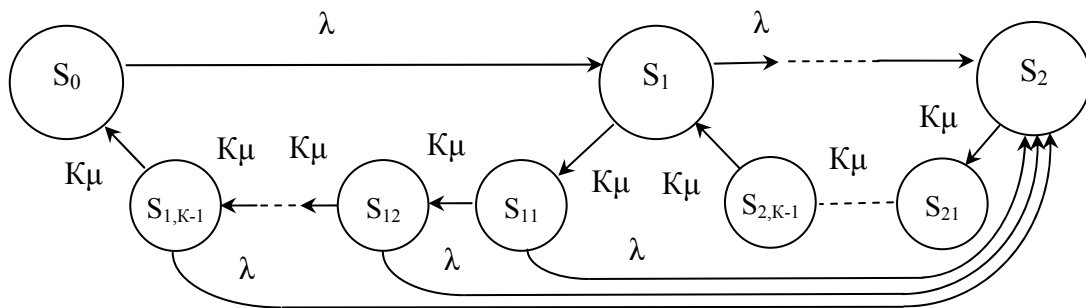


Рис. 2. Граф состояний и переходов для одноканальной СМО с очередью в одно место

Вместе с тем, для приведенного на рис. 2 графа вполне обоснованно могут быть составлены и решены уравнения Колмогорова — Чепмена, а затем рассчитаны вероятности состояний для немарковской модели согласно выражению

$$P_{i_{nm}} = P_{i_m} + \sum_{k=1}^K P_{ik} . \quad (2)$$

С целью оценки параметров немарковских СМО было проведено аналитическое моделирование динамики системы для количества мест в очереди от одного до пяти и

коэффициента потока Эрланга, равного $K_9 = 2$. Результаты расчета вероятности отказа $P_{\text{отк}}$ в обслуживании заявки приведены в табл. 1.

Таблица 1

Вероятность отказа $P_{\text{отк}}$ в обслуживании заявки

Нагрузка СМО, λ/μ	Число мест в очереди				
	1	2	3	4	5
0,4	0,1090	0,0450	0,0190	0,0080	0,0037
0,6	0,1970	0,1170	0,0730	0,0048	0,0032
0,8	0,2820	0,2040	0,1580	0,1280	0,1070
1,0	0,3570	0,2910	0,2530	0,2290	0,2130
1,2	0,4220	0,3690	0,3410	0,3260	0,3160
1,4	0,4780	0,4360	0,4170	0,4080	0,4030
1,6	0,5250	0,4930	0,4800	0,4740	0,4720
1,8	0,5650	0,5410	0,5320	0,5280	0,5270
2,0	0,6000	0,5810	0,5740	0,5720	0,5720
2,5	0,6670	0,6570	0,6540	0,6540	0,6450
3,0	0,7160	0,7100	0,7090	0,7080	0,7080
3,5	0,7520	0,7490	0,7480	0,7480	0,7480
4,0	0,7800	0,7780	0,7780	0,7780	0,7780
5,0	0,8210	0,8200	0,8200	0,8200	0,8200
6,0	0,8490	0,8490	0,8480	0,8480	0,8480
7,0	0,8690	0,8690	0,8690	0,8690	0,8690
8,0	0,8850	0,8850	0,8850	0,8850	0,8850
9,0	0,8970	0,8970	0,8970	0,8970	0,8970

Для сравнения с результатами классической теории массового обслуживания были проведены расчеты вероятности отказа по формуле [2]

$$P_{\text{отк}}^* = \frac{\rho^{m+1}(1-\rho)}{1-\rho^{m+2}}, \quad (3)$$

где $\rho = \lambda/\mu$ — нагрузка системы массового обслуживания.

В результате были получены коэффициенты коррекции $K_{\text{корр}}$, приведенные в табл. 2, на которые необходимо умножить классические результаты с целью получения параметров немарковской системы массового обслуживания

$$P_{\text{отк}} = K_{\text{корр}} \cdot P_{\text{отк}}^*. \quad (4)$$

Таблица 2

Коэффициент коррекции $K_{\text{корр}}$ для вероятности отказа СМО

Нагрузка СМО, λ/μ	Число мест в очереди				
	1	2	3	4	5
0,4	1,0583	1,1538	1,1875	1,3333	1,4800
0,6	1,0707	1,1818	1,3036	1,4545	1,6842
0,8	1,0763	1,1792	1,2951	1,4382	1,6212
1,0	1,0689	1,1548	1,2402	1,3392	1,4200
1,2	1,0657	1,1460	1,2222	1,2988	1,3680

Продолжение табл. 2

1,4	1,0622	1,1295	1,1880	1,2401	1,2753
1,6	1,0585	1,1129	1,1566	1,1880	1,2103
1,8	1,0541	1,1018	1,1343	1,1528	1,1659
2,0	1,0508	1,0901	1,1124	1,1260	1,1349
2,5	1,0406	1,0666	1,0792	1,0864	1,0932
3,0	1,0347	1,0519	1,0598	1,0599	1,0615
3,5	1,0287	1,0417	1,0447	1,0462	1,0476
4,0	1,0236	1,0332	1,0360	1,0373	1,0373
5,0	1,0186	1,0237	1,0250	1,0250	1,0250
6,0	1,0143	1,0180	1,0180	1,0180	1,0180
7,0	1,0105	1,0140	1,0140	1,0140	1,0140
8,0	1,0091	1,0114	1,0114	1,0114	1,0114
9,0	1,0079	1,0090	1,0090	1,0090	1,0090

Графики зависимостей коэффициента коррекции $K_{\text{КОРР}}$ от нагрузки СМО при различном количестве мест в очереди приведены на рис. 3. Индекс переменной по оси ординат соответствует количеству мест в очереди СМО.

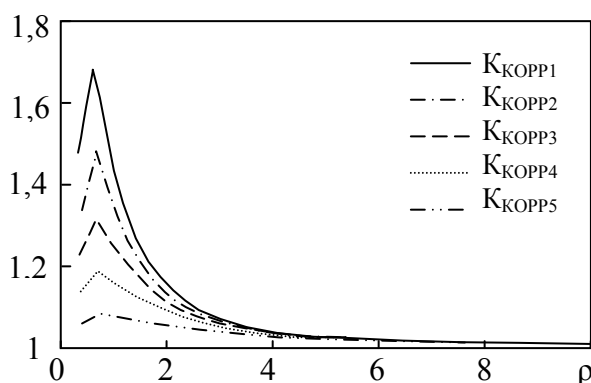


Рис. 3. Зависимость коэффициента $K_{\text{КОРР}}$ от нагрузки СМО

Характер полученных зависимостей определяется несколькими факторами. При увеличении нагрузки вероятность отказа $P_{\text{ОТК}}$ в любом случае стремится к единице. Поэтому и коэффициент коррекции также стремится к единичному значению. При уменьшении нагрузки до нуля, напротив, вероятность отказа $P_{\text{ОТК}}$ стремится к нулю, как в марковской, так и в немарковской системе. Следовательно, коэффициент коррекции также обращается в единицу

$$\lim_{\rho \rightarrow 0} K_{\text{КОРР}} = \lim_{\rho \rightarrow \infty} K_{\text{КОРР}} = 1. \quad (5)$$

Экстремум функциональной зависимости наблюдается при нагрузках СМО, близких к единице. Это отвечает наиболее вероятным режимам работы системы, когда вероятность отказа составляет величину порядка $P_{\text{ОТК}} = 0,05 \dots 0,2$. Таким образом, увеличение значения вероятности отказа в обслуживании заявки в 1,5—2 раза исключительно по причине той или иной дисциплины обслуживания в канале представляется

весьма существенным для оценки возможностей СМО при разработке и проектировании аппаратуры передачи и обработки информации в инфокоммуникационных сетях. Полученные результаты находят практическое подтверждение, из опыта проектирования вычислительных сетей известна целесообразность обеспечения 15-20 % запаса пропускной способности сервера с целью обеспечения требуемых показателей системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. — М.: Высшая школа, 2000. — 383 с.
2. Таха, Хемди А. Введение в исследование операций: пер. с англ. — 7-е изд. — М.: Издательский дом «Вильямс», 2005. — 912 с.
3. Абрамов П.Б. Надежность сложных радиоэлектронных систем: моделирование и управление // Телекоммуникации. — 2004. — № 6. — С. 3—6.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Абрамов Петр Борисович. Преподаватель кафедры автоматизированных систем управления. Кандидат технических наук, доцент.

Военный авиационный инженерный университет (г. Воронеж).

E-mail: abpostbox58@mail.ru

Россия, 394064, Воронеж, ул. Ст. Большевиков, 54а. Тел. 8-903-650-16-20.

Леньшин Андрей Валентинович. Профессор кафедры авиационных радиоэлектронных комплексов. Доктор технических наук, доцент.

Военный авиационный инженерный университет (г. Воронеж).

E-mail: andrey-lenshin@yandex.ru

Россия, 394052, г. Воронеж, ул. Краснознаменная, 153. Тел. 8-920-229-09-95.

Abramov Pyotr Borisovich. Lecturer of the chair of automated control systems. Candidate of technical sciences, assistant professor.

Military Aviation Engineering University (Voronezh).

Work address: Russia, 394064, Voronezh, Old Bolsheviks Str., 54a. Tel. 8-903-650-16-20.

Lenshin Andrey Valentinovich. Professor of chair. Doctor of technical sciences.

Military Aviation Engineering University (Voronezh).

Work address: Russia, 394052, Voronezh, Krasnoznamennaya Str., 153. Tel. 8-920-229-09-95.

Ключевые слова: система массового обслуживания; поток Эрланга; вероятность отказа; коэффициент коррекции.

Key words: mass service system; Erlang stream; probability of refusal; correction factor.

УДК 519.2



В.В. Алексеев,
*доктор технических наук, профессор,
Военный авиационный инженерный
университет (г. Воронеж)*



А.Н. Потапов,
*кандидат технических наук, доцент
Военный авиационный инженерный
университет (г. Воронеж)*

ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ СОЗДАНИЯ КОНФЛИКТНО-УСТОЙЧИВОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТРЕНАЖНОЙ ПОДГОТОВКОЙ ОПЕРАТОРОВ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

ISSUES OF CREATION OF CONFLICT-RESISTANT OF AUTOMATED CONTROL SYSTEM OF RADIO-ELECTRONIC MEANS OPERATORS TRAINING

Рассмотрены вопросы создания конфликтно-устойчивой автоматизированной системы управления тренажной подготовкой операторов радиоэлектронных средств. Представлены пути преодоления неадекватности применения тренажеров и самих РЭС.

The issues of establishment of conflict-resistant automated control system of training of operators of radio-electronic means are considered . The ways to overcome the inadequacy of the use of simulators and the radio-electronic means are provided .

Введение

Обобщенно проблему организации тренажной подготовки (ТП) операторов радиоэлектронных средств (РЭС) и пути ее разрешения можно охарактеризовать с помощью структурной модели, изображенной на рис. 1.

Эта схема представляет собой результат анализа предметной области современных тенденций развития системы ТП. На основании рис. 1 и определим возможности тенденций развития системы ТП по устранению неадекватности практического применения РЭС, являющейся объективной реальностью независимо от ее представления и образующейся из-за наличия основных и дополнительных факторов.

Анализ систем тренажной подготовки операторов РЭС

В преломлении традиционных и современных принципов организации обучения [1] для системы ТП операторов РЭС объектом управления является оператор. А в

качестве субъекта управления выступают инструктор и непосредственно система ТП, т.к. она не заменяет, а дополняет инструктора.

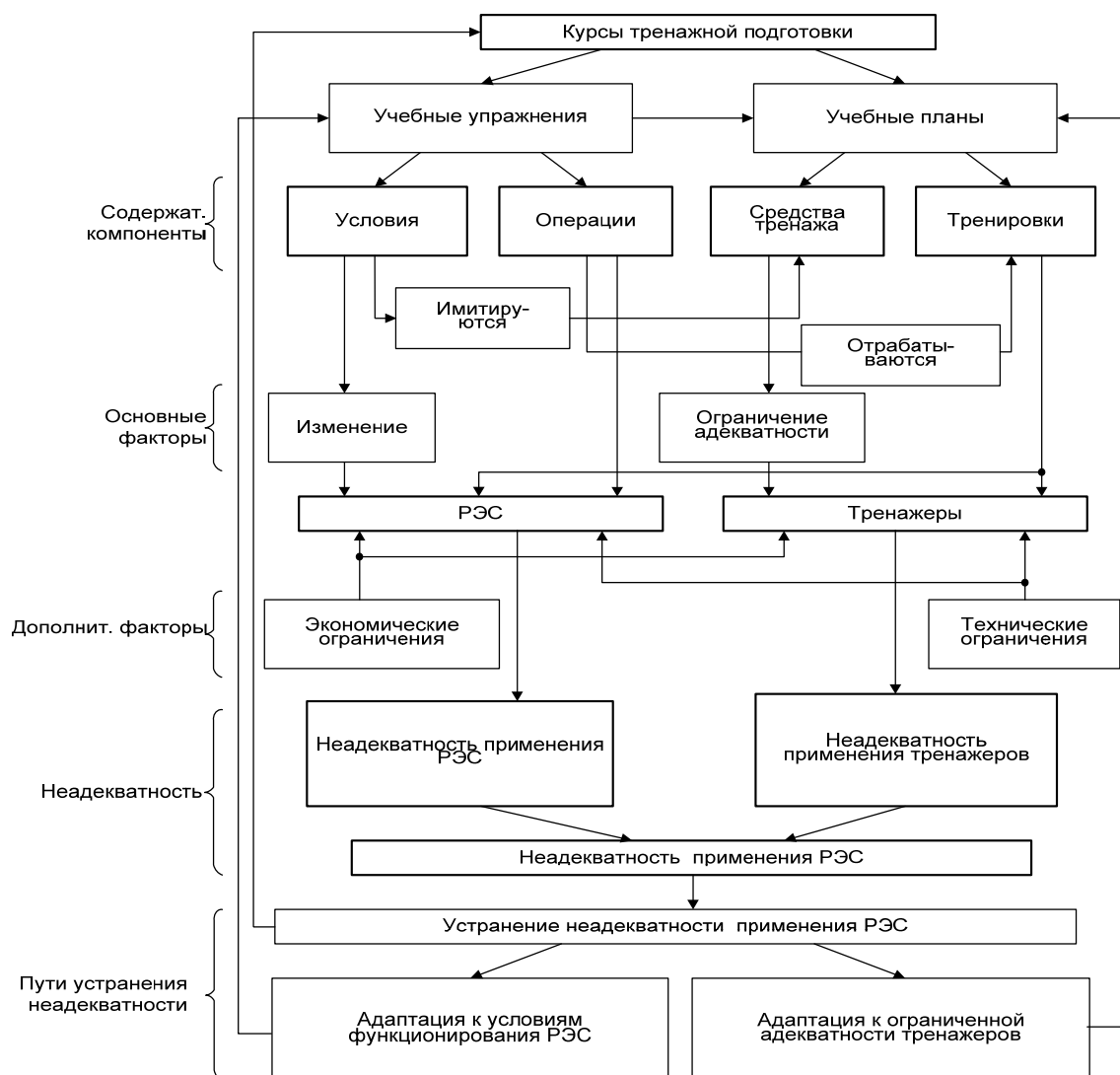


Рис. 1. Проблема организации ТП операторов РЭС и пути ее разрешения

Системы ТП можно разделить на две группы [2]: селективные (традиционные) (рис. 2) и интеллектуальные (автоматизированные) (рис. 3).

В селективных системах управление ТП (определение содержания и последовательности упражнений (Ω_s), а также количества тренировок (N_{mp})) осуществляется в соответствии с курсами ТП. Это, как было определено ранее, вполне соответствует современной ТП операторов РЭС. При этом каждый оператор проходит один и тот же путь ТП, то есть отсутствует адаптация N_{mp} к каждому конкретному обучаемому. Как правило, селекция заключается в выборе перечня упражнений и количества тренировок в соответствии с периодом обучения оператора. При этом ТП обычно проводится на штатных РЭС с ограниченными возможностями по реализации стандартных операций

(D) и имитации типовых радиочастотных условий (РЧ-условий) (Δ) применения РЭС. Кроме того, из-за ограниченного эксплуатационного ресурса РЭС порой не представляется возможным проведение дополнительных тренировок в интересах достижения требуемого уровня обученности операторов.

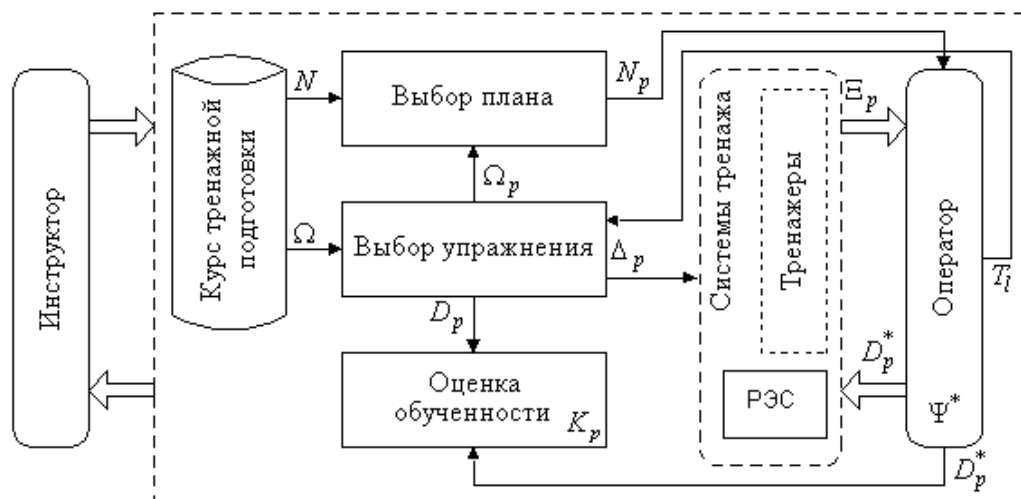


Рис. 2. Селективные (традиционные) системы ТП

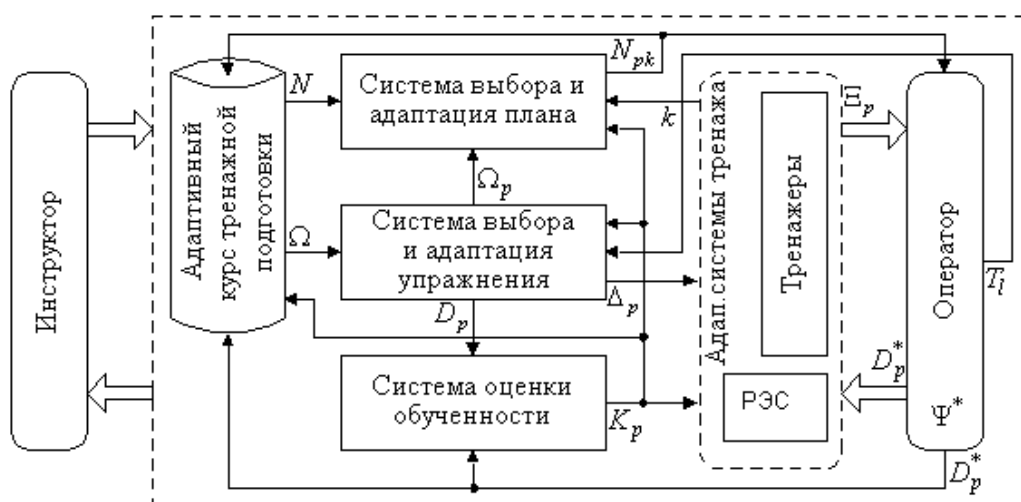


Рис. 3. Интеллектуальные (автоматизированные) системы ТП

На рис. 2 и 3 обозначено:

- N — количество занятий, определяемое курсом тренажной подготовки;
- Ω — последовательность упражнений, определяемая курсом тренажной подготовки;
- D_p — стандартные операции;
- K_p — оценка уровня обученности;
- Ω_p — упражнения, выполняемые оператором;
- N_p, N_{pk} — количество занятий, определяемое планом тренажной подготовки;
- D_p^* — операции, выполняемые оператором;
- Ξ_p — информация, отражаемая на индикаторных устройствах тренажеров;
- Δ_p — имитируемые типовые радиочастотные условия применения РЭС.

Современное состояние методологии, теории и практики автоматизации оценки операторской деятельности и построения экспертных систем и систем искусственного интеллекта позволяет развить селективную систему ТП до интеллектуального уровня (см. рис. 3).

В интеллектуальной системе ТП в зависимости от ситуаций (комбинаторик различных ограничений) производится выбор упражнений и их содержания, планов и их наполнения, а также средств тренажа не только в зависимости от периода обучения операторов, но и с учетом их индивидуальных особенностей (начального уровня обученности и скорости усвоения упражнений). Помимо этого современная теория и практика отечественного и зарубежного тренажеростроения и развитие вычислительной техники позволяют создавать недорогие, по сравнению со штатными, тренажеры РЭС, которые в значительной степени расширяют возможности реализации стандартных операций и имитации типовых РЧ-условий применения РЭС, что, порой, невозможно сделать в существующих образцах тренажных средств, а это вызывает у самих операторов негативное отношение к ним. Кроме того, появились новые научные школы и направления, которые развивают основы тренажеростроения с позиции совершенствования теоретических основ адаптации тренажеров к состоянию оператора с выдачей ему рекомендаций методического и практического характера.

Интеллектуальная система ТП по результатам тренировок позволяет производить адаптацию самих курсов ТП, которые в настоящее время формируются на длительные сроки (5-10 лет) и не учитывают возможности уточнения упражнений и планов [3]. Необходимость уточнения упражнений возникает при выявлении в процессе ТП более рациональных операций применения РЭС по типовым ситуациям, отражающим реальные способности операторов. Необходимость уточнения планов возникает не только по реальным способностям обучаемых, но и из-за внедрения новых средств тренажа. Причем эти уточнения для селективной системы ТП из-за существующих для нее технологических издержек могут морально устаревать, что также вызывает к ним негативное отношение со стороны инструкторов и методистов.

Однако, несмотря на несомненные преимущества автоматизированной (интеллектуальной) системы по отношению к традиционной (селективной) системе, она обладает совокупностью факторов неадекватности:

а) неадекватностью применения РЭС, выраженной в наличии несоответствия между предписанными и альтернативными содержательными компонентами учебных упражнений, отражающими соответственно принятые и действительные РЧ-условия функционирования и операции применения РЭС;

б) неадекватностью применения тренажеров, заключающейся в несоответствии между оценками уровней навыков, получаемыми операторами РЭС при обработке единых учебных упражнений на тренажерах и штатных РЭС, что приводит к формированию некорректных содержательных компонентов учебных планов, отражающих количество тренировок на средствах тренажа.

Эта совокупность неадекватности, с психолого-физиологической точки зрения, способствует формированию заведомо искаженных, а значит ложных знаний (перцептивных образов) и навыков (умений выполнять целенаправленные мыслительные действия с апперцептивными и перцептивными образами), которые порой устранять сложнее, чем приобретать новые знания и навыки. В целом неадекватность вредно влияет на полезность практического применения РЭС, которую, безусловно, необходимо устранять. Вопросы устранения неадекватности систем обучения, в том числе и в рамках автоматизированной системы (АС) ТП, в такой

постановке ранее не рассматривались. Обучение операторов в основном было направлено на обеспечение: безопасности здоровья личного состава, скрытности тактических приемов применения и режимов функционирования РЭС, конфиденциальности курсов подготовки, организационно-методических указаний и планов проведения тренировок. Достижение адекватности ТП операторов понималось в узком смысле — способность к выявлению полезных навыков из смеси их с ошибочными навыками за счет селективных возможностей АС. При этом селективные возможности в традиционных системах ТП определяются в основном квалификацией инструкторов, которые в процессе отработки учебных упражнений операторами, обнаруживая отклонения их действий от предписанных, осуществляют методические приемы по устроению ошибочных действий и недоведению их до автоматизма, т.е. недопущению формирования ошибочных навыков.

С учетом тенденций развития методов имитационного моделирования и вычислительной техники появились реальные предпосылки замещения традиционных инструкторов электронными инструкторами, которые выполняют в автоматизированном виде функции первых, что позволяет устранять субъективный фактор неадекватности ТП из-за ошибочных навыков. Поэтому неадекватность АС ТП в узком смысле непосредственно зависит от корректности разработки электронных инструкторов. Кроме того, селективные возможности АС ТП можно несколько расширить за счет автоматизации методов профессионального отбора на начальной стадии обучения и методов проверки профессиональной годности — в процессе учебной и практической профессиональной деятельности операторов и т.п.

В настоящее время в теоретическом плане достаточно полно с позиций педагогики и психологии разработаны методологические основы, а именно: теория оценки эрготехнических систем, теоретические основы оценки операторской деятельности, которые напрямую не относятся к устранению неадекватности АС обучения, не позволяют обеспечить адаптивное управление курсами ТП операторов по оценкам их деятельности, соответственно на тренажерах и на штатных РЭС.

При этом объектом управления является оператор, для которого в качестве входных параметров задаются виды и последовательности упражнений, их объемы и продолжительности, а в качестве выходных — оценки его деятельности. Оценки деятельности сравниваются с нормативами, и на основании анализа невязки между ними производится коррекция входных параметров оператора. В такой постановке можно считать, что автоматизация обучения косвенно направлена на устранение неадекватности в широком смысле, вызванной отсутствием в курсах подготовки содержательных компонентов, отражающих в полной мере индивидуальные свойства обучаемых. Однако при этом не учитывается ограниченная адекватность имитационного моделирования в тренажерах, что приводит изначально к формированию некорректных оценок деятельности операторов, следовательно, его входных параметров, а значит не достигается в полной мере положительный эффект устранения неадекватности ТП.

Теоретические исследования по созданию АС освоения РЭС, способствующей устранению неадекватности применения штатных РЭС и тренажеров, практически не проводились. Хотя это научное направление является актуальным при постоянной модернизации как РЭС и тренажеров, так и РЧ-условий их функционирования. Основой устранения этой неадекватности является адаптация операций боевого применения РЭС и определение количества тренировок, синтезируемых при решении задач выбора и распределения функциональных действий операторов и средств тренажа. Вопросы

диагностики содержательных компонентов курса подготовки операторов на этапе изменения РЧ-условий применения РЭС и тренажеров полностью выпадают из сферы деятельности лиц, принимающих решения (ЛПР) по организации ТП.

Стремление на основе принципа сквозного анализа неадекватности ТП наилучшим образом распределить содержательные компоненты курсов подготовки с использованием тренажеров так, чтобы удовлетворить реализуемость их полной отработки, является важной задачей. В интересах устранения неадекватности возникают проблемные вопросы в рамках автоматизации механизмов адаптивной генерации содержательных компонентов учебных упражнений и учебных планов, которые обеспечат выполнение разнообразных переходов от одних условий функционирования РЭС к другим с учетом ограниченной адекватности тренажеров.

Пути устранения неадекватности применения РЭС

В интересах устранения неадекватности применения РЭС предлагается дополнить АС ТП (рис. 4) [4]: системой адаптации упражнений к действительным РЧ-условиям функционирования РЭС; системой идентификации РЧ-условий взаимодействия РЭС со средой.

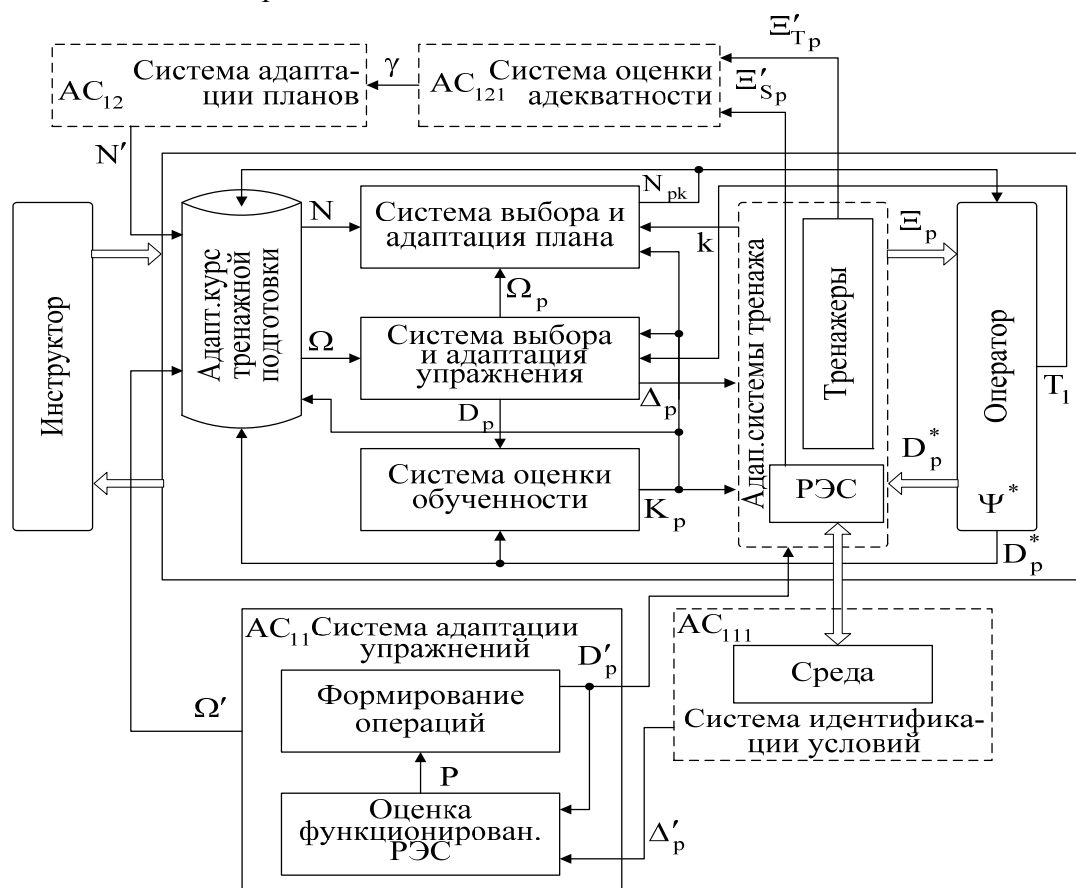


Рис. 4. Модернизированная АС ТП операторов РЭС

На рис. 4 обозначено: γ — оценка адекватности тренажеров; P — оценка функционирования РЭС.

Для устранения неадекватности применения тренажеров предлагается включить в состав АС ТП систему количественной оценки адекватности тренажеров по отношению к штатным РЭС. При этом устранение неадекватности АС ТП операторов понима-

ется не в узком смысле — как способность к выявлению полезных навыков из смеси их с ошибочными, вредно влияющими на эффективность боевого применения РЭС за счет селективных возможностей АС, а в широком — как способность к адаптации полезных содержательных компонентов учебных упражнений и учебных планов, определяющих курсы подготовки к изменяющимся РЧ-условиям функционирования РЭС и ограниченной адекватности тренажеров.

В интересах устранения неадекватности АС ТП необходимо более подробно рассмотреть состояние вопроса адаптации содержательных компонентов отдельно как учебных упражнений, так и учебных планов.

Согласно вышеизложенному, содержательными компонентами любого учебного упражнения, предназначенного для его отработки операторами РЭС, являются РЧ-условия функционирования и предписанные операции применения РЭС. Предписанные операции (в некоторых источниках — «схемы применения»), как правило, определяются эмпирически в ходе специальных исследовательских учений с привлечением экспертов, обладающих опытом эксплуатации РЭС. Эпизодическая коррекция курсов подготовки осуществляется на основании организационно-методических указаний, формирующихся по результатам применения РЭС на испытаниях, проведение которых в современных условиях затруднительно, что способствует моральному устареванию учебных упражнений из-за внепланового усовершенствования как самих РЭС, так и изменения РЧ-условий их функционирования.

Кроме того, необходимо отметить следующее. Обычно специальные исследовательские испытания проводятся на специализированных полигонах со свойственными для них организационно-техническими проблемами, что, безусловно, способствует возникновению неадекватности применения РЭС.

Известно, что в процессе применения РЭС в соответствии с РЧ-условиями его функционирования оператор должен выбирать и осуществлять такую операцию $D = \{D_r\}$, которая позволила бы формировать реакцию ($Re(S)$) средства в интересах достижения желаемого результата (P_S). От корректности выбора, своевременности и точности выполнения операции (D) зависит достижимость желаемого результата (P_S).

Условия функционирования РЭС, определяемые структурой окружающей среды и общностью РЧ-спектров ее элементов (Q_j), могут оказывать существенное влияние на достижимость желаемого результата P_S . При этом в зависимости от сложившихся РЧ-условий операторский персонал производит реализацию регламентируемых, ранее отработанных им в ходе ТП операций по управлению РЭС (D'_S).

В настоящее время из-за отсутствия метода, позволяющего адекватно адаптировать операции D'_S с учетом динамики изменения РЧ-условий его функционирования, регламентирующие операции по их управлению могут оказаться неадекватными [5], т.е. операции D'_S малоэффективны, а результат нежелательный, хотя в принципе РЭС вполне способно его получить.

Поэтому первой актуальной научной задачей является разработка метода адаптации содержательного компонента учебных упражнений — операций, способствующих устранению неадекватности применения РЭС, возникающей из-за изменения РЧ-условий, которые характеризуют текущие отношения в РЧ-спектре между РЭС и окружающей средой.

Эта задача может быть решена на основании автоматизации процесса анализа РЧ-условий функционирования РЭС и синтеза возможных ситуаций по его управлению в интересах обеспечения оперативной адаптации операций управления РЭС к изменя-

мым условиям их функционирования, которые должны отражаться в упражнениях ТП операторов как их содержательные компоненты. Для этого необходимо определить показатели и возможные взаимные отношений между операциями D'_S и D'_Q , соответственно, средства S и РЭС среды Q , и построить системную модель формирования этих операций, инвариантную к их целевому предназначению.

В современных условиях анализ РЧ-условий функционирования РЭС возможен на основании проведения радиомониторинга [2]. Конечной целью радиомониторинга является диагностика и прогноз эффективности функционирования РЭС S . В настоящее время для автоматизации радиомониторинга нашло широкое использование вычислительной техники, где моделируются условия взаимодействия объектов радиомониторинга, а именно средств S и элементов среды Q . При этом для моделирования этих условий изначально необходимо производить идентификацию как средств S , так и среды Q с целью выбора их математических моделей. Однако из-за отсутствия единой формализованной классификации средств S и элементов среды Q , отражающей особенности целевого и функционального предназначения, а также принципы использования ими РЧ-спектра, имеются затруднения в автоматической конфигурации математических моделей объектов мониторинга, что снижает его оперативность. С учетом этого актуальным является поиск возможных вариантов единой формализованной классификации средств радиомониторинга, которая явилась бы основой для создания программного обеспечения автоматического управления конфигурацией математических моделей в автоматизированных системах радиомониторинга.

При общности РЧ-спектра, состоящего из основных и побочных каналов излучения и приема, мониторинг функционирования РЭС, как правило, базируется на выявлении между ними связанности типа «выход S_j — вход S_k », где $S_j \subset S$, $S_k \subset S$, $j, k = \overline{1, N}$. Под выходом S_j понимается спектр излучений радиопередатчиков, а под входом S_k — частотная область радиоприема [5]. Однако помимо данного типа связанности существуют такие, как «выход S_j — выход S_k », «вход S_j — вход S_k ». Очевидно, что средства S_j и S_k могут оказывать взаимное влияние друг на друга через комбинаторику этих типов связанности. Поэтому уместно детализировать взаимные системные отношения в структурно-параметрическом представлении для каждого типа связанности.

В настоящее время имеется ряд работ, посвященных вопросам синтеза схем применения РЭС на основании анализа информационных конфликтов, свойственных условиям их взаимодействия со средой. При этом информационный конфликт определяет меру взаимодействия РЭС и среды. На самом деле топология взаимодействия между РЭС и средой несколько шире, а именно их элементы дополнительно могут быть в отношениях сотрудничества, безразличия и независимости. Однако в настоящее время нет четкого системного описания условий взаимодействия РЭС и среды, а тем более ее топологии, что не позволяет оценивать конфликт — индикатор неадекватности, сотрудничества, безразличия и независимости между ними, а значит корректно определять операции по способам его применения [2]. А без идентификации РЧ-условий функционирования РЭС, являющихся сопутствующим признаком неадекватности их применения, задача по ее устранению теряет смысл.

Поэтому второй актуальной научной задачей является разработка метода идентификации РЧ-условий функционирования РЭС, позволяющего индцировать неадекватность их применения.

Известно, что основой построения современных тренажеров является имитационное моделирование процессов, свойственных штатным РЭС. Однако любая модель — некоторое приближение к реальному объекту. От уровня формализации и учета различных факторов при создании моделей зависит степень ее приближения к реальному объекту, т.е. адекватность. Ввиду того что даже при современных возможностях создания имитационных моделей невозможно учесть все факторы, роль тренировок на штатных РЭС остается значимой. Так, например, остается неопровержимым мнение о том, что нельзя полностью подготовить, в частности, диспетчера системы управления воздушным движением в районе аэродрома на тренажере, каким бы современным он ни был, без тренировок, соответственно, на реальной технике.

Естественно, что неадекватность тренажеров можно уменьшать до некоторого предельно возможного уровня, но при этом их стоимость будет возрастать. Возможна такая ситуация, когда при достижении предельно возможного уровня неадекватности тренажера стоимость тренировок на тренажере может превысить стоимость тренировок на штатных РЭС. А это нарушает саму идею создания тренажеров [4]. На основании этого можно сделать следующий вывод: неадекватность тренажеров по отношению к штатным РЭС не может быть полностью устранима. Решение задачи по полному устранению неадекватности тренажера возможно лишь при превращении его в штатное РЭС. А зачем такой тренажер? Поэтому актуальным является определение навыков, приобретаемых на тренажерах с учетом их адекватности, а также проведение теоретических исследований по оценке адекватности тренажеров в такой форме, которая позволила бы осуществить первое.

Согласно классической схеме построения тренажеров [2], основным его элементом является моделирующее устройство (МУ), выполненное на базе ЭВМ и состоящее из совокупности имитационных моделей. Научную основу построения имитационных моделей МУ тренажера составляет теория математического моделирования [1, 3]. Методы теоретических исследований теории математического моделирования во многом опираются на достижения смежных наук: кибернетики, вычислительной техники, эргономики, имеющих некоторое специфическое преломление для практического использования в процессе создания моделей для тренажера РЭС. Так как любая имитационная модель является лишь некоторым примерным прообразом реального объекта, то полученный с помощью нее результат необходимо проверять на предмет достоверности. К требованию достоверности результатов имитационного моделирования объектов исследования примыкает весьма важное требование — адекватность имитационной модели по отношению к объекту моделирования [2]. Адекватность определяет пригодность имитационной модели для дальнейшего использования. Использование имитационных моделей с ограниченной адекватностью в тренажере приводит к возникновению неадекватности применения тренажеров, заключающегося в некорректном определении содержательного компонента учебных планов — количества тренировок на средствах тренажа. Причинами этого являются:

- приобретение операторами неверных навыков по эффективным способам и тактическим приемам применения РЭС;
- неправильное оценивание выполненных операторами учебных упражнений.

Поэтому одной из актуальных научных задач является разработка метода адаптации содержательного компонента учебных планов, способствующего устра-

нению неадекватности применения тренажеров, существующей из-за их ограниченной адекватности.

Помимо этого неадекватность имитационного моделирования в тренажерах может привести [4]:

- к занижению или к завышению требований, предъявляемых к упражнениям ТП операторов с учетом специфики задач, выполняемых РЭС;
- к занижению или к завышению тактико-технических требований к отечественным РЭС;
- к неадекватным рекомендациям операторам по эффективным способам и приемам применения РЭС и т.п.

Для адаптации содержательных компонентов в интересах устранения неадекватности применения тренажеров, в первую очередь, необходимо определить индикатор ее сопутствующего признака. А именно нужно выработать понятие адекватности тренажеров в количественной форме и в формализованном виде определить влияние адекватности на требуемое количество тренировок.

В настоящее время оценка адекватности имитационного моделирования в тренажерах производится в грубой приближенной форме [6], как правило, сводящейся к подтверждению в ходе испытаний тренажеров гипотезы об адекватности или неадекватности имитационных моделей, входящих в их состав. Это, конечно, не позволяет производить не только прогнозирование подготовленности операторов с использованием тренажеров, но и корректно формировать содержательные компоненты учебных планов ТП, определяющие действительно необходимое количество тренировок.

Основной предпосылкой для определения количественной формы оценки адекватности имитационного моделирования является критерий годности тренажеров [2], суть которого, применительно к рассматриваемой предметной области, заключается в следующем: если информационные параметры штатного РЭС $O(x)$ и тренажера $O_m(x)$ отличаются между собой на 10-15 %, то тренажер является годным, т.е. при этом оператор нечувствителен к этому различию и значит, не совершает действий x' , заведомо отличающихся (искаженных) по отношению к предписанным действиям x . Степень выполнения условия годности тренажера и явится базисом для количественной оценки адекватности в нем имитационного моделирования. Однако из-за отсутствия методов по оценке адекватности имитационного моделирования в такой постановке нет возможности в индикации сопутствующего признака неадекватности применения тренажеров.

Поэтому актуальной является и другая научная задача — разработка методов оценки адекватности результатов имитационного моделирования, позволяющих в зависимости от условий испытаний тренажеров и штатных РЭС определять меру неадекватности применения тренажеров.

Выводы

Таким образом, основными проблемными вопросами создания конфликтно-устойчивой автоматизированной системы управления тренажной подготовкой операторов радиоэлектронных объектов являются следующие:

- устранение множества возможных несоответствий ТП;
- обеспечение устранения неадекватности применения РЭС и тренажеров в АС ТП.

Это можно осуществить существующими методами за счет интенсификации обучения — применения тренажеров и автоматизации обучения — использования средств адаптации учебных упражнений и учебных планов, а также средств тренажа к

уровню обученности операторов, т.е. на основании разработки АС ТП операторов РЭС. При этом АС ТП должна быть адаптивной к изменениям функционального назначения РЭС и состава тренажеров. Существующие АС обучения в основном обладают этими свойствами и успешно выполняют возлагаемые на них задачи, как в адекватной обстановке, так и при тех видах несоответствий, которые определяются свойствами операторов и инструкторов. Обеспечение устранения неадекватности применения РЭС и тренажеров в АС ТП операторов на структурном уровне необходимо рассматривать как способность к целенаправленному изменению структуры на основании оценки действий операторов, условий функционирования РЭС, степени адекватности и эксплуатационных ограничений тренажных средств. Устранение неадекватности применения РЭС и тренажеров, должно достигаться в АС ТП не только за счет селективных возможностей, обеспечивающих устранение ошибочных действий операторов, но и за счет адаптации содержательных компонентов учебных упражнений и учебных планов, определяющих учебные курсы. Поэтому в АС ТП совместно с традиционными методами выявления несоответствий действий операторов от предписанных действий целесообразно использовать так называемые индикаторы сопутствующих признаков, предназначенных для индикации неадекватности применения РЭС и тренажеров.

Это позволит в дальнейшем разрешить такую важную проблему, как определение ограниченной адекватности тренажеров при проведении их сертификации и испытаний, что, в свою очередь, приводит к решению вопроса о планировании ТП с целью исключения неадекватных знаний и навыков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Потапов А.Н. К вопросу разрешения конфликтов в практической подготовке лиц группы руководства полетами // Теория конфликта и ее приложение: материалы I Всероссийской научно-технической конференции 26—29 июня 2000 г. — Воронеж: ВГТА, 2000. — С. 24—27.
2. Дикарев В.А., Потапов А.Н., Султанов Р.В. Обеспечение качества применения компьютерных систем тренажа. — Балашов; Николаев, 2002. — 89 с.
3. Моделирование информационного воздействия на эргатический элемент в эрготехнических системах / В.В. Алексеев [и др.]. — М.: Стенсвил, 2003. — 164 с.
4. Потапов А.Н. Особенности формирования содержательного компонента упражнений тренажной подготовки операторов радиоэлектронных объектов // Актуальные проблемы науки и образования: материалы юбилейного международного симпозиума. — Пенза: ПГУ, 2003.
5. Потапов А.Н., Дикарев В.А., Сысоев В.В. Исследование методов вторичной обработки радиолокационных измерений с целью повышения эффективности применения компьютерных технических систем практического обучения лиц ГРП // Перспективные технологии в средствах передачи информации: материалы III международной научно-технической конференции, 1—5 июля 1999 г. — Владимир: ВлГУ, 1999. — С. 37—41.
6. Сысоев В.В., Дикарев В.А., Алексеев В.В. Количественная оценка структурного взаимодействия элементов технологических систем // Математическое моделирование технологических систем. — Воронеж: ВГТА, 1999. — Вып.3. — С.145—148.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Алексеев Владимир Витальевич. Начальник кафедры. Доктор технических наук, профессор. Военный авиационный инженерный университет (г. Воронеж).

E-mail: vvalex1961@mail.ru

Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а. Тел. 8-919-183-16-48.

Потапов Андрей Николаевич. Заместитель начальника кафедры эксплуатации радиотехнических средств (обеспечения полетов). Кандидат технических наук, доцент.

Военный авиационный инженерный университет (г. Воронеж).

Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а. Тел. 8-980-546-71-68.

Alekseev Vladimir Vitalyevich. The chief of chair. Doctor of sciences (technical), professor.

Military Aviation Engineering University (Voronezh).

Work address: Russia, 394064, Voronezh, Old Bolsheviks Str., 54a. Tel. 8-919-183-16-48.

Potapov Andrei Nikolaevich. Deputy of the chair operating radio equipment support (aviation). Candidate of the technical sciences, assistant professor.

Military Aviation Engineering University (Voronezh).

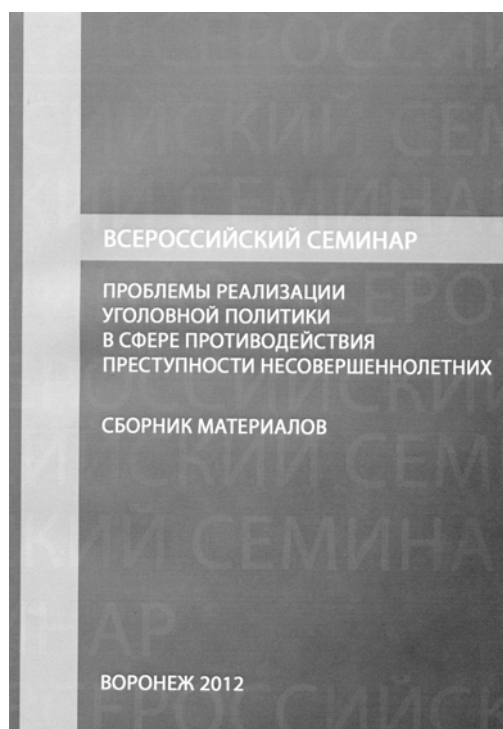
Work address: Russia, 394064, Voronezh, Old Bolsheviks Str., 54a. Tel. 8-980-546-71-68.

Ключевые слова: тренажная подготовка; автоматизированная система; конфликтно-устойчивость; оператор; радиоэлектронное средство.

Key words: preparation; the automated system; conflict stability; the operator; radio-electronic means.

УДК 621.396

ИЗДАНИЯ ВОРОНЕЖСКОГО ИНСТИТУТА МВД РОССИИ



Проблемы реализации уголовной политики в сфере противодействия преступности несовершеннолетних: сборник материалов Всероссийского семинара (Воронеж, 21 ноября 2011 г.). — Воронеж: Воронежский институт МВД России, 2012. — 149 с.

В сборнике содержатся материалы Всероссийского семинара «Проблемы реализации уголовной политики в сфере противодействия преступности несовершеннолетних». Издание предназначено для профессорско-преподавательского состава, курсантов, слушателей, студентов, адъюнктов, аспирантов, сотрудников правоохранительных органов.



А.Н. Бабкин,
кандидат технических наук, доцент



В.О. Андрущук

ПОДХОДЫ К ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМ ПОДВИЖНОЙ РАДИОСВЯЗИ ОРГАНОВ ВНУТРЕННИХ ДЕЛ

THE QUESTIONS OF OPTIMIZATION OF RADIO COMMUNICATION SYSTEMS IN THE INTERNAL AFFAIRS BODIES

Рассматриваются вопросы оптимизации систем подвижной радиосвязи органов внутренних дел, а также методы совершенствования систем, предложен критерий эффективности функционирования.

The questions of radio communication systems optimization in Internal Affairs Bodies are considered. The recommendations to provide increase of quality the real radio mobile systems and to choice optimum criterion of systems are suggested.

В настоящее время для обеспечения надежного и качественного управления силами и средствами ОВД необходимо оптимизировать существующие системы подвижной радиосвязи (СПР). Актуальность данной задачи объясняется увеличением количества технических средств радиосвязи, необходимостью сопряжения в одном частотном диапазоне аналоговых и цифровых радиосредств и радиосетей, организацией защищенной радиосвязи с обеспечением заданной зоны обслуживания абонентов в условиях загрузки радиочастотного спектра.

Существующие СПР ОВД представляют собой конвенциальные или транкинговые системы, построенные по принципам одночастотного или двухчастотного симплекса.

Одним из первых этапов решения задачи оптимизации СПР является определение критерия (или критериев) оптимальности, достижение которого должно приводить к максимальной эффективности функционирования систем.

Оценка эффективности систем связи может быть различной.

В [1] рассматриваются различные показатели эффективности, связанные с вероятностью соответствия систем связи своему функциональному назначению.

$$P_{\text{дц}} = P(Y \in \{Y^{\text{доп}}\}),$$

где $P_{\text{дц}}$ — вероятность достижения системой цели, $\{Y^{\text{доп}}\}$ — множество допустимых значений показателей эффективности.

В [2] под эффективностью систем радиосвязи понимается способность систем выполнять поставленные задачи в заданных условиях функционирования, зависящая от таких факторов, как живучесть, надежность, помехозащищенность. При этом наиболее важным фактором, определяющим качество функционирования систем радиосвязи, является помехозащищенность, которую предлагается оценивать вероятностью ошибок при приеме информации в условиях действия помех.

Однако реализовать критерии на практике для СПР в реальных условиях эксплуатации достаточно трудно, так как их определение основано на вероятностной концепции оценки эффективности.

Критерий оптимальности должен удовлетворять ряду требований:

1. Однозначности решения поставленной задачи оптимизации СПР.
2. Математическим соотношениям, приводящим к решению поставленной задачи.
3. Универсальности с точки зрения применения как к аналоговым, так и цифровым СПР.
4. Физическому смыслу, возможности определения в реальных условиях эксплуатации СПР.

Для СПР ОВД сигналы взаимодействия, с одной стороны, являются детерминированными, т.е. с известными параметрами, и задача приема такого сигнала заключается в установлении факта его обнаружения, измерении уровня и т.д. С другой стороны, в приемных устройствах СПР необходимо восстановить сообщение с минимально возможными отклонениями от исходного сообщения (на фоне шумов).

Поэтому на практике для аналоговых СПР актуальным критерием остается критерий максимума отношения сигнал/шум на выходе системы, цифровых СПР — критерий минимума среднего квадрата ошибки. При этом минимум среднего квадрата ошибки достигается путем максимизации отношения сигнал/шум.

Основным назначением СПР ОВД является обеспечение абонентов качественной, надежной и защищенной связью в заданной зоне обслуживания.

Защищенность связи — способность обеспечить конфиденциальность, целостность и доступность информации легальным абонентам [3, 4].

С этой точки зрения, для защищенных СПР в качестве критерия оптимальности целесообразно использовать отношение сигнал/шум по мощности на выходе систем в заданной зоне обслуживания при выполнении требований по безопасности и достоверности.

$$\frac{P_c}{P_{ш}} \geq \left(\frac{P_c}{P_{ш}} \right)^{тр} \left| \begin{array}{l} P_{ош} \leq P_{ош}^{тр} \\ P_{нсд} \geq P_{нсд}^{тр} \end{array} \right.,$$

где $\frac{P_c}{P_{ш}}$, $\left(\frac{P_c}{P_{ш}} \right)^{тр}$ — соответственно отношение сигнал/шум на выходе СПР и отношение сигнал/шум требуемое, $P_{ош}$, $P_{ош}^{тр}$ — соответственно вероятность ошибочного приёма и вероятность ошибочного приёма требуемая, $P_{нсд}$ и $P_{нсд}^{тр}$ — соответственно вероятность защиты от несанкционированного доступа к СПР и вероятность защиты от несанкционированного доступа требуемая.

Можно определить следующие методы оптимизации для реализации СПР, удовлетворяющих требованиям оптимальности:

- частотный;
- структурный;
- параметрический.

Частотный метод предполагает решение вопросов рационального использования частотного ресурса в выделенных для построения СПР ОВД диапазонах частот. При этом необходимо проведение следующих основных мероприятий.

1. Перевод существующих радиосетей на меньший канальный разнос в выделенных частотных диапазонах: с 25 кГц на 12,5 кГц и 6,25 кГц с сохранением зон покрытия.

2. Обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) радиосетей, особенно в отношении помех по соседним и побочным каналам, а также интермодуляционным искажениям.

3. Обеспечение запаса на затухание сигнала в заданной зоне обслуживания абонентов не менее 20 дБ.

4. Увеличение ширины полосы канала связи для обеспечения защищенности радиосетей.

В настоящее время радиостанции позволяют перейти на меньший канальный разнос, однако не решены вопросы обеспечения ЭМС радиосредств и радиосетей, защищенности радиоканала, сопряжения аналоговых и цифровых средств.

Структурный метод оптимизации предполагает обеспечение живучести СПР. Под структурной живучестью понимается свойство СПР сохранять связность структуры при воздействии дестабилизирующих факторов [1]. Свойство связности предполагает наличие нескольких путей установления связи для абонентов системы, резервирование направлений и линий связи.

Для учета структурной живучести СПР можно использовать вероятность P_{yc} установления связи между абонентами системы:

$AB_i \leftrightarrow AB_j$, где AB — абонент, i и j — номера абонентов.

Структурную живучесть СПР можно определить следующим образом:

$$P_{сж} = \prod_{i, j=1}^{I, J} P_{yci, j},$$

где $P_{сж}$ — вероятность структурной живучести СПР, $P_{yci, j}$ — вероятность установления связи между i и j абонентами.

Вероятность установления связи между двумя абонентами СПР зависит от многих факторов.

Можно записать следующее соотношение:

$$P_{yci, j} = P_{pci, j} \times P_{эmoi, j} \times P_{ni, j} \times P_{pi, j},$$

где $P_{pci, j}$ — вероятность работоспособности i и j технических средств радиосвязи; $P_{эmoi, j}$ — вероятность, характеризующая электромагнитную обстановку в местах расположения i и j технических средств; $P_{ni, j}$ — вероятность, характеризующая способность радиоканала обеспечить прохождение сигналов обмена между i и j техническими средствами (абонентами) с меньшими потерями; $P_{pi, j}$ — вероятность наличия резервных направлений связи между i и j техническими средствами в заданной структуре построения СПР.

Важным направлением структурной оптимизации систем является резервирование направлений связи, которое можно обеспечить как на программном, так и на техническом уровнях.

Параметрический метод реализуется путем определения набора параметров СПР, в наибольшей степени влияющих на качество и надежность связи между абонентами и оптимизирующих выбранный критерий оптимальности контролем данного набора параметров в реальных условиях эксплуатации.

Надежность СПР достигается применением средств связи в соответствии с их назначением и требованием к эксплуатации, соответствием параметров средств значениям, указанным в нормативно-технической документации.

Качество — свойство или совокупность свойств СПР, обуславливающих их пригодность к использованию по назначению [2]. Как было указано выше, добиться

повышения надежности СПР можно проверкой параметров систем в реальных условиях эксплуатации.

Состояние СПР в любой момент времени можно описать с помощью вектора частных показателей качества:

$$\vec{Y}(t) = [Y_1(t), Y_2(t), \dots, Y_n(t)],$$

где $Y_1(t), \dots, Y_n(t)$ — компоненты вектора показателя качества, характеризующие наиболее существенные свойства элементов СПР и процесса их функционирования.

Показатель качества СПР представляет собой вектор, компоненты которого — показатели отдельных свойств, представляющие собой частные, единичные показатели качества систем.

Предлагаемые методы оптимизации существующих СПР ОВД имеют практическое значение. Их выполнение в полном объеме представляет собой сложную техническую задачу. Однако реализация даже отдельных этапов оптимизации позволит повысить эффективность функционирования систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Основы построения систем и сетей передачи информации: учебное пособие для вузов / В.В. Ломовицкий [и др.]; под ред. В.М. Щекотихина. — М.: Горячая линия-Телеком, 2005. — 382 с.
2. Борисов В.И., Зинчук В.М. Помехозащищенность систем радиосвязи. Вероятностно-временной подход. — 2-е изд., испр. — М.: РадиоСофт, 2008. — 260 с.
3. Защищенные радиосистемы цифровой передачи информации / П.Н. Сердюков [и др.]. — М.: АСТ, 2006. — 403 с.
4. Галкин В.А. Цифровая мобильная радиосвязь: учебное пособие для вузов. — М.: Горячая линия-Телеком, 2007. — 432 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Бабкин Александр Николаевич. Начальник кафедры информационной безопасности. Кандидат технических наук, доцент.

Воронежский институт МВД России.

E-mail: alex_babk@mail.ru, babkian@mail.vimvd.ru

Россия, 394065, г. Воронеж, проспект Патриотов, 53. Тел. (473) 262-33-76.

Андрущук Виола Олеговна. Аспирант.

Воронежский институт МВД России.

Россия, 394065, г. Воронеж, проспект Патриотов, 53. Тел. (473) 262-33-76.

Babkin Alexander Nicolayevich. The chief of information security chair. Candidate of technical sciences, assistant professor.

Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of Russia.

Work address: Russia, 394065, Voronezh, Prospect Patriotov, 53. Tel. (473) 262-33-76.

Andrushuk Viola Olegovna. A post-graduate student.

Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of Russia.

Work address: Russia, 394065, Voronezh, Prospect Patriotov, 53. Tel. (473) 262-33-76.

Ключевые слова: системы подвижной радиосвязи; радиосеть; радиостанция; оптимизация; диапазон частот; электромагнитная совместимость радиосетей; помехоустойчивость; отношение сигнал/шум.

Key words: mobile radio communication systems; radio station; optimization; bands of frequencies; bandwidth of channel; radio systems compatibility; signal-to-noise ratio.

УДК 621.396.62



С.А. Шерстюков,
кандидат технических наук, доцент

СПОСОБ ФОРМИРОВАНИЯ РАДИОСИГНАЛОВ С УГЛОВОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ ОДНОВРЕМЕННО НА НЕСКОЛЬКИХ ГАРМОНИКАХ КОЛЕБАНИЯ НЕСУЩЕЙ ЧАСТОТЫ

METHOD OF FORMING SIGNALS WITH ANGULAR MODULATION SIMULTANEOUSLY ON DIFFERENT CARRIER FREQUENCY HARMONICS OF THE OSCILLATIONS

Предложен новый способ формирования неискаженных фазомодулированных сигналов без ограничения величин индексов модуляции одновременно на первой, второй, третьей и последующих гармониках колебания несущей частоты. Полученные результаты дают основание для использования способа в технике создания преднамеренных радиоэлектронных помех, а именно в системах подавления радиолиний управления взрывными устройствами.

A new method for forming a phase-modulated signals undistorted, without limitation values of modulation index at the same time on the first, second, third and subsequent harmonics of the carrier frequency of oscillation. The obtained results provide a basis for the use of methods in the art of deliberate creation of electronic interference, namely, the suppression system of radio control explosive devices.

В настоящее время для радиоэлектронного подавления (РЭП) радиолиний управления взрывными устройствами (РУВУ) с целью защиты личного состава и объектов автомобильной и бронетехники отечественной промышленностью выпускаются передатчики помех (ПП) следующих типов:

- передатчики прямошумовых помех;
- передатчики с модуляцией шумами и/или псевдослучайными последовательностями;
- частотно-свипирующие ПП;
- кратковременные передатчики, включая искровые.

В зависимости от ширины спектра излучаемой помехи передатчики делятся на передатчики заградительных (ПЗП) и прицельных (ППП) помех [1].

Передачики прицельно-заградительных помех (ППЗП) излучают мощность в части диапазона частот шириной несколько десятков мегагерц, при этом центральная частота такой помехи может устанавливаться в любых участках диапазона рабочих частот (ДРЧ).

Широкополосные ПЗП излучают мощность в заданном диапазоне рабочих частот, при этом несущая частота, используемая подрывником, и тип его аппаратуры во внимание не принимаются. Одновременно широкополосная заградительная помеха затрудняет подрывнику поиск свободных частотных участков для выбора рабочих частот РУВУ. Основными же их недостатками являются: возможное нарушение работы собственных каналов связи в условиях поражения помехой и снижение дальности защиты объектов по причине неэффективного расхода помехового ресурса.

Прицельная помеха имеет значительный энергетический выигрыш по сравнению с заградительной, но для ее реализации необходима информация о значениях частот, на которых работают подавляемые радиоэлектронные средства. Получение такой информации связано с затратами времени на обнаружение сигналов РУВУ и измерение его частот, что в условиях скоротечности конфликтного взаимодействия РУВУ и ПП недопустимо [1].

В связи с этим существует актуальная проблема, связанная как с повышением коэффициента качества шумовой помехи [2] при одновременном расширении рабочей полосы частот поставщиков помех, так и с понижением вероятности пропусков сигналов РУВУ и рационального использования помехового ресурса за счёт уменьшения времени излучения ПП.

В наиболее эффективных формирователях радиоэлектронных помех для РЭП РУВУ [3, 4] технический результат по увеличению дистанции подавления достигается за счёт проведения анализа радиоэлектронной обстановки в выбранных диапазонах (как на основных, так и на комбинационных гармониках командных передатчиков) и формирования радиоэлектронных помех в виде комбинаций узкополосных помех с широкополосными заградительными помехами. Постановка комбинированных помех снижает вероятность пропуска сигналов РУВУ по сравнению со способами постановок узкополосных ответных прицельных помех, поскольку широкополосная помеха обеспечивает РЭП во всём рабочем диапазоне в момент постановки узкополосной помехи и по сравнению с широкополосной заградительной помехой увеличивает дистанцию подавления РУВУ за счёт значительно большей спектральной плотности мощности узкополосной помехи [5].

Тем не менее, остаётся нерешённым ряд технических задач, связанных с формированием радиоэлектронных помех одновременно на нескольких гармониках колебания несущей частоты и получением на них (гармониках) заданных значений индексов модуляции при отсутствии проявления в выходных колебаниях амплитудно-фазовых искажений.

В настоящее время известен ряд способов повышения индексов угловой модуляции, широко применяемых в передающей радиотехнической аппаратуре различного назначения [6 — 8], основанных как на принципах разделения спектра модулирующих частот на N полос и дальнейшего их переноса в область несущего колебания, так и на принципах умножения исходной, достаточно низкой несущей частоты, сопровождаю-

щейся умножением индекса модуляции, после чего используется преобразование частоты, в результате которого девиация частоты и, соответственно, индекс модуляции остаются неизменными, но несущая частота уменьшается в определённое число раз. При этом понижение несущей частоты даёт возможность произвести её умножение и вновь повысить индекс модуляции и девиацию частоты.

Недостатками указанных способов являются: сложность реализации; значительное паразитное относительное изменение частоты, вызванное нестабильностью задающего генератора, в результате чего ухудшается стабильность несущей частоты; сложность выполнения условий согласования каскадов модуляторов, в результате чего могут появиться недопустимые нелинейные искажения; наличие в схемах управляемых реактивных элементов и частотно-избирательных цепей, что не позволяет с их помощью осуществлять угловую модуляцию при перестройках схем в широких диапазонах частот несущего колебания и одновременно на нескольких несущих частотах.

Более совершенным по своей технической сущности является квадратурный способ повышения индекса модуляции [9], позволяющий компенсировать амплитудно-фазовые искажения фазомодулированных сигналов (ФМС) при произвольно заданном значении индекса модуляции m_ϕ за счёт использования балансных модуляторов в квадратурных каналах и синусно-косинусных (функциональных) преобразователей модулирующего напряжения. На рис. 1 приведена структурная схема, реализующая квадратурный способ, в состав которой входят: ГВЧ — генератор высокой частоты; БМ1 и БМ2 — балансные модуляторы; ФВ — высокочастотный фазовращатель на $\pi/2$; С1 — высокочастотный линейный сумматор; ИМС — источник модулирующего сигнала; КП — косинусный преобразователь; СП — синусный преобразователь.

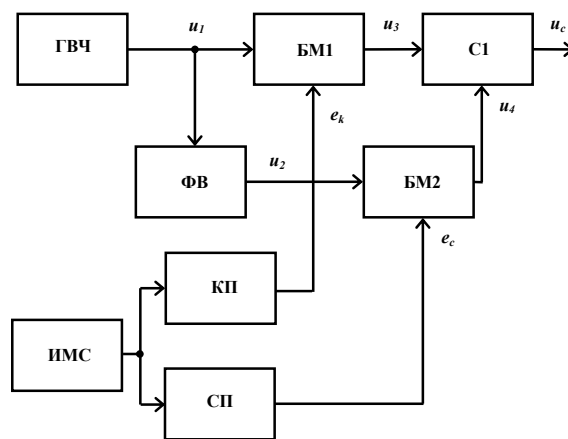


Рис. 1. Квадратурный способ повышения индекса угловой модуляции

Квадратурный способ включает:

формирование с помощью высокочастотного генератора и фазовращателя на $\pi/2$ квадратурных составляющих, описываемых, соответственно, выражениями:

$$u_1 = U_1 \cos \omega t, \quad (1)$$

$$u_2 = -U_1 \sin \omega t; \quad (2)$$

формирование с помощью косинусного и синусного преобразователей модулирующего напряжения, соответственно, управляющих сигналов:

$$e_k = E_y \cos[m_\phi \sin \Omega t], \quad (3)$$

$$e_c = E_y \sin[m_\phi \sin \Omega t], \quad (4)$$

квадратурное перемножение высокочастотных и низкочастотных составляющих (1) с (3) и (2) с (4) в балансных модуляторах с коэффициентами $k_{БМ}=1$;

сложение высокочастотных квадратурных составляющих в линейном сумматоре, в результате которого формируется выходной ФМС:

$$\begin{aligned} u_c &= U_1 E_y [\cos \omega t \cos(m_\phi \sin \Omega t) - \sin \omega t \sin(m_\phi \sin \Omega t)] = \\ &= U_{c1} \cos(\omega t + m_\phi \sin \Omega t), \end{aligned} \quad (5)$$

где $U_{c1} = U_1 E_y$ — постоянная амплитуда.

Из формул (1)—(5) следует, что в структурной схеме на рис. 1 возможно получение ФМС с любыми произвольно заданными индексами модуляции m_ϕ . При реализации квадратурного способа не снижается результирующая стабильность частоты передатчика и отсутствует принципиальный предел, связанный с выбором несущей частоты, а также не требуются сложные согласования высокочастотного и низкочастотного трактов модулятора из-за отсутствия в схеме управляемых реактивных элементов и частотно-избирательных цепей. Данные факторы позволяют использовать квадратурный способ для осуществления угловой модуляции в возбуждателях при перестройках передатчиков в широких диапазонах частот несущего колебания. Однако квадратурный способ имеет следующие *недостатки*: реализация больших значений индексов модуляции (*выше* 10π), с точки зрения вычислительных затрат, на практике затруднительна из-за ограничения количества членов разложения рядов Тейлора, аппроксимирующих значения выходных величин синусно-косинусного преобразователя; не предусмотрена возможность многократного увеличения значений индексов модуляции радиосигналов на первой гармонике колебания несущей частоты; отсутствует возможность формирования радиосигналов с угловой модуляцией одновременно на нескольких гармониках колебания несущей частоты и с различными значениями индексов модуляции.

В связи с этим целями статьи являются: разработка способа повышения индекса угловой модуляции, позволяющего формировать радиосигналы с угловой модуляцией без принципиальных ограничений по значениям индексов модуляции при отсутствии в выходных радиосигналах передатчиков паразитной амплитудной модуляции (ПАМ) и не накапливающейся паразитной фазовой модуляции (ПФМ); увеличение количества гармоник колебания несущей частоты с одновременным увеличением на них (гармониках) значений индексов модуляции выходных ФМС при отсутствии проявления ПАМ и ПФМ; уменьшение инерционности процесса угловой модуляции; существенное упрощение процессов частотообразования в возбуждателях передатчиков; повышение быстродействия радиосистемы.

Это достигается тем, что в известном квадратурном способе повышения индекса угловой модуляции [9]: 1) увеличивают количество этапов квадратурных перемножений результатов вычислений косинусной и синусной функций модулирующего напряжения с квадратурными фазомодулированными составляющими и выполняют алгебраические линейные суммирования результатов квадратурных перемножений, получая при этом на выходе пропорциональное увеличение значений индексов модуляции на

первой гармонике колебания несущей частоты; 2) проводят многократные удвоения аргументов синусной и косинусной функций модулирующего напряжения и одновременно увеличивают количество этапов квадратурных перемножений и алгебраических линейных суммирований квадратурных фазомодулированных составляющих как с результатами вычислений косинусной и синусной функций модулирующего напряжения, так и с результатами многократных удвоений аргументов косинусной и синусной функций, получая при этом на выходе пропорциональное увеличение значений индексов модуляции на первой гармонике колебания несущей частоты; 3) увеличивают количество этапов умножений колебания несущей частоты в сочетании с увеличением количества этапов квадратурных перемножений и линейных суммирований, как в двух предыдущих случаях, получая при этом требуемое количество гармоник колебания несущей частоты с одновременным увеличением на них (гармониках) значений индексов модуляции выходных ФМС при отсутствии проявления ПАМ и ПФМ; 4) осуществляют процессы угловой модуляции вне кольца импульсно-фазовой автоматической подстройки частоты синтезатора, что способствует уменьшению инерционности процесса угловой модуляции, существенному упрощению процессов частотообразования в возбуждателях передатчиков и повышению быстродействия радиосистемы в целом.

На рис. 2 представлен способ повышения индекса угловой модуляции одновременно на первой, второй и третьей гармониках колебания несущей частоты, основанный на вычислении косинусной и синусной функций модулирующего напряжения, удвоениях аргументов косинусной и синусной функций, квадратурном умножении и квадратурном перемножении и суммировании. Цифрами от 1 до 28 обозначены этапы формирования выходных ФМС.

На 1-м и 2-м этапах выполняют, соответственно, первое умножение колебания несущей частоты (**1-й выход**) и формирование его квадратуры:

$$u_{yc1} = (U_1 \cos \omega t)^2 - (U_1 \sin \omega t)^2 = U_1^2 \cos 2\omega t, \quad (6)$$

$$u_{\phi 1} = -U_1^2 \sin 2\omega t. \quad (7)$$

3-й и 4-й этапы реализуют первые синфазное и квадратурное перемножения 2-х гармоник колебаний несущей частоты (6) и (7), соответственно, с составляющими (3) и (4):

$$u_{cn1} = U_1^2 \cos 2\omega t \times E_1 \cos[m_\phi \sin \Omega t], \quad (8)$$

$$u_{kn1} = -U_1^2 \sin 2\omega t \times E_1 \sin[m_\phi \sin \Omega t]. \quad (9)$$

На 5-м этапе производят первое линейное алгебраическое суммирование результатов произведений (8) и (9) (**2-й выход**):

$$\begin{aligned} u_{c1} &= U_1^2 \cos 2\omega t \times E_1 \cos[m_\phi \sin \Omega t] - U_1^2 \sin 2\omega t \times E_1 \sin[m_\phi \sin \Omega t] = \\ &= U_{c1} \cos(2\omega t + m_\phi \sin \Omega t), \end{aligned} \quad (10)$$

где U_{c1} — постоянная амплитуда.

На 6-м и 7-м этапах производят, соответственно, второе умножение ФМС (**3-й выход**) и формирование его квадратуры:

$$u_{yc2} = (U_{c1} \cos(\omega t + m_\phi \sin \Omega t))^2 - (U_{c1} \sin(\omega t + m_\phi \sin \Omega t))^2 = U_{c1}^2 \cos(2\omega t + 2m_\phi \sin \Omega t), \quad (11)$$

$$u_{\phi 2} = -U_{c1}^2 \sin(2\omega t + 2m_\phi \sin \Omega t). \quad (12)$$

8-й и 9-й этапы реализуют первые синфазное и квадратурное перемножения сигналов (11) и (12), соответственно, с составляющими (3) и (4):

$$u_{cn2} = U_{c1}^2 \cos(2\omega t + 2m_\phi \sin \Omega t) \times E_1 \cos[m_\phi \sin \Omega t], \quad (13)$$

$$u_{kn2} = -U_{c1}^2 \sin(2\omega t + 2m_\phi \sin \Omega t) \times E_1 \sin[m_\phi \sin \Omega t]. \quad (14)$$

На 10-м этапе производят второе линейное алгебраическое суммирование результатов произведений (13) и (14) (**4-й выход**):

$$\begin{aligned} u_{c2} &= U_{c1}^2 \cos(2\omega t + 2m_\phi \sin \Omega t) \times E_1 \cos[m_\phi \sin \Omega t] - \\ &- U_{c1}^2 \sin(2\omega t + 2m_\phi \sin \Omega t) \times E_1 \sin[m_\phi \sin \Omega t] = \\ &= U_{c2} \cos(2\omega t + 3m_\phi \sin \Omega t), \end{aligned} \quad (15)$$

где U_{c2} — постоянная амплитуда.

11-й и 12-й этапы реализуют третьи синфазное и квадратурное перемножения 2-х гармоник колебаний несущей частоты (6) и (7), соответственно, с составляющими $e_{k3} = E_3 \cos[4m_\phi \sin \Omega t]$, $e_{c3} = E_3 \sin[4m_\phi \sin \Omega t]$, алгоритмы получения которых описаны в [5]:

$$u_{cn3} = U_1^2 \cos 2\omega t \times E_3 \cos[4m_\phi \sin \Omega t], \quad (16)$$

$$u_{kn3} = -U_1^2 \sin 2\omega t \times E_3 \sin[4m_\phi \sin \Omega t]. \quad (17)$$

На 13-м этапе производят третье линейное алгебраическое суммирование результатов произведений (16) и (17) (**5-й выход**):

$$\begin{aligned} u_{c3} &= U_1^2 \cos 2\omega t \times E_3 \cos[4m_\phi \sin \Omega t] - U_1^2 \sin 2\omega t \times E_3 \sin[4m_\phi \sin \Omega t] = \\ &= U_{c3} \cos(2\omega t + 4m_\phi \sin \Omega t), \end{aligned} \quad (18)$$

где U_{c3} — постоянная амплитуда.

На 14-м и 15-м этапах производят, соответственно, третье умножение колебания несущей частоты (**6-й выход**) и формирование его квадратуры:

$$u_{yc3} = U_1 \cos \omega t \times U_1^2 \cos 2\omega t - U_1 \sin \omega t \times U_1^2 \sin 2\omega t = U_{c4}^2 \cos 3\omega t, \quad (19)$$

$$u_{\phi3} = -U_{c4}^2 \sin 3\omega t. \quad (20)$$

16-й и 17-й этапы реализуют четвёртые синфазное и квадратурное перемножения 2-х гармоник колебаний несущей частоты (19) и (20), соответственно, с составляющими (3) и (4):

$$u_{cn4} = U_{c4}^2 \cos 3\omega t \times E_1 \cos[m_\phi \sin \Omega t], \quad (21)$$

$$u_{kn4} = -U_{c4}^2 \sin 3\omega t \times E_1 \sin[m_\phi \sin \Omega t]. \quad (22)$$

На 18-м этапе производят четвёртое линейное алгебраическое суммирование результатов произведений (21) и (22) (**7-й выход**):

$$\begin{aligned} u_{c4} &= U_{c4}^2 \cos 3\omega t \times E_1 \cos[m_\phi \sin \Omega t] - U_{c4}^2 \sin 3\omega t \times E_1 \sin[m_\phi \sin \Omega t] = \\ &= U_{c4} \cos(3\omega t + m_\phi \sin \Omega t), \end{aligned} \quad (23)$$

где U_{c4} — постоянная амплитуда.

19-й и 20-й этапы реализуют пятые синфазное и квадратурное перемножения 2-х гармоник колебаний несущей частоты (19) и (20), соответственно, с составляющими $e_{k2} = E_2 \cos[2m_\phi \sin \Omega t]$, $e_{c2} = E_2 \sin[2m_\phi \sin \Omega t]$, алгоритмы получения которых описаны в [5]:

$$u_{cn5} = U_{c4}^2 \cos 3\omega t \times E_2 \cos[2m_\phi \sin \Omega t], \quad (24)$$

$$u_{kn5} = -U_{c4}^2 \sin 3\omega t \times E_2 \sin[2m_\phi \sin \Omega t]. \quad (25)$$

На 21-м и 22-м этапах производят пятое линейное алгебраическое суммирование результатов произведений (24) и (25) (**8-й выход**) и формирование квадратуры полученного ФМС:

$$\begin{aligned} u_{c5} &= U_{c4}^2 \cos 3\omega t \times E_2 \cos[2m_\phi \sin \Omega t] - U_{c4}^2 \sin 3\omega t \times E_2 \sin[2m_\phi \sin \Omega t] = \\ &= U_{c5} \cos(3\omega t + 2m_\phi \sin \Omega t), \end{aligned} \quad (26)$$

где U_{c5} — постоянная амплитуда,

$$u_{\phi4} = -U_{c5} \sin(3\omega t + 2m_\phi \sin \Omega t). \quad (27)$$

23-й и 24-й этапы реализуют шестые синфазное и квадратурное перемножения сигналов (26) и (27), соответственно, с составляющими (3) и (4):

$$u_{cn6} = U_{c5} \cos(3\omega t + 2m_\phi \sin \Omega t) \times E_1 \cos[m_\phi \sin \Omega t], \quad (28)$$

$$u_{kn6} = -U_{c5} \sin(3\omega t + 2m_\phi \sin \Omega t) \times E_1 \sin[m_\phi \sin \Omega t]. \quad (29)$$

На 25-м этапе производят шестое линейное алгебраическое суммирование результатов произведений (28) и (29) (**9-й выход**):

$$\begin{aligned} u_{c6} &= U_{c5} \cos(3\omega t + 2m_\phi \sin \Omega t) \times E_1 \cos[m_\phi \sin \Omega t] - \\ &\quad - U_{c5} \sin(3\omega t + 2m_\phi \sin \Omega t) \times E_1 \sin[m_\phi \sin \Omega t] = \\ &= U_{c6} \cos(3\omega t + 3m_\phi \sin \Omega t), \end{aligned} \quad (30)$$

где U_{c6} — постоянная амплитуда.

26-й и 27-й этапы реализуют седьмые синфазное и квадратурное перемножения сигналов (19) и (20), соответственно, с составляющими $e_{k3} = E_3 \cos[4m_\phi \sin \Omega t]$, $e_{c3} = E_3 \sin[4m_\phi \sin \Omega t]$, алгоритмы получения которых описаны в [10]:

$$u_{cn7} = U_{c4}^2 \cos 3\omega t \times E_3 \cos[4m_\phi \sin \Omega t], \quad (31)$$

$$u_{kn7} = -U_{c4}^2 \sin 3\omega t \times E_3 \sin[4m_\phi \sin \Omega t]. \quad (32)$$

На 28-м этапе производят седьмое линейное алгебраическое суммирование результатов произведений (31) и (32) (**10-й выход**):

$$\begin{aligned} u_{c7} &= U_{c4}^2 \cos 3\omega t \times E_3 \cos[4m_\phi \sin \Omega t] - U_{c4}^2 \sin 3\omega t \times E_3 \sin[4m_\phi \sin \Omega t] = \\ &= U_{c7} \cos(3\omega t + 4m_\phi \sin \Omega t), \end{aligned} \quad (33)$$

где U_{c7} — постоянная амплитуда.

Для N -кратного увеличения количества этапов умножений колебания несущей частоты в сочетании с операциями квадратурных перемножений и алгебраических линейных суммирований для выходных ФМС можно записать:

$$u_{cN} = U_{cN} \cos(N \cdot \omega t + N \cdot m_\phi \sin \Omega t), \quad (34)$$

где U_{cN} — постоянная амплитуда.

Из формул (6), (10), (11), (15), (18), (19), (23), (26), (30), (33) и (34) следует, что пропорционально увеличению количеству этапов умножений колебания несущей частоты в сочетании с увеличением количества этапов квадратурных перемножений и линейных суммирований происходит увеличение количества гармоник колебания несущей частоты с одновременным увеличением на них (гармониках) значений индексов модуляции выходных ФМС при отсутствии проявления ПАМ и ПФМ.

На рис. 3, а — д приведены спектры на выходах этапов моделирования способа (этапы формирования ФМС на 2-й и 3-й гармониках колебания несущей частоты, в сравнении с 1-й гармоникой, отмечены цифрами): рис. 3, а — соответствует 1-му и 14-му этапам; рис. 3, б — 5-му и 18-му этапам; рис. 3, в — 6-му и 21-му этапам; рис. 3, г — 10-му и 25-му этапам; рис. 3, д — 13-му и 28-му этапам.

Полученные результаты дают основание для использования нового способа в технике создания преднамеренных радиоэлектронных помех радиотехническим устройствам, где требуется как повышение коэффициента качества шумовых помех с угловой модуляцией [2], так и увеличение дистанции подавления за счёт обеспечения возможности формирования в сочетании с заградительными помехами прицельных помех одновременно на основных и комбинационных гармониках колебаний, излучаемых командными передатчиками.

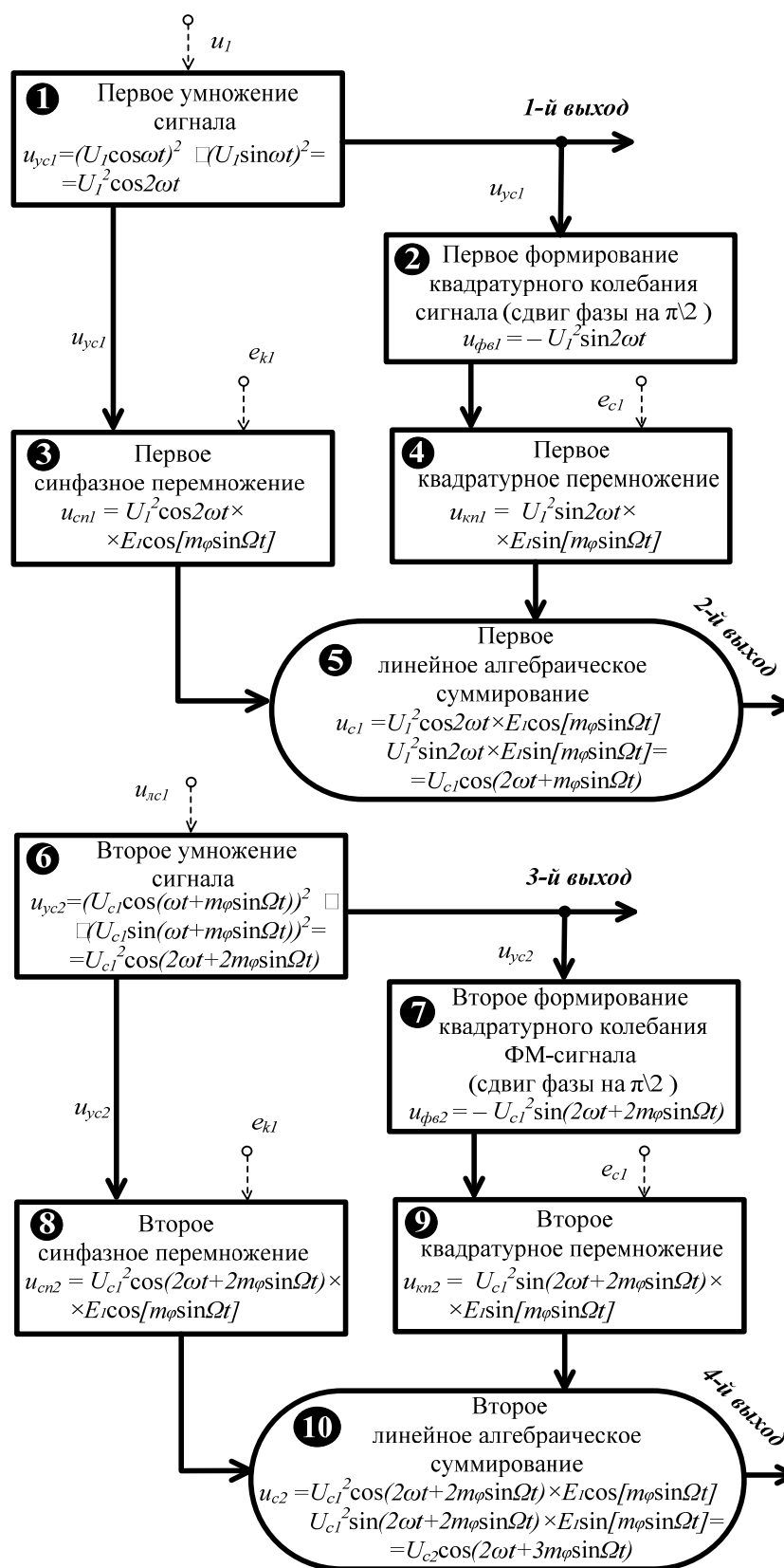


Рис. 2. Способ повышения индекса угловой модуляции одновременно на первой, второй и третьей гармониках колебания несущей частоты

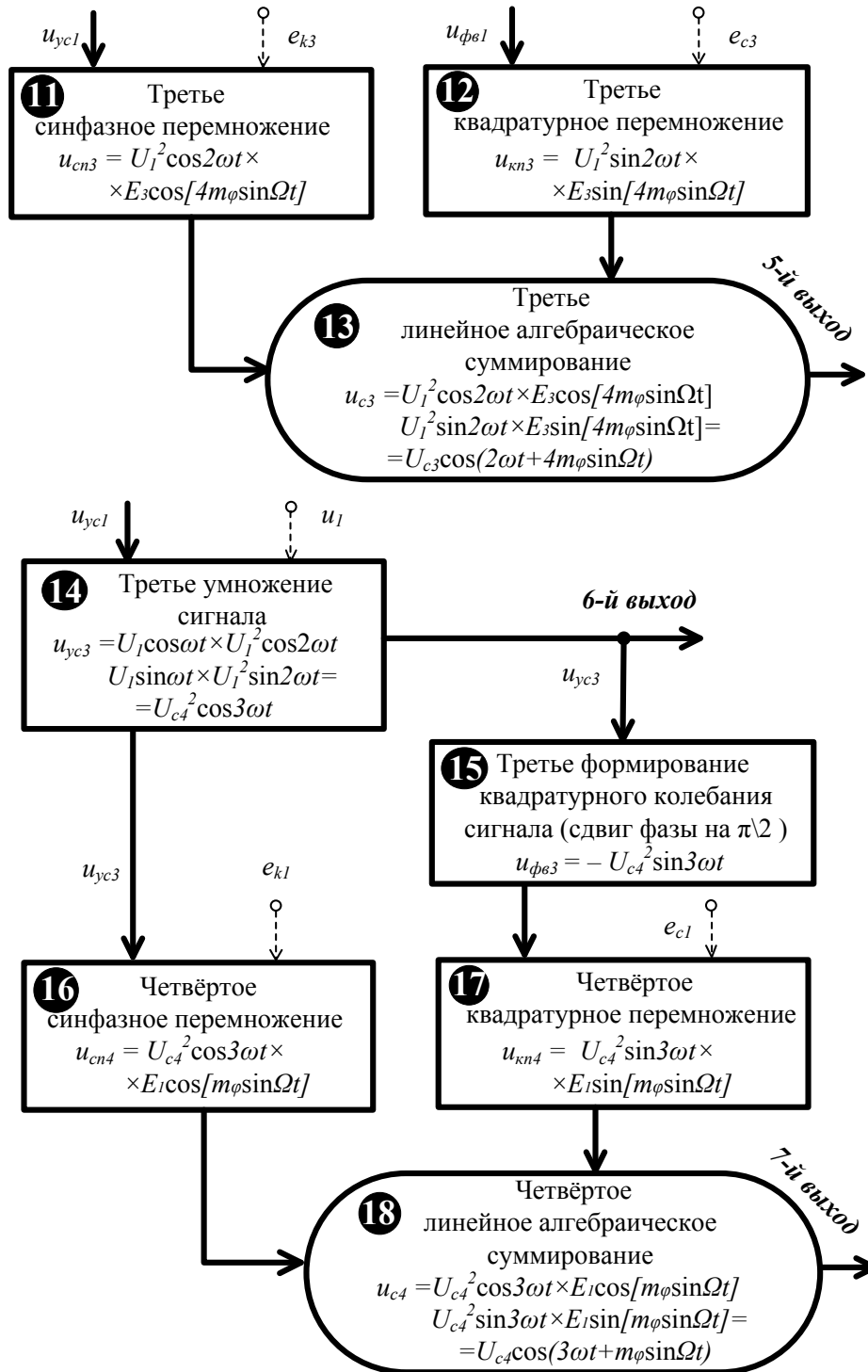


Рис. 2 (продолжение)

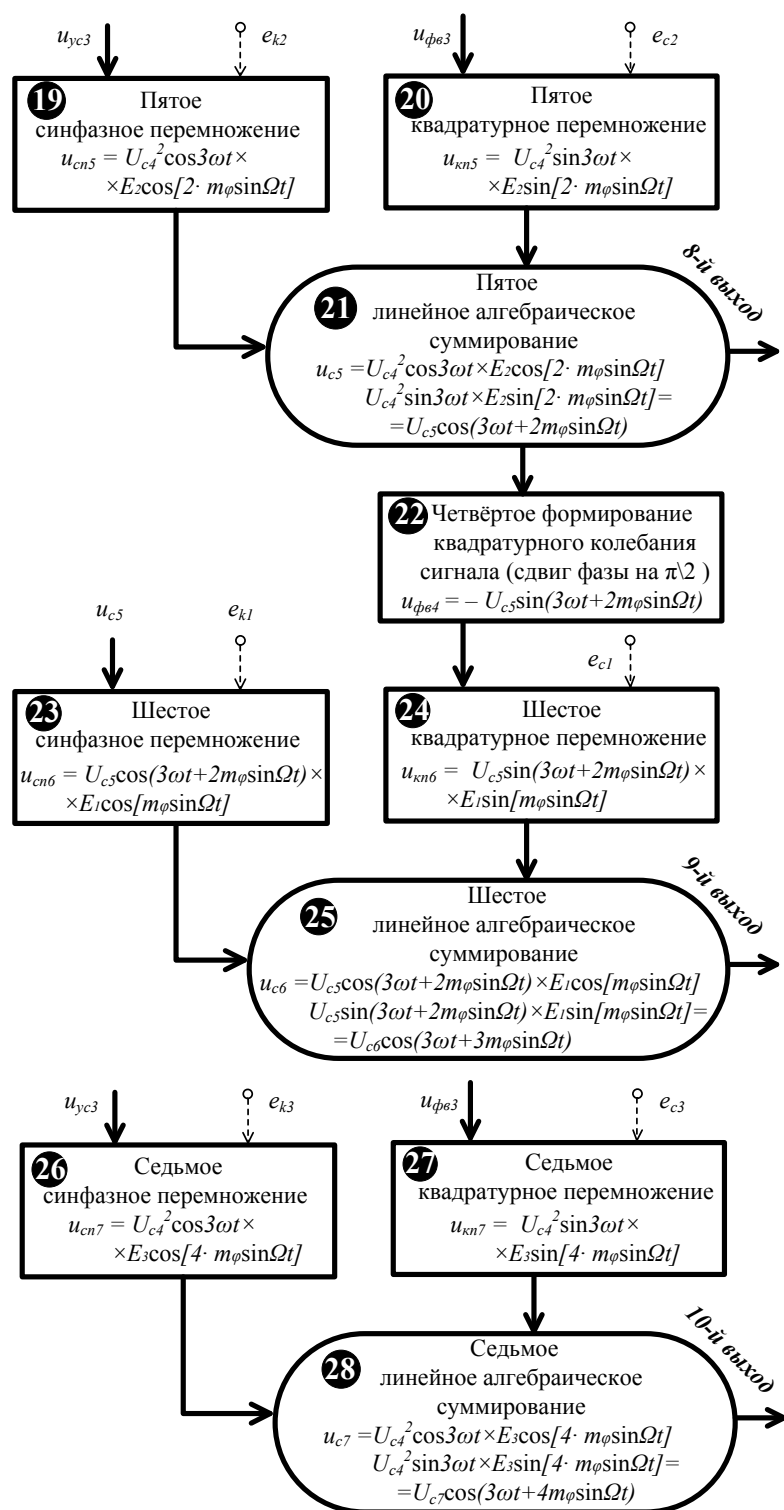


Рис. 2 (окончание)

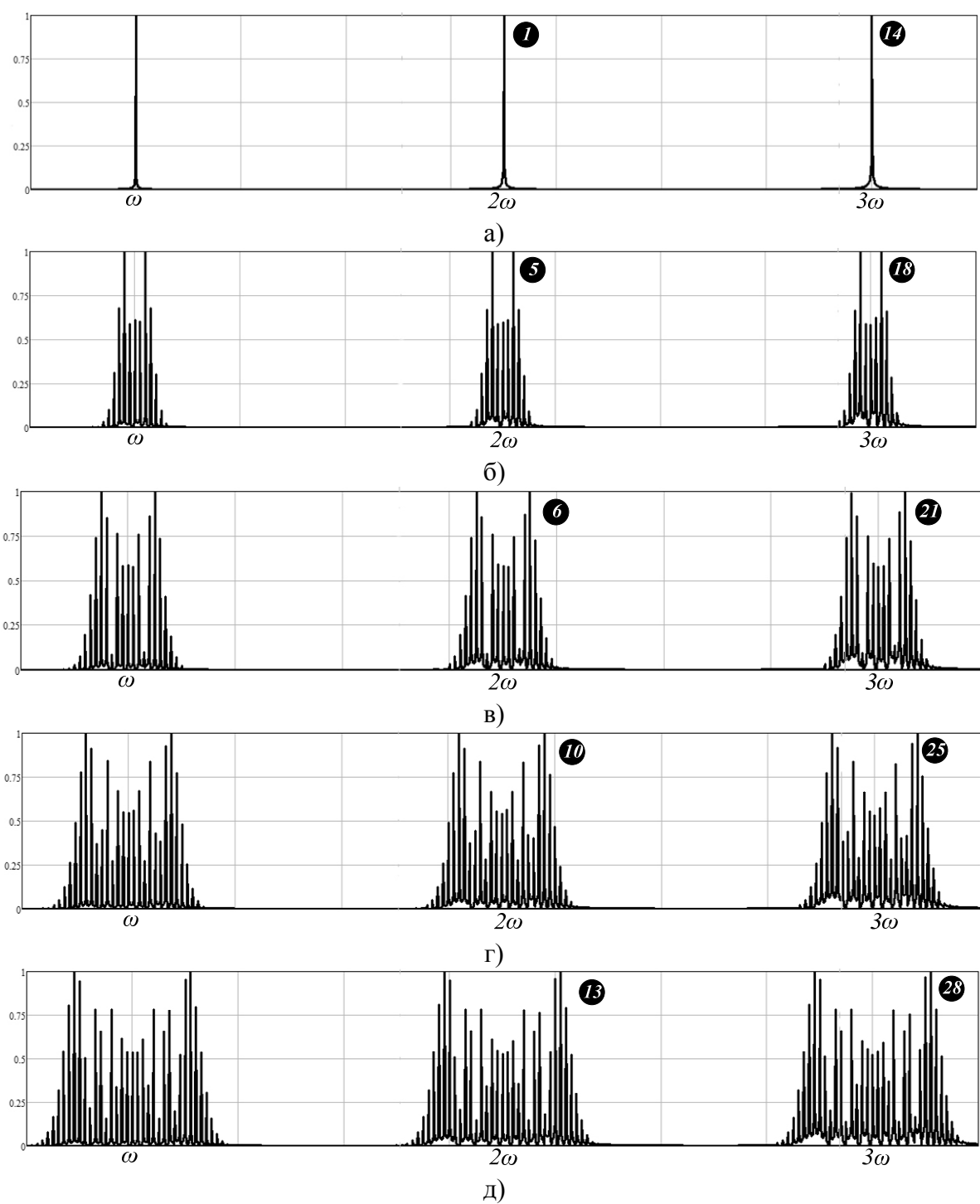


Рис. 3. Этапы моделирования способа повышения индекса угловой модуляции

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов В.И. Радиосвязь в условиях радиоэлектронной борьбы. — Воронеж: ВНИИС, 2002. — 403 с.
2. Цветнов В.В., Демин В.П., Куприянов А.И. Радиоэлектронная борьба: радио-разведка и радиопротиводействие. — М.: Изд-во МАИ, 1998. — С. 112—117.
3. Патент на изобретение RU 2283540 С2, Н 04 К 3/00. Способ радиоэлектронного подавления сигналов радиоприемных устройств управления минно-взрывными устройствами / М.Л. Артёмов, В.А. Калугин, Ю.Н. Куликов, В.И. Николаев. — № 2004101310/09; заявл. 15.01.2004; опубл. 10.09.2006. — Бюл. №25.
4. Патент на изобретение RU 2292059 С1, Н 04 К 3/00, G 01 S 7/38. Станция прицельных помех радиоприемным устройствам управления взрывными устройствами / Н.И. Козачок, В.И. Николаев, И.Ю. Слепов, Н.С. Федяев, А.А. Чаплыгин. — № 2005131642/09; заявл. 12.10.2005; опубл. 20.01.2007. — Бюл. № 2.
5. Палий А.И. Радиоэлектронная борьба: (Средства и способы подавления и защиты радиоэлектронных систем). — М.: Воениздат, 1981. — 320 с.
6. Armstrong E.M. A Method of Reducing Disurbance in Radio-Signaling by a System of Frequency Modulation. — Proc. IRE, 1936. — V.24. — № 5. — P. 689.
7. Гоноровский И.С. Частотная модуляция и её применение. — М.: Государственное издательство литературы по вопросам связи и радио, 1948. — С. 113—115.
8. Артым А.Д. Теория и методы частотной модуляции. — М.; Л.: Госэнергоиздат, 1961. — С. 103.
9. Квадратурные формирователи радиосигналов: монография / Попов П.А. [и др.]; под ред. П.А. Попова. — Воронеж: Воронежский институт МВД России, 2001. — 176 с.
10. Шерстюков С.А. Метод повышения девиации фазы (частоты) в квадратурных формирователях радиосигналов с угловой модуляцией // Синхроинфо-2011: материалы международного научно-технического семинара «Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов в инфокоммуникациях», 27—30 июня 2011 г., Одесса / под ред. чл.-корр. РАН В.В. Шахгильдяна. — М.: ООО «Брис-М» оперативная полиграфия и дизайн-студия, 2011. — С. 37—40.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Шерстюков Сергей Анатольевич. Профессор кафедры инфокоммуникационных систем и технологий. Кандидат технических наук, доцент.

Воронежский институт МВД России.

E-mail: sergesher@rambler.ru.

Россия, 394065, Воронеж, проспект Патриотов, 53. Тел. 8-910-345-33-15.

Sherstyukov Sergey Anatolyevich. Professor of the chair of information and communication systems and technologies. Candidate of technical sciences, assistant professor.

Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of Russia.

Work address: Russia, 394065, Voronezh, Prospekt Patriotov, 53. Tel. 8-910-345-33-15.

Ключевые слова: квадратурный формирователь радиосигналов; индекс угловой модуляции; система подавления радиоприемных устройств управления взрывными устройствами.

Key words: quadrature shaper radio; angular modulation index; suppression system of radio control explosive devices.

УДК 621.396.62