

# ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ АСИНХРОННО-АДРЕСНЫХ РАДИООХРАННЫХ СИСТЕМ

*П. Зуев*  
*технический директор НПО "Центр-Протон"*

В настоящее время, наряду с традиционными системами охраны объектов с использованием телефонных линий связи, начали широко применяться системы с использованием радиосвязи – т. н. радиоохранные системы. Благодаря невысокой стоимости оборудования и скорости развертывания, радиоохранные системы особенно широкое распространение получили в слабо телефонизированных сельских местностях. Спецификой радиоохранных систем является использование преимущественно одной выделенной рабочей частоты для передачи сообщений от любого из охраняемых объектов на центральную станцию мониторинга (ЦСМ).

В большинстве радиоохранных систем используется односторонняя связь, при которой радиоприемник ЦСМ принимает сообщения от многих охраняемых объектов, оборудованных радиопередающими устройствами, включаемыми только на время передачи сообщений. В передаваемом сообщении содержится информация об индивидуальном адресе объекта, поэтому такие системы принято называть асинхронно-адресными.

Эффективность асинхронно-адресных систем можно характеризовать максимальным количеством охраняемых объектов при заданной вероятности  $P_{\text{н}}$  неприема сообщения от любого из охраняемых объектов в часы пик. Для диагностики радиоканалов в остальное время суток часто используется передача с определенной периодичностью тестовых сообщений от всех или части охраняемых объектов.

В процессе работы асинхронно-адресной системы происходят наложения по времени сообщений от разных охраняемых объектов. В зависимости от соотношения уровней сигналов, одновременно принимаемых ЦСМ от разных объектов, возможны следующие ситуации:

- будет принят более сильный сигнал, а слабый – потерян вследствие забития более сильным сигналом;
- не будет принят ни один из сигналов.

Для повышения надежности доставки сообщения в условиях мешающего влияния сообщений от других объектов асинхронно-адресной системы, применяют многократный повтор каждого сообщения, что увеличивает занятость  $G$  радиоканала и, при определенных условиях, может привести к обратному результату – снижению надежности доставки сообщения.

В связи с этим представляет интерес анализ потенциальных возможностей асинхронно-адресных систем, т. е. нахождение оптимальных параметров конфигурации.

Вероятность неприема ЦСМ одиночного сообщения с малым уровнем сигнала зависит от занятости радиоканала. Занятость радиоканала в реальных радиоохранных системах зависит от времени суток и определяется частотой (плотностью) потока сообщений от охраняемых объектов. Суммарная частота потока сообщений от охраняемых объектов равна сумме частот потока информационных сообщений (имеющего большую суточную неравномерность) и потока тестовых сообщений, средняя плотность которых обычно постоянна в течение суток.

Приняв математическую модель равномерного распределения информационных сообщений от всех  $N$  объектов системы в течение  $A$  часов пик, можно записать для средней частоты  $F_{\text{и}}^{\text{max}}$  потока информационных сообщений в часы пик:

$$F_{\text{и}}^{\text{max}} = b \frac{N}{A}, \quad (1)$$

где  $N$  – общее количество объектов в системе;  $b$  – количество повторов каждого информационного сообщения от объекта;  $F_{\text{и}}^{\text{max}}$  – частота, 1/ч.

Если охраняемые объекты эксплуатируются с тестированием каналов связи, то средняя частота  $F_{\text{т}}$  потока тестовых сообщений по системе в целом будет равна:

$$F_{\text{т}} = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{T_i}, \quad (2)$$

где  $C_i$  – количество повторов отдельного тестового сообщения в одном тестовом "пакете";  $T_i$  – период повторения тестовых "пакетов", ч;  $i$  – номер объекта;  $n$  – количество объектов, работающих с тестированием каналов связи ( $n \leq N$ ).

Общая суммарная частота  $F_{\Sigma}^{\text{MAX}}$  потока сообщений в часы пик:

$$F_{\Sigma}^{\text{MAX}} = F_{\text{и}}^{\text{MAX}} + F_{\text{т}} = b \frac{N}{A} + \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{T_i} \quad (3)$$

Для рассматриваемых далее вероятностей доставки сообщения любого из объектов системы принято, что суммарная частота мешающих для этого объекта сообщений равна частоте  $F_{\Sigma}$  суммарного потока сообщений в системе. При  $N \gg 1$  это вполне допустимо и не приведет к большой ошибке. Кроме того, для упрощения анализа принято, что длительность  $t_c$  информационных и тестовых сообщений одинакова. В реальных системах оба эти условия, как правило, выполняются.

В силу статистической независимости моментов прихода сообщений на ЦСМ от разных объектов, суммарный поток сообщений подчиняется закону Пуассона. В соответствии с этим законом вероятность неприема  $P_{\text{но}}$  любого одиночного сообщения длительностью  $t_c$  и малым уровнем сигнала в условиях мешающего действия аналогичных сигналов более высокого уровня с такой же длительностью  $t_c$ :

$$P_{\text{но}} = 1 - \exp(-2 F_{\Sigma} \cdot t_c), \quad (4)$$

где  $t_c$  – длительность одиночного сообщения, выраженная в часах;  $F_{\Sigma}$  – частота суммарного потока сообщений, 1/ч.

Информационное сообщение от любого из объектов считается не принятым ЦСМ в случае неприема всех  $b$  отдельных одинаковых информационных сообщений объекта. С учетом независимости событий неприема одиночных сообщений, для сложного события неприема  $b$  сообщений можно записать:

$$P_{\text{ни}} = (P_{\text{но}})^b = [1 - \exp(-2 F_{\Sigma} \cdot t_c)]^b, \quad (5)$$

где  $P_{\text{ни}}$  – вероятность неприема информационного сообщения с малым уровнем сигнала от любого из объектов при  $b$  повторях сообщения.

Из (5) следует формула для нижней оценки максимальной суммарной частоты  $F_{\Sigma}^{\text{MAX}}$  потока сообщений в системе в часы пик при заданной вероятности  $P_{\text{ни}}$  неприема информационного сообщения от каждого из объектов:

$$F_{\Sigma}^{\text{MAX}} = \frac{-\ln(1 - P_{\text{ни}}^{1/b})}{2t_c}. \quad (6)$$

Средняя частота  $F_{\text{ни}}$  потока не принятых информационных сообщений от всех  $N$  объектов системы в часы пик для принятой математической модели процесса может быть ориентировочно определена по формуле:

$$F_{\text{ни}} \approx N \frac{P_{\text{ни}}}{A} = \frac{N[1 - \exp(-2 F_{\Sigma}^{\text{MAX}} \cdot t_c)]^b}{A}. \quad (7)$$

Физически  $F_{\text{ни}}$  равна среднему количеству не принятых информационных сообщений от всех объектов системы в течение одного часа пик.

Если принять, что все  $N$  объектов системы эксплуатируются в режиме тестирования радиоканала с одинаковыми периодами  $T_t$  повторения, с одинаковым количеством  $C$  импульсов в тестовом "пакете", а критерием неприема тестового сообщения является отсутствие приема подряд  $d$  тестовых сообщений в течение времени не менее  $d \frac{T_t}{C}$ , то можно записать для частоты  $F_{\text{нт}}$  потока не принятых тестовых сообщений:

$$F_{\text{нт}} = \frac{NCP_{\text{нт}}}{d \cdot T_t} = \frac{NC[1 - \exp(-2 F_{\Sigma}^{\text{MAX}} \cdot t_c)]^d}{d \cdot T_t}. \quad (8)$$

Формулы (5)–(8) получены в предположении, что сигналы от любого из объектов, кроме сигнала от рассматриваемого объекта, являются мешающими приему рассматриваемого слабого сигнала. Реально для сигналов высокого уровня от части объектов системы оценка  $P_{\text{ни}}$  по (5) будет завышенной, т. к. сигналы низкого уровня от другой части объектов системы не будут мешать приему сигналов высокого уровня. Следовательно, оценки  $F_{\text{ни}}$  и  $F_{\text{нт}}$  являются несколько завышенными. Но детальные расчеты показывают, что учет реального распределения уровней сиг-

налов в системе очень слабо влияет на последующие количественные оценки вероятностных характеристик системы.

Одной из главных характеристик асинхронно-адресной радиоканальной системы является максимальное количество объектов  $N_{\text{MAX}}$ , которое можно взять под охрану на одной выделенной рабочей частоте. Покажем, что при заданном значении вероятности  $P_{\text{ни}}$  неприема сообщения от любого объекта в часы пик существует оптимальное количество  $b_{\text{опт}}$  повторов сообщений, при котором обеспечивается охрана наибольшего количества объектов  $N_{\text{MAX}}$ . Для упрощения анализа положим, что режим тестирования радиоканалов в системе не используется, т. е.  $F_{\text{т}} = 0$ , а  $F_{\Sigma}^{\text{MAX}} = F_{\text{и}}^{\text{MAX}}$ . Тогда из (6) следует, что максимальное количество  $N_{\text{MAX}}$  объектов равно:

$$N_{\text{MAX}} = \frac{A F_{\text{и}}^{\text{MAX}}}{b} = \frac{-A \ln(1 - P_{\text{ни}}^{1/b})}{2b t_c}. \quad (9)$$

Условием максимума функции (9) является равенство нулю ее производной по  $b$ :

$$N'_{\text{MAX}} = \frac{A \left[ \ln(1 - P_{\text{ни}}^{1/b}) - \frac{P_{\text{ни}}^{1/b}}{1 - P_{\text{ни}}^{1/b}} \ln P_{\text{ни}}^{1/b} \right]}{2b^2 t_c} = 0. \quad (10)$$

Но  $P_{\text{ни}}^{1/b} = P_{\text{но}}$ , и условие (10) можно записать:

$$\frac{P_{\text{но}}}{(1 - P_{\text{но}})} = \frac{\ln(1 - P_{\text{но}})}{\ln P_{\text{но}}}. \quad (11)$$

Решением (11) является  $P_{\text{но}} = 0,5$  или  $P_{\text{ни}}^{1/b} = 0,5$  и:

$$b_{\text{опт}} = - \frac{\ln P_{\text{ни}}}{\ln 2}. \quad (12)$$

Подставляя (12) в (9), после элементарных преобразований получим максимальное значение  $N$ :

$$N_{\text{MAX}} = \frac{-A(\ln 2)^2}{2t_c \ln P_{\text{ни}}} = \frac{A E_N}{t_c}, \quad (13)$$

где  $E_N = - \frac{(\ln 2)^2}{2 \ln P_{\text{ни}}}$  – оптимальный коэффициент эффективности системы по количеству объектов при  $b_{\text{опт}}$ ;  $t_c$  – длительность одиночного сообщения, ч.

Как и следовало ожидать, максимальное количество  $N_{\text{MAX}}$  объектов, которое можно охранять при заданной вероятности  $P_{\text{ни}}$ , оказалось прямо пропорциональным длительности  $A$  часов пик и обратно пропорциональным длительности  $t_c$  одиночного сообщения.

В таблице 1 приведены зависимости  $b_{\text{опт}}$  и  $E_N$  от заданной вероятности  $P_{\text{ни}}$  неприема сообщения в час пик.

Таблица 1

$P_{\text{ни}}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$
$b_{\text{опт}}$	$\approx 20$	$\approx 17$	$\approx 13$	$\approx 10$
$E_N$	0,0175	0,021	0,026	0,035

Из таблицы 1 следует общая закономерность: чем ниже допускаемая вероятность  $P_{\text{ни}}$  неприема сообщения, тем больше требуемое количество повторов  $b_{\text{опт}}$  и тем меньше количество объектов  $N_{\text{MAX}}$ , которое можно эксплуатировать в системе без риска увеличения  $P_{\text{ни}}$ .

Детальные расчеты показывают, что максимум зависимости  $N_{\text{MAX}}$  от  $b$  – не острый: отклонение от  $b_{\text{опт}}$  на  $\pm 30\%$  слабо влияет на величину  $N_{\text{MAX}}$ , поэтому для диапазона допускаемых вероятностей от  $10^{-6}$  до  $10^{-3}$  можно рекомендовать  $b \approx 12-16$ .

Интересно отметить, что оптимальной вероятности  $P_{\text{но}} = 0,5$ , соответствующей  $N_{\text{MAX}}$ , отвечает оптимальное значение занятости радиоканала  $G_{\text{опт}}$  (в эрлангах):

$$G_{\text{опт}} = F_{\Sigma}^{\text{MAX}} \cdot t_c = b_{\text{опт}} \cdot E_N = 0,5 \ln 2 = 0,347 \text{ (35\%)}. \quad (14)$$

Как увеличение, так и уменьшение занятости  $G$  радиоканала относительно  $G_{\text{опт}} = 0,347$ , приводит, при заданной вероятности  $P_{\text{ни}}$ , к уменьшению  $N_{\text{MAX}}$ .

Использование при работе системы режима тестирования каналов связи повышает общую занятость радиоканала, что при заданной вероятности неприема  $P_{ни}$  требует уменьшения  $N_{макс}$ . Степень уменьшения  $N_{макс}$  зависит от соотношения  $F_T$  и  $F_{и}^{макс}$  в часы пик и при неправильной конфигурации может быть весьма существенной.

Общие закономерности конфигурирования асинхронно-адресных радиоохранных систем покажем на примере расчета вероятностных характеристик ( $F_{\Sigma}^{макс}$ ,  $N_{макс}$ ,  $F_{ни}$ ,  $F_{нт}$ ) радиосистемы передачи извещений охранно-пожарной сигнализации (РПИОС) "Радиус", выпускаемой НПО "Центр-Протон", в зависимости от требуемой вероятности неприема информационных сообщений  $P_{ни}$  в часы пик и заданных значений периода повторений  $T_T$  тестовых сообщений, одинаковых для всех  $N$  объектов системы.

Расчет выполнен для  $A=1$  ч,  $b=12$ ,  $C=2$ ,  $d=12$ ,  $t_c=0,16$ с = 0,000044ч и равномерного закона распределения информационных сообщений от всех  $N$  объектов системы в течение одного часа пик, т.е.  $F_{и}^{макс} = bN_{макс}$ .

Результаты расчетов приведены в таблице 2.

Таблица 2

$T_T$ ч; мин	$P_{ни}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$
	$P_{но}$	0,316	0,383	0,464	0,562
$F_{\Sigma}^{макс}$ , 1/ч	4272	5432	7015	9287	
$\infty$ (выкл)	$N_{макс}$	356	452	584	774
	$F_{ни}$	0,00035	0,0045	0,058	0,77
	$F_{нт}$	0	0	0	0
3 ч	$N_{макс}$	336	428	553	733
	$F_{ни}$	0,00033	0,0043	0,055	0,73
	$F_{нт}$	0,00002	0,0002	0,003	0,04
2 ч	$N_{макс}$	328	417	539	714
	$F_{ни}$	0,00033	0,0042	0,054	0,71
	$F_{нт}$	0,00003	0,0003	0,004	0,06
1 ч	$N_{макс}$	305	387	500	663
	$F_{ни}$	0,00030	0,0039	0,050	0,66
	$F_{нт}$	0,00005	0,0006	0,008	0,11
30 мин	$N_{макс}$	267	339	438	580
	$F_{ни}$	0,00026	0,0034	0,044	0,58
	$F_{нт}$	0,00009	0,0011	0,014	0,19
20 мин	$N_{макс}$	238	302	390	516
	$F_{ни}$	0,00024	0,0030	0,039	0,52
	$F_{нт}$	0,00012	0,0015	0,019	0,25
10 мин	$N_{макс}$	178	226	292	387
	$F_{ни}$	0,00018	0,0023	0,029	0,39
	$F_{нт}$	0,00017	0,0022	0,029	0,38
5 мин	$N_{макс}$	119	151	195	258
	$F_{ни}$	0,00012	0,0015	0,0195	0,26
	$F_{нт}$	0,00024	0,0030	0,039	0,51
3 мин	$N_{макс}$	82	104	134	178
	$F_{ни}$	0,00008	0,0010	0,013	0,18
	$F_{нт}$	0,00027	0,0035	0,045	0,59
1 мин	$N_{макс}$	32	41	53	70
	$F_{ни}$	0,00003	0,0004	0,0053	0,07
	$F_{нт}$	0,00032	0,0041	0,053	0,70

Из анализа таблицы 2 следует, что функциональная надежность системы зависит от организации процесса охраны, принятой на предприятии, эксплуатирующем радиоохранную систему. Максимально допустимое количество  $N_{макс}$  охраняемых объектов за-

Таблица 3

$N$	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
$F_{ни}$ , 1/ч	$1,1 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	0,08	0,31	1,0	2,7	6,3

висит от допускаемой частоты неприема информационных  $F_{ни}$  и тестовых  $F_{нт}$  сообщений в часы пик.

Если при эксплуатации системы стоит задача охраны наибольшего количества объектов при сохранении функции тестирования каналов связи, то при конфигурировании системы необходимо обеспечить для часов пик выполнение условия  $\frac{F_T}{F_{и}^{макс}} \leq 0,3$  (оптимально 0,1–0,3). Если это условие выполнено, то степень уменьшения  $N_{макс}$  будет не более 25% относительно режима работы системы без тестирования.

В остальное время суток (вне часов пик) частота  $F_{и}$  потока информационных сообщений падает, и  $F_{\Sigma}$  будет примерно равна частоте потока  $F_T$  тестовых сообщений. При этом резко (в сотни и тысячи раз!) уменьшается вероятность неприема сообщений. Практически это означает, что все случаи неприема как информационных, так и тестовых сообщений будут приходиться на часы пик.

Представляет практический интерес характер зависимости  $F_{ни}$  от количества объектов  $N$  в системе. В таблице 3 приведена такая зависимость для  $b=12$ ;  $t_c=0,16$ с;  $T_T=\infty$ , рассчитанная по (7) при  $F_{\Sigma} = bN$ , что соответствует  $A=1$  ч.

Из таблицы 3 виден очень крутой характер зависимости. Например, при увеличении  $N$  с 600 до 700 объектов (на 17%), частота неприема информационных сообщений возрастает в 4 раза. Это позволяет в процессе наращивания количества  $N$  охраняемых объектов при эксплуатации системы остановиться на таком его значении, которое является приемлемым из технико-экономических соображений.

Необходимо отметить, что данные таблицы показывают общие закономерности и рекомендуются для общей ориентировки при конфигурировании РПИОС "Радиус". В каждой конкретной радиоохранной системе существуют индивидуальные особенности охраняемых объектов, фактические статистические временные характеристики распределения потоков информационных сообщений, своя статистическая картина распределения уровней сигналов и т. п. По этой причине  $N_{макс}$  может отличаться от данных таблицы 2 как в сторону увеличения, так и уменьшения, что уточняется в процессе эксплуатации конкретной радиоохранной системы.

В результате проведенного анализа можно сформулировать следующие общие **рекомендации по конфигурированию асинхронно-адресных радиоохранных систем.**

- При выборе требуемых величин  $P_{ни}$ ,  $F_{ни}$ ,  $F_{ит}$  следует исходить из общего планируемого количества  $N$  охраняемых объектов, их типа (магазины, квартиры, гаражи, офисы и т.д.), общей площади обслуживаемой системой территории, количества групп реагирования и реального времени реагирования этих групп. При наращивании количества охраняемых объектов в системе рекомендуется выбирать такие объекты, у которых часы пик разнесены по времени. Это позволяет увеличить  $N_{max}$  без ухудшения остальных эксплуатационных характеристик системы.
- Следует, по возможности, избегать использования функции тестирования радиоканалов для охранных целей, так как это резко увеличивает занятость радиоканала  $G$  и вероятности  $P_{н}$  неприема информационных и тестовых сообщений.
- Минимальный период тестирования  $T_t$  порядка (1–3) мин следует использовать при небольшом общем количестве объектов  $N$  и только для охраны важных объектов или удаленных объектов с антенной, установленной вне охраняемой зоны. Общее количество объектов с таким периодом тестирования должно быть минимальным.
- При охране важных объектов должно быть обеспечено большее значение уровня сигнала, принимаемого ЦСМ от таких объектов (например, путем использования направленных антенн с большим коэффициентом усиления и их установкой на

большой высоте). Это резко повышает надежность доставки сообщений, уменьшая экономический риск.

- Если планируется охрана большого количества объектов, антенны объектовых устройств рекомендуется размещать внутри охраняемых зон, а период повторения тестовых сообщений  $T_t$  устанавливать не менее 30 минут.
- При хороших возможностях быстрого реагирования допускаются большие значения  $P_{ни}$  ( $10^{-4}$ – $10^{-3}$ ). Это позволит, при прочих равных условиях, увеличить максимальное количество охраняемых объектов  $N_{max}$ . При недостаточных возможностях быстрого реагирования рекомендуется принимать меньшие значения  $P_{ни}$  ( $10^{-6}$ – $10^{-5}$ ) и использовать меньшие значения  $T_t$ , что приведет к уменьшению максимального количества  $N_{max}$  охраняемых объектов.
- В процессе развертывания системы (наращивания количества охраняемых объектов  $N$ ) необходимо анализировать частоты неприема информационных  $F_{ни}$  и тестовых  $F_{ит}$  сообщений, которые являются интегральными показателями функциональной надежности, учитывающими все эксплуатационные факторы. При достижении предельных  $F_{ни}$  и  $F_{ит}$  на одной рабочей частоте дальнейшее наращивание количества охраняемых объектов возможно только на дополнительных выделенных рабочих частотах.

## РАДИООХРАНА ОБЪЕКТОВ

### Разработка и производство систем охранно-пожарной сигнализации с передачей сообщений на ПЦН по радиоканалу.

#### Центральная станция мониторинга

- "Радиус-1000" — охранный и пожарный мониторинг стационарных объектов. Мониторинг до 1000 объектов.

#### Приборы приемно-контрольные охранно-пожарные:

- "Радиус-3Д" — автономная и централизованная охрана объектов. Прибор имеет пожарный шлейф с автоматическим пересбросом питания, возможно использование в автономном режиме с автоматическим дозвонивателем.
- "Радиус-РС" — передача информации о состоянии охранных и пожарных шлейфов. Возможно самостоятельное программирование параметров потребителем.
- "Радиус-Агат" — концентратор предназначен для передачи информации о состоянии шлейфов по интерфейсу RS 485. Подключение до 100 объектов.

#### Передатчик тревожных сообщений:

- "Радиус-микро"/160 — передача информации с эксплуатируемых систем ОПС по радиоканалу на частотах 160 МГц; 450 МГц

#### НОВИНКА!!

Автоматический дозвониватель осуществляет передачу речевых сообщений о состоянии объекта по телефонным линиям. Возможность программирования длительности паузы между набором цифр и началом сообщения, количества попыток дозвона и продолжительности воспроизведения.



454006, г. Челябинск, ул. Российская, 67, оф.1206  
 тел/факс (3512) 669-657, 669-658, 669-664  
 e-mail: cproton@chel.surnet.ru; www.center-proton.ru

