

© Сергеев И.А.
Sergeev I.A.

ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТНО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИРКУЛЯРНОЙ ПЕРЕДАЧИ КОРОТКИХ ПАКЕТОВ В КОРОТКОВОЛНОВОЙ РАДИОСЕТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ «МЕДЛЕННОЙ» ППРЧ

ESTIMATION OF PROBABILISTIC-TIME FEATURES OF THE CIRCULAR ISSUE OF SHORT PACKET IN HIGH-FREQUENCY RADIO NETWORK WITH THE USE OF "SLOW" FHSS MODE

Аннотация. Представлен методический аппарат оценивания вероятностно-временных характеристик циркулярной передачи коротких пакетов в КВ радиосети с использованием режима «медленной» ППРЧ, позволяющий учитывать количество используемых частот в частотно-временной матрице и заданное число корреспондентов, принимающих пакет.

Annotation. It was presented the methodical system of estimation of probabilistic-time features of the circular issue of short package in high-frequency radio network with the "slow" FHSS mode, allowing to take into account the amount of used frequencies in frequency-time matrix and assigned amount of correspondents taking the packet.

Ключевые слова. Вероятностно-временные характеристики, коротковолновая радиосвязь, программная перестройка рабочей частоты, пакет, частотно-временная матрица.

Key words. Probabilistic-time features, high-frequency radio communication, FHSS (frequency hopping spread spectrum) mode, packet, frequency-time matrix.

Режим передачи с использованием «медленной» программной (иначе – псевдослучайной) перестройки рабочей частоты (ППРЧ) находит широкое применение в коротковолновой (КВ) радиосвязи как эффективный способ борьбы с замираниями и случайными помехами, присущими КВ каналам, а также с радиоэлектронным подавлением (РЭП) радиолиний.

В частности, в режиме ППРЧ может передаваться служебная информация: заявки на организацию радиосвязи, тестовые последовательности с целью поиска аппаратурой частотной адаптации пригодной для работы частоты, либо осуществляется передача собственно информации пользователей [1]. В последнем случае должна обеспечиваться случайность (с точки зрения постановщика помех) выбора частот из числа выделенных и ограниченное время их использования для ухода от прицельной (по частоте) помехи [2].

Вариантом использования режима ППРЧ в КВ радиосвязи, анализируемым в статье, является циркулярная

передача сообщения ограниченного объема (пакета данных) последовательно на выделенных частотах с целью повышения вероятности его доведения до всех заинтересованных корреспондентов сети.

Для оценки эффективности радиолиний с ППРЧ могут использоваться различные показатели. Наиболее распространенными являются вероятность ошибки на символ передаваемой информации $P_{ош}$ [2, 3] и надежность $P_{св}$ связи с вероятностью ошибки не выше допустимой [4]

$$P_{св}(P_{ош} \leq P_{ош. доп}) = \frac{\bar{\tau}}{\bar{\tau} + \theta},$$

где $\bar{\tau}$ и $\bar{\theta}$ – средние значения длительностей τ работоспособных (в течение которых выполняются требования по достоверности передачи) и θ неработоспособных (в обратном случае) состояний канала.

Представленные показатели, характеризующие помехоустойчивость радиолинии, не учитывают одного из основных требований, предъявляемых к ней – сво-

Сергеев Игорь Александрович – кандидат технических наук, заместитель начальника отдела 4 ЦНИИ Минобороны России, тел. 519-78-17.

Sergeev Igor Alexandrovich – the candidate of technical sciences, deputy director of division, 4 CSRI of Ministry of Defense, Russian Federation, tel. 519-78-17.

временности процесса прохождения (передачи) по радиолинии сообщений необходимого объема. Поэтому более общей характеристикой процесса передачи может считаться время от поступления сообщения в радиолинию для передачи до окончания его успешного приема корреспондентом – время передачи T_{nep} , а в качестве интегрального показателя эффективности работы радиолинии с ППРЧ – вероятностно-временная характеристика (ВВХ) указанного процесса – вероятность $P(t_{nep} \leq t)$ передачи (доставки) сообщения за заданное время t при обеспечении требуемой достоверности $P_{out} \leq P_{out\ доп}$.

Для оценки ВВХ рассматриваемого варианта передачи при доведении информации до одного корреспондента частично могут быть применены результаты, полученные в работах [1, 5], однако характеристики передачи в них оцениваются упрощенно, в частности, в предположении о независимости передач на различных частотах, что эквивалентно допущению об их достаточно большом (неограниченном) количестве. Задача нахождения ВВХ доведения информации до нескольких корреспондентов рассматривалась в работе [6], но удобного для анализа и применения аналитического решения в ней не представлено.

Настоящая статья посвящена получению аналитических выражений для оценки вероятности циркулярной передачи сообщения небольшого объема (пакета) корреспондентам сети за заданное время с учетом ограниченного количества N используемых частот и заданного числа M корреспондентов, принимающих пакет. При этом полагаем, что время передачи T_{nep} включает время однократной передачи сообщения с заданной технической скоростью и время, затрачиваемое на необходимое число повторных передач для успешного приема сообщения, а очередь передаваемых сообщений отсутствует.

Особенностью КВ радиосетей является зависимость условий прохождения радиосигнала на различных частотах от протяженности радиотрасс. Поэтому для охвата радиосетью заданного числа пространственно разнесенных корреспондентов должна назначаться группа частот в некотором диапазоне их значений, определяемом расчетным или расчетно-экспериментальным путем для удовлетворения различных требований по прохождению радиоволн.

В условиях ограниченного количества выделяемых для радиосети частот возможны различные варианты реализации ППРЧ. Далее рассматриваются некоторые из них, соответствующие применению на каждом цикле использования частотно-временной матрицы (ЧВМ) по одному разу всех N выделенных для радиосети частот и

характеризующиеся при перестройках по заданной программе:

- неизменностью вида ЧВМ от цикла к циклу («регулярная» ЧВМ);
- изменением от цикла к циклу порядка следования частот ЧВМ по псевдослучайному закону («случайная» ЧВМ).

Первоначально определим ВВХ передачи короткого пакета заданной длительности $T_{нак}$ с использованием режима ППРЧ между двумя корреспондентами.

Пусть время передачи пакета $T_{nep.i}$ с использованием каждой очередной i -й частоты включает время T_f затрачиваемое радиосредствами (РЭС) на синхронную перестройку частот по заданной программе (при передаче на первой частоте – настройку на первую частоту), а также время излучения на выбранной частоте, равное длительности пакета $T_{нак}$. Количество L попыток передач до момента окончания успешного приема может быть не связано с количеством выделенных частот N , то есть возможна успешная передача в течение первого цикла ЧВМ, когда $1 \leq L \leq N$, либо за несколько (включая, кроме первого, k дополнительных) полных или неполных циклов ЧВМ, тогда $N < L \leq (k+1)N$.

Время процесса передачи пакета до окончания его успешного приема на одной из частот составит

$$T_{nep} = \sum_{i=1}^L T_{nep.i} = \sum_{i=1}^L (T_f + T_{нак})_i, \quad (1)$$

где в общем случае $L = \overline{1, \infty}$.

Следуя [1, 5], при постоянстве составляющих $T_{nep.i} = T_{nep.f} = const$ вероятность передачи пакета за время t с учетом (1) запишем в виде

$$P(t_{nep} \leq t) = \begin{cases} \sum_{i=1}^{\left[\frac{t}{T_{nep.f}} \right]} P_{nep.i}, & T_{nep.f} \leq t < LT_{nep.f}; \\ 1, & t \geq LT_{nep.f}, \end{cases} \quad (2)$$

где $P_{nep.i}$ – вероятность передачи пакета ровно за i попыток при неудачах в предыдущих $(i-1)$ попытках; знак $[]$ означает округление до ближайшего меньшего целого.

Значения $P_{nep.i}$ в выражении (2) определяются вероятностью p_i успешной передачи в i -й попытке и вероятностью $\prod_{m=1}^{i-1} (1 - p_m)$ неудачных передач в предыдущих

$$(i-1) \text{ попытках } [1] \\ P_{nep.i} = p_i \prod_{m=1}^{i-1} (1 - p_m). \quad (3)$$

В зависимости от номера цикла использования ЧВМ, соответствующего полному однократному перебору выделенных N частот в соответствии с матрицей, значения вероятностей p_i определяются по-разному.

На первом цикле перестроек по ЧВМ результаты передач вполне могут считаться независимыми благодаря слабой коррелированности условий ведения связи на выделенных частотах, что легко обеспечивается путем их соответствующего разнесения [7]. С учетом этого, а также малого времени излучения частот ЧВМ, составляющего обычно единицы...десятки миллисекунд, что меньше периода замираний сигнала, результаты передач с использованием каждой из N частот будут определяться надежностью $P_{cv,i}$ связи на них с заданной достоверностью. Тогда для первого цикла передач на N частотах ЧВМ в соответствии с (2) и (3) имеем

$$P(t_{nep} \leq t) = P_{cv,1} + \sum_{i=2}^{\lfloor \frac{t}{T_{nep,f}} \rfloor} P_{cv,i} \prod_{m=1}^{i-1} (1 - P_{cv,m}), \quad 1 \leq i \leq N. \quad (4)$$

Если для упрощения выражений полагать, что вероятность связи на всех частотах одинакова $P_{cv,i} = P_{cv} = const$, то формула (4) может быть записана в виде

$$P(t_{nep} \leq t) = P_{cv} \sum_{i=1}^{\lfloor \frac{t}{T_{nep,f}} \rfloor} (1 - P_{cv})^{i-1}, \quad 1 \leq i \leq N. \quad (5)$$

На последующих циклах, где выделенные частоты будут сканироваться по второму, третьему и т.д. разу, вероятности $P_{nep,i}$ оказываются зависимыми от исходов попыток на предыдущих циклах. Можно показать, что в условиях экспоненциального [7] распределения интервалов τ и θ значения $P_{nep,i}$ будут определяться:

при использовании «регулярной» ЧВМ

$$P_{nep,i} = (1 - P_{cv})^N (1 - P_0)^{i-kN-1} P_0; \quad (6)$$

$$kN + 1 \leq i \leq (k + 1)N, \quad k \geq 1,$$

где [8]

$$P_0 = P_{cv} \{1 - \exp[-(\lambda + \mu)NT_{nep,f}]\};$$

$$\lambda = \frac{1}{\tau}; \quad \mu = \frac{1}{\theta}; \quad (6.a)$$

при использовании «случайной» ЧВМ

$$P_{nep,i} = (1 - P_{cv})^N \left[\prod_{s=1}^N (1 - P_s) \right]^{k-1} \sum_{i=kN+1}^{\lfloor \frac{t}{T_{nep,f}} \rfloor} P_{i-kN} \prod_{m=kN+1}^{i-1} (1 - P_{m-kN}), \quad (7)$$

где

$$P_x = P_{cv} \left\{ 1 - \frac{\exp[-(\lambda + \mu)xT_{nep,f}] \{1 - \exp[-(\lambda + \mu)NT_{nep,f}]\}}{N \{1 - \exp[-(\lambda + \mu)T_{nep,f}]\}} \right\}; \quad (7a)$$

$$x \in (s, i - kN, m - kN);$$

$$kN + 1 \leq i \leq (k + 1)N, \quad k \geq 1.$$

С учетом (5), (6) и (7) после преобразований окончательно получим выражения, позволяющие определить вероятность передачи короткого пакета с использованием режима ППРЧ между двумя корреспондентами за время t :

при «регулярной» ЧВМ

$$P_p(t_{nep} \leq t) = \sum_{k=0}^{\lfloor \frac{t}{NT_{nep,f}} \rfloor} P_{\xi} (1 - P_{cv})^{NH(k-1)} \sum_{i=kN+1}^{\lfloor \frac{t}{T_{nep,f}} \rfloor} (1 - P_{\xi})^{i-NH(k-1)-1} \times \\ \times \{H[t - (kN + 1)T_{nep,f}] - H[t - (k + 1)NT_{nep,f}]\} + \\ + \sum_{k=0}^{\lfloor \frac{t}{NT_{nep,f}} \rfloor} [1 - (1 - P_{\xi})^N] (1 - P_{cv})^{NH(k-1)} \times \\ \times (1 - P_{0k})^{(k-1)NH(k-1)} H[t - (k + 1)NT_{nep,f}]; \quad (8)$$

где

$$P_{\xi} = \begin{cases} P_{cv} & \text{при } k = 0; \\ P_0 & \text{если } k \geq 1; \end{cases}$$

$H(x)$ – единичная функция со свойствами

$$H(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } x < 0; \\ 1, & \text{если } x \geq 0; \end{cases}$$

при «случайной» ЧВМ:

$$P_c(t_{nep} \leq t) = \\ = P_{cv} \sum_{i=1}^{\lfloor \frac{t}{T_{nep,f}} \rfloor} (1 - P_{cv})^{i-1} [H(t - T_{nep,f}) - H(t - NT_{nep,f})] + \\ + (1 - P_{cv})^N \sum_{k=1}^{\lfloor \frac{t}{NT_{nep,f}} \rfloor} \left[\prod_{s=1}^N (1 - P_s) \right]^{k-1} \sum_{i=kN+1}^{\lfloor \frac{t}{T_{nep,f}} \rfloor} P_{i-kN} \prod_{m=kN+1}^{i-1} (1 - P_{m-kN}) \times \\ \times \{H[t - (kN + 1)T_{nep,f}] - H[t - (k + 1)NT_{nep,f}]\} + \\ + [1 - (1 - P_{cv})^N] H(t - NT_{nep,f}) + (1 - P_{cv})^N \times \\ \times \sum_{k=1}^{\lfloor \frac{t}{NT_{nep,f}} \rfloor} \left[\prod_{s=1}^N (1 - P_s) \right]^{k-1} \sum_{i=kN+1}^{(k+1)N} P_{i-kN} \prod_{m=kN+1}^{i-1} (1 - P_{m-kN}) \times \\ \times H[t - (k + 1)NT_{nep,f}]. \quad (9)$$

Анализ результатов оценки ВВХ передачи коротких пакетов между двумя корреспондентами в режиме ППРЧ с использованием (8) и (9) показывает, что в моменты времени, соответствующие окончаниям циклов ППРЧ, значения ВВХ для «регулярной» и «случайной» ЧВМ совпадают. Это объясняется следующим. Как было отмечено выше, на последующих циклах использования ЧВМ вероятности успешных передач $P_{nep,i}$ оказываются зависимыми от исходов попыток на предыдущих циклах, при этом, как это следует из (6a) и (7a), они зависят от «расстояния» между моментами времени применения одинаковых частот в соседних циклах. Для «регулярной» ЧВМ это «расстояние» постоянно и равно $NT_{nep,f}$, а для «случайной» ЧВМ оно зависит от номера попытки i в цикле и составляет от $[1 + (i - 1)]T_{nep,f}$ до $[N + (i - 1)]T_{nep,f}$. Однако в целом за цикл при «случайной» ЧВМ среднее значение «расстояния» между моментами времени применения одинаковых частот составляет

$$\frac{T_{nep,f}}{N} \sum_{i=1}^N \frac{[1 + (i - 1)] + [N + (i - 1)]}{2} = NT_{nep,f},$$

то есть соответствует «расстоянию» при «регулярной» ЧВМ.

В ходе же цикла, вследствие различного распределения значений «расстояния» в попытках передач между моментами времени применения одинаковых с предыдущим циклом частот (в первой попытке в цикле – эти значения варьируют от $T_{nep.f}$ до $NT_{nep.f}$, а в последней – от $NT_{nep.f}$ до $(2N-1)T_{nep.f}$), уровни ВВХ при «случайной» ЧВМ в середине цикла незначительно (до единиц %) уступают уровням ВВХ при «регулярной» ЧВМ, становясь одинаковыми к моменту окончания цикла.

Следовательно, с учетом существенно различной сложности аналитического моделирования в ходе получения выражений типа (8) и (9), а также вычислений по ним для оценки ВВХ передачи короткого пакета в режиме ППРЧ с использованием всех N выделенных частот достаточно знать ВВХ при применении «регулярной» ЧВМ.

Рассмотренная выше работа между двумя корреспондентами (в КВ-радионаправлении), как правило, является вырожденным случаем функционирования КВ радиосети, либо может применяться при обмене информацией двумя корреспондентами в составе сети.

Поэтому важно уметь оценивать ВВХ циркулярной передачи пакета с использованием режима ППРЧ применительно к радиосети в целом. Под вероятностью $P_M(t_{nep} \leq t)$ в этом случае будем понимать вероятность успешной циркулярной передачи пакета каждому из M корреспондентов за время t .

С использованием изложенного выше методического подхода и учетом совокупности различных возможных результатов передач, обусловленных наличием M корреспондентов, окончательное выражение для вероятности циркулярной передачи короткого пакета любому из M корреспондентов за время t в сети при применении «регулярной» ЧВМ запишется в виде

$$\begin{aligned}
 P_M(t_{nep} \leq t) = & \sum_{k=0}^{\left\lfloor \frac{t}{NT_{nep.f}} \right\rfloor} \sum_{i=kN+1}^{\left\lfloor \frac{t}{T_{nep.f}} \right\rfloor} \sum_{j=1}^M C_M^j P_{\xi}^j (1 - P_{ce})^{NjH(k-1)} (1 - P_{\xi})^{i - NH(k-1) - 1j} \times \\
 & \times [1 - (1 - P_{ce})^{NH(k-1)} (1 - P_{\xi})^{i - NH(k-1) - 1}]^{M-j} \times \\
 & \times \{H[t - (kN + 1)T_{nep.f}] - H[t - (k + 1)NT_{nep.f}]\} + \\
 & + \sum_{k=0}^{\left\lfloor \frac{t}{NT_{nep.f}} \right\rfloor} \sum_{i=kN+1}^{\left\lfloor \frac{t}{T_{nep.f}} \right\rfloor} \sum_{j=1}^M C_M^j P_{\xi}^j (1 - P_{ce})^{NjH(k-1)} (1 - P_{\xi})^{i - NH(k-1) - 1j} \times \\
 & \times [1 - (1 - P_{ce})^{NH(k-1)} (1 - P_{\xi})^{i - NH(k-1) - 1}]^{M-j} \times \\
 & \times H[t - (k + 1)NT_{nep.f}]. \quad (10)
 \end{aligned}$$

Можно показать, что при значении $M = 1$, соответствующем вырожденному случаю радиосети в составе

двух корреспондентов (радионаправлению), последнее выражение сводится к формуле (8).

С учетом вышесказанного относительно «идентичности» ВВХ для «регулярной» и «случайной» ЧВМ полученные выражения (8) и (10) представляют собой аналитическую модель оценки вероятности циркулярной передачи с ППРЧ короткого пакета за время t соответственно в радионаправлении и любому из M корреспондентов в радиосети.

Анализ представленных результатов позволяет сделать некоторые выводы относительно оценки ВВХ циркулярной передачи короткого пакета с использованием режима ППРЧ.

1. Установлена «идентичность» ВВХ при передаче короткого пакета в режиме ППРЧ с использованием всех N выделенных частот при «регулярной» и «случайной» ЧВМ – в моменты времени, соответствующие окончаниям циклов ППРЧ, значения ВВХ совпадают, а в середине циклов уровни ВВХ при «случайной» ЧВМ незначительно (до единиц %) уступают уровням ВВХ при «регулярной» ЧВМ.

Это позволяет при аналитическом моделировании оценки ВВХ рассматриваемого режима передачи ограничиться более простым определением ВВХ передачи с применением «регулярной» ЧВМ, обобщив его результаты на оценку ВВХ при «случайной» ЧВМ без потери точности.

2. Как следует из выражений (8) и (10), каждая из функций $P(t_{nep} \leq t)$ и $P_M(t_{nep} \leq t)$ содержит два характерных участка. Первый участок – быстро возрастающий, соответствующий первому циклу использования ЧВМ при $t \leq NT_{nep.f}$. Второй участок – значительно более пологий, почти горизонтальный, соответствует последующим циклам использования ЧВМ при $t > NT_{nep.f}$.

При одновременной зависимости положения обоих участков от вероятности связи на выделенных частотах P_{ce} , а также количества корреспондентов M положение каждого из них по отдельности существенно зависит от различных переменных. Так, положение первого участка (угол его «наклона») определяется значениями времени $T_{nep.f}$, включающего время перестройки частот, а второго (в частности, начальная его «высота» при переходе от первого участка) – зависит от количества используемых частот N .

Следовательно, варьированием переменных $T_{nep.f}$ и N , вместе и по отдельности, можно добиваться выполнения различных требований к ВВХ циркулярной передачи короткого пакета с использованием режима ППРЧ.

3. Рассмотрение поведения характерных участков функций (8) и (10) показывает, что основной вклад в ве-

личину вероятности циркулярной передачи короткого пакета с использованием режима ППРЧ в диапазоне приемлемых значений возможного требуемого времени t вносит его передача на первом цикле использования ЧВМ.

Управляя параметром N , можно обеспечить требуемое значение вероятности $P_{пер.треб}$ успешной циркулярной передачи пакета каждому из M корреспондентов, при этом должно выполняться условие

$$N \geq \frac{\ln(1 - P_{пер.треб}^M)}{\ln(1 - P_{св})}. \quad (11)$$

В условиях принятых допущений о равенстве вероятности связи на выделенных частотах выражение (11) справедливо для случаев:

а) компактного расположения корреспондентов, когда условия прохождения сигналов на частотах приблизительно идентичны;

б) разбиения пространственно разнесенных корреспондентов на группы, когда для каждой соответствует случай (а). При этом требование (11) применимо к группам.

4. Возрастание количества N используемых в ЧВМ частот может привести к недопустимому увеличению времени $T_{пер}$ циркулярной передачи пакета корреспондентам сети, так как с каждой дополнительной частотой происходит смещение точки, соответствующей окончанию первого цикла ППРЧ, вправо по оси времени на величину $T_{пер.ф}$.

Для сохранения требуемых ВВХ циркулярной передачи необходимо сокращение времени $T_{пер.ф}$. Без

изменения объема передаваемого пакета это возможно путем уменьшения времени T_f перестройки РЭС. Однако существенное сокращение времени перестройки радиосредств, главным образом радиопередатчиков, наталкивается на значительные технические трудности.

Не рассматривая достаточно затратное использование поочередной передачи с помощью двух радиопередатчиков (один работает на излучение, другой – перестраивается), можно показать, как вариант, что обеспечение требуемой оперативности циркулярной передачи при ограничениях на время перестройки РЭС без увеличения аппаратного ресурса вполне реализуемо на основе разумного (с учетом оценки эффективности РЭП) чередования перестроек в широком диапазоне частот («медленные» перестройки) и более узком, не требующем настроек согласующих цепей передающих и входных цепей приемных устройств («быстрые» перестройки). Это позволит при использовании «быстрых» перестроек в сочетании с «медленными» в соотношении n , сократить время циркулярной передачи в пределе (при малых значениях $T_{нак}$) до $(n+1)$ раз по сравнению с работой только «медленными» перестройками.

Предложенный аппарат оценки ВВХ циркулярной передачи короткого пакета с использованием режима «медленной» ППРЧ может найти применение для определения эффективности технических решений систем передачи информации различного назначения на стадиях их разработки (проектирования).

Литература

1. Военные системы радиосвязи. Ч. 1. / Игнатов В.В., Килимник Ю.П., Никольский И.Н. и др.; Под ред. В.В. Игнатова. – Л.: ВАС, 1989. – 386 с.
2. Радиолинии с программной перестройкой рабочих частот. / Мельников А.А., Прохоров В.К., Бондарь О.И. и др.; Под ред. Мельникова А.А., Прохорова В.К. – Л.: ВАС, 1989. – 94 с.
3. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты. / Борисов В.И., Зинчук В.М., Лимарев А.Е. и др. – М.: Радио и связь, 2000. – 384 с.
4. Семисошенко М.А., Пиеничников А.В. Управление частотно-временным ресурсом радиолинии с программной перестройкой рабочей частоты в условиях воздействия случайных помех // Информатика и космос. – 2006. – № 2. – С. 40–43.
5. Шаров А.Н., Степанец В.А., Комашинский В.И. Сети радиосвязи с пакетной передачей информации. / Под ред. А.Н. Шарова – СПб.: ВАС, 1994. – 216 с.
6. Игумнов В.В. Нахождение вероятностно-временных характеристик доведения сообщений в сетях «точка-многоточка» с протоколом HDLC с учетом разной длины сообщения и квитации // Известия Института инженерной физики. – 2008. – № 1. – С. 3–4.
7. Комарович В.Ф., Сосунов В.Н. Случайные радиопомехи и надежность КВ связи. – М.: Связь, 1977. – 136 с.
8. Атарев В.П., Шакун Г.И., Трофимов П.И. Процессы отказов и восстановлений в системах ПД. – М.: Связь, 1977. – 112 с.

Материал поступил в редакцию 28. 01. 2010 г.