

К. В. ГОНЧАРОВ (ДИИТ)

## КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ ПУТЕВОЙ ПРИЕМНИК ТОНАЛЬНЫХ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ

Робота присвячена подальшому удосконаленню алгоритмів обробки сигналів контролю рейкової лінії. Виконано імітаційне моделювання кореляційного приймача тональних рейкових кіл, проведено порівняльний аналіз кореляційного приймача та приймача прямого підсилення.

*Ключові слова:* тональні рейкові кола, приймач прямого підсилення, кореляційний приймач, амплітудно-частотна характеристика, адитивні завади, імітаційне моделювання, порівняльний аналіз

Работа посвящена дальнейшему совершенствованию алгоритмов обработки сигналов контроля рельсовой линии. Выполнено имитационное моделирование корреляционного путевого приемника тональных рельсовых цепей, проведен сравнительный анализ корреляционного приемника и приемника прямого усиления.

*Ключевые слова:* тональные рельсовые цепи, приемник прямого усиления, корреляционный приемник, амплитудно-частотная характеристика, аддитивные помехи, имитационное моделирование, сравнительный анализ

The work is devoted to further improvement of processing algorithm of checking signals of rail line. The simulation modeling of correlation track receiver of tone rail circuits has been executed; the benchmark analysis of correlation receiver and direct amplifier receiver has been executed.

*Keywords:* tonal track circuits, direct amplifier receiver, correlation receiver, frequency response, additive hindrances, simulation, benchmark analysis

### Введение

В настоящее время на сети железных дорог Украины и стран СНГ базовым элементом автоматизированных систем управления движением поездов (АСУДП) являются рельсовые цепи, выполняющие ответственные функции путевых датчиков и телемеханических каналов. От надежной работы рельсовых цепей во многом зависит надежность АСУДП, а, следовательно, и безопасность движения поездов, а также эффективность перевозочного процесса. Значительная часть отказов рельсовых цепей вызвана их неустойчивой работой в условиях воздействия неблагоприятных факторов, таких как флуктуации сопротивления изоляции балласта, а также воздействие помех от тягового тока.

В процессе своего развития рельсовые цепи прошли значительный эволюционный путь от цепей постоянного тока с непрерывным питанием до современных тональных рельсовых цепей (ТРЦ) [1 – 3]. Использование сигнального тока тонального диапазона позволяет существенно повысить помехозащищенность и ослабить взаимные влияния между рельсовыми цепями, в несколько раз снизить потребляемую мощность [2, 3]. Наиболее ответственным элементом ТРЦ является электронный путевого приемник, который выполняет обработку сиг-

налов контроля рельсовой линии (КРЛ) и управляет путевым реле.

Одно из направлений дальнейшего совершенствования рельсовых цепей связано с переводом технических средств на современную микроэлектронную элементную базу. Существующий уровень развития цифровых сигнальных процессоров позволяет строить на их основе надежные устройства, выполняющие довольно сложные алгоритмы цифровой обработки сигналов [4]. Применение новых, более совершенных алгоритмов обработки сигналов КРЛ, реализация которых на старой элементной базе была принципиально невозможной, позволит повысить устойчивость работы рельсовых цепей в условиях воздействия дестабилизирующих факторов, а также позволит расширить функциональные возможности путевого приемника. Целесообразность применения цифровой обработки сигналов для построения путевых приемников показана также в работах [5 – 7].

Для повышения помехоустойчивости приемника сигналов, уменьшения вероятности ошибки при обнаружении сигнала можно использовать статистические методы, которые базируются на определении взаимной корреляционной функции принятого и эталонного сигналов [8 – 10].

**Целью данной работы** является дальнейшее совершенствование алгоритмов обработки сигналов контроля рельсовой линии, исследование корреляционного путевого приемника тональных рельсовых цепей.

### Структура цифрового путевого приемника тональных рельсовых цепей

Путевой приемник тональных рельсовых цепей выполняет фильтрацию и демодуляцию амплитудно-манипулированных сигналов контроля рельсовой линии и управляет путевым реле в соответствии с уровнем этих сигналов [2, 3].

Можно выделить два направления применения цифровой обработки сигналов в путевых приемниках ТРЦ: 1) выполнение в цифровой форме традиционных алгоритмов обработки сигналов контроля рельсовой линии; 2) поиск новых, более совершенных алгоритмов цифровой обработки сигналов, выполнение которых на старой элементной базе было затруднительно или практически невозможно. Первое направление рассмотрено в работе [7]. Предложенный в [7] цифровой путевой приемник построен по традиционной схеме приемника прямого усиления [11] и содержит следующие функциональные узлы: аналого-цифровой преобразователь (АЦП), входной фильтр (ВФ), демодулятор (ДМ), первый фильтр модулирующей частоты (ФМ), пороговый элемент (ПЭ), выходной усилитель (ВУ), второй фильтр модулирующей частоты, образованный конденсатором  $C_\Phi$  и трансформатором, выпрямитель (рис. 1). Для выполнения операций фильтрации, демодуляции и сравнения с пороговым уровнем используется цифровой сигнальный процессор (ЦСП). Безопасность такого прием-

ника обеспечивается за счет динамического режима работы всех его элементов. Повысить надежность и функциональную безопасность цифрового приемника можно также с помощью структурного резервирования и специальных тестовых программ, позволяющих обнаруживать программные сбои сигнального процессора.

### Исследование корреляционного приемника

На вход путевого приемника поступает реализация случайного сигнала  $\xi(t)$ , представляющая собой аддитивную смесь сигнала контроля рельсовой линии и помехи

$$\xi(t) = \theta \cdot s_1(t) + (1 - \theta) \cdot s_2(t) + n(t), \quad (1)$$

где  $s_1(t)$  – сигнал КРЛ в нормальном режиме;  $s_2(t)$  – ослабленный сигнал КРЛ в шунтовом или контрольном режимах,  $n(t)$  – помехи,  $\theta$  – параметр обнаружения (равняется нулю или единице). Сигналы  $s_1(t)$  и  $s_2(t)$  являются квазидетерминированными амплитудно-манипулированными с известными несущей и модулирующей частотами, случайными амплитудой и фазой. Помехами являются гармоники тягового тока, сигналы смежных рельсовых цепей, сигналы АЛС и др. Если после обработки уровень сигнала КРЛ превышает пороговый уровень  $h$ , то параметр обнаружения  $\theta$  принимается равным единице, в противном случае – равным нулю. Таким образом, путевой приемник выполняет задачу обнаружения сигналов. Так как сигналы  $s_1(t)$  и  $s_2(t)$  – квазидетерминированные, а  $n(t)$  – случайный сигнал, то для решения такой задачи целесообразно использовать статистические методы.

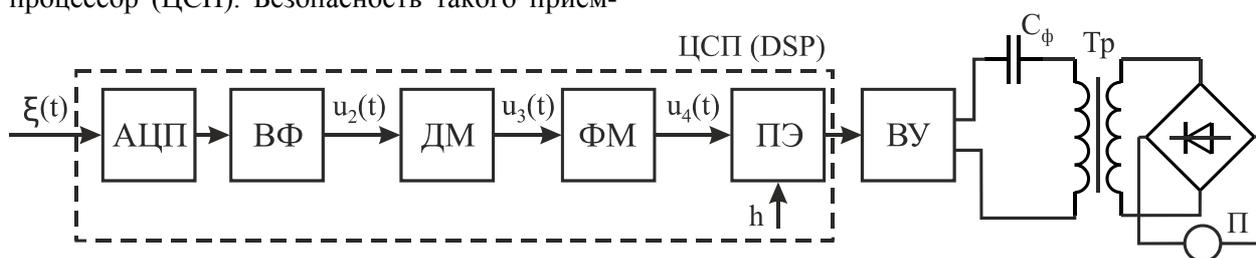


Рис. 1. Структурная схема цифрового путевого приемника тональных рельсовых цепей

В статистической радиотехнике при обнаружении сигналов определяется и сравнивается с пороговым уровнем отношение правдоподобия [8 – 10]

$$\Lambda = \frac{p(\xi|s_1)}{p(\xi|s_2)}, \quad (2)$$

где  $p(\xi|s_1)$ ,  $p(\xi|s_2)$  – плотности условных вероятностей появления реализации  $\xi(t)$  при условии, что были переданы сигналы  $s_1(t)$ ,  $s_2(t)$ , соответственно. При обнаружении сигналов на фоне белого гауссовского шума вычисление отношения правдоподобия сводится к определению взаимной корреляционной функции

принятого сигнала и эталонного сигнала, форма которого соответствует сигналу КРЛ

$$q(\tau) = \int_0^T \xi(t) \cdot s_1(t - \tau) dt, \quad (3)$$

где  $T$  – интервал наблюдения. Т.к. сигнал КРЛ является периодическим, то в качестве интервала наблюдения следует принять период модулирующего сигнала.

В устройствах цифровой обработки сигналов вычисление корреляционного интеграла (3) выполняется путем суммирования произведений выборок двух сигналов [12]

$$q(j) = \frac{1}{M} \sum_{N=0}^{M-1} \xi(N) \cdot s_1(N - j), \quad (4)$$

где  $M$  – количество выборок на интервале, равном одному периоду модулирующего сигнала.

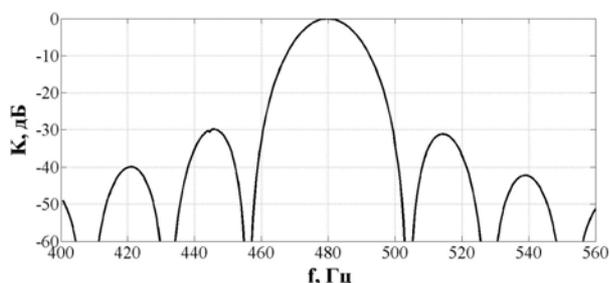


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика коррелятора

Для исследования коррелятора, выполняющего вычисления в соответствии с выражением (4), было проведено имитационное моделирование в среде MATLAB. В качестве эталонного использовался один период амплитудно-манипулированного сигнала с частотой несущей 480 Гц и частотой модуляции 12 Гц. Моделирование проводилось при частоте дискретизации 2 кГц, число выборок эталонного сигнала – 167, число выборок входного сигнала – 1670. Были проведены исследования фильтрующих свойств коррелятора. Для этого на его вход подавались синусоидальные сигналы в диапазоне частот (400...600) Гц с шагом 0,5 Гц. Для каждой частоты определялась амплитуда выходного сигнала и рассчитывался нормированный коэффициент передачи. Полученная амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) коррелятора представлена на рис. 2.

Известно [7], что спектр амплитудно-манипулированного сигнала КРЛ состоит из несущей и двух боковых полос, содержащих нечетные гармоники. Для сигнала 480 Гц/12 Гц частоты нечетных гармоник равняются 468 Гц и

492 Гц, 444 Гц и 516 Гц, 420 Гц и 540 Гц и т.д. Как видно из рис. 2, максимумы АЧХ коррелятора соответствуют несущей частоте, а также частотам третьих, пятых и т.д. гармоник сигнала КРЛ. Таким образом, коррелятор представляет собой полосовой фильтр, АЧХ которого является согласованной со спектром сигнального тока. В связи с этим коррелятор можно использовать в качестве входного фильтра путевого приемника ТРЦ (см. рис. 1).

Было проведено в среде MATLAB имитационное моделирование путевого приемника, в котором коррелятор выполняет роль входного фильтра. Для выполнения демодуляции применялась нелинейная операция нахождения абсолютного значения величины. В качестве фильтра модулирующей частоты использовался КИХ-фильтр, настроенный на частоту 12 Гц с полосой пропускания 2 Гц. На вход такого приемника подавался амплитудно-манипулированный сигнал 480 Гц/12 Гц с амплитудой 1 В. Результаты моделирования представлены на рис. 3. На графиках в качестве аргумента используется номер выборок  $N$ , а в качестве функции – значения выборок, полученные после выполнения различных операций над входным сигналом. Как видно из рис. 3 предложенный корреляционный приемник позволяет выделить из входного сигнала модулирующее колебание (рис. 3, г). Постепенное увеличение уровня сигнала на выходе фильтра модулирующей частоты связано с переходным процессом в данном КИХ-фильтре.

Для исследования помехоустойчивости корреляционного приемника на его вход подавалась аддитивная сумма амплитудно-манипулированного сигнала амплитудой 1 В и белого гауссовского шума со среднеквадратичным отклонением 1 В. Результаты моделирования представлены на рис. 4. Несмотря на сильную зашумленность входного сигнала, коррелятор довольно эффективно подавляет шумовую составляющую, что позволяет выделить сигнал модулирующей частоты (см. рис. 4).

### Сравнительный анализ путевых приемников

Для сравнения корреляционного и традиционного приемников с помощью имитационного моделирования в среде MATLAB исследовалась их помехоустойчивость. На первом этапе на вход приемников подавалась помеха в виде белого гауссовского шума с дисперсией равной единице. В результате дисперсия на выходе фильтра модулирующей частоты при использо-

вании в качестве входного фильтра коррелятора составила 0,008, а при использовании обычного полосового фильтра дисперсия равнялась 0,0135.

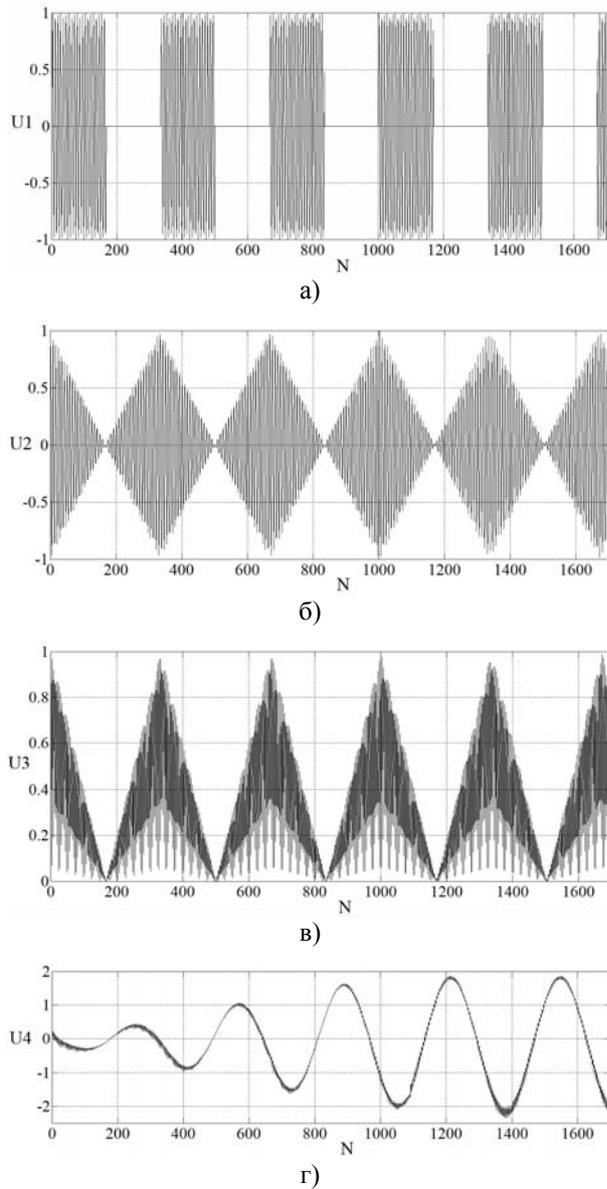


Рис. 3. Временные диаграммы напряжений при воздействии полезного сигнала:  
 а) на входе путевого приемника;  
 б) на выходе коррелятора;  
 в) на выходе нелинейного элемента;  
 г) на выходе фильтра модулирующей частоты

На втором этапе на вход приемников подавалась аддитивная смесь амплитудно-манипулированного сигнала КРЛ и белого гауссовского шума. Дисперсию шума изменяли в пределах от одного до десяти. Исследования проводили с помощью метода статистических испытаний [13]. Для каждого значения дисперсии помехи проводилось 500 испытаний, в которых амплитуда и фаза полезного сигнала изменялись случайным образом.

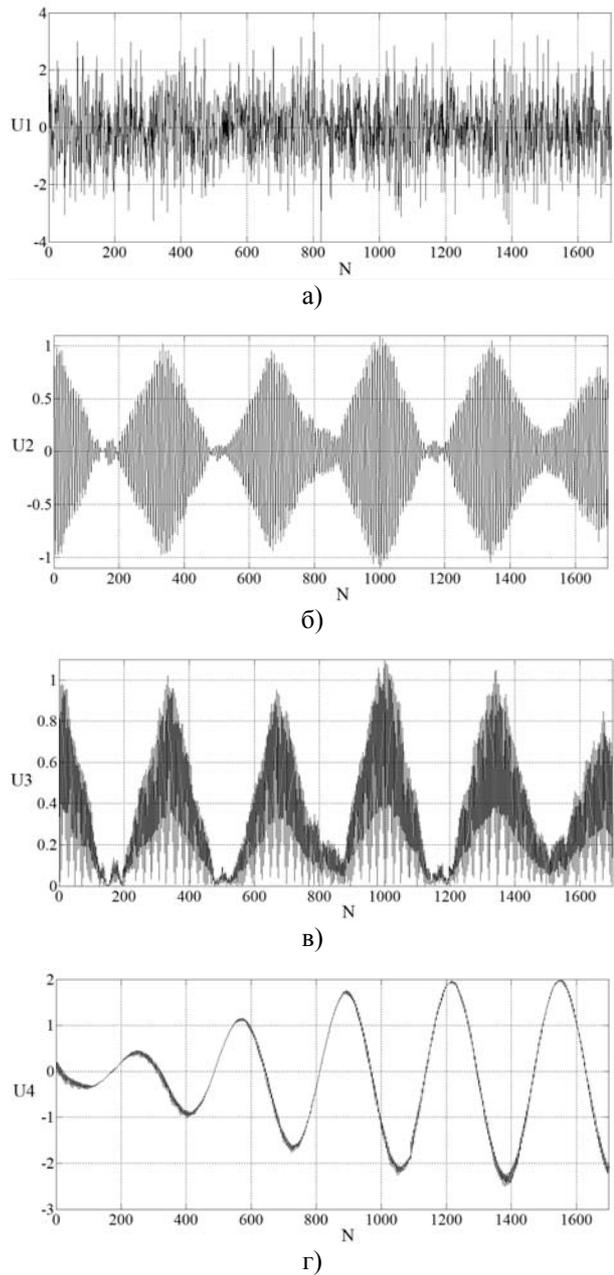


Рис. 4. Временные диаграммы напряжений при воздействии полезного сигнала и помехи:  
 а) на входе путевого приемника;  
 б) на выходе коррелятора;  
 в) на выходе нелинейного элемента;  
 г) на выходе фильтра модулирующей частоты

Для фазы сигнала использовался равномерный закон распределения с граничными значениями  $(-\pi; +\pi)$ . В соответствии с существующими нормативными документами [14] действующее напряжение на входе путевого приемника ТРЦ может изменяться от 0,4 до 1,2 В. Учитывая, что для амплитудно-манипулированного сигнала со скважностью два амплитудное значение в два раза выше действующего, при проведении моделирования для амплитуды сигнала КРЛ использовался равномерный закон распределе-

ния с граничными значениями (0,8; 2,4) В. При определенных фазовых соотношениях между сигналом КРЛ и помехой уровень сигнала на выходе фильтра ФМ становился ниже порогового значения, что приводило к ошибке обнаружения сигнала. Пороговое значение выбиралось равным уровню сигнала на выходе фильтра ФМ при воздействии сигнала КРЛ амплитудой 0,8 В без помехи. В процессе моделирования для каждого значения дисперсии шума определялся коэффициент ошибки при обнаружении сигнала КРЛ (рис. 5)

$$K_n = \frac{K}{N}, \quad (5)$$

где  $N$  – общее число испытаний;  $K$  – число испытаний, в которых сигнал КРЛ был не обнаружен. Как видно из полученных результатов (см. рис. 5), корреляционный приемник обеспечивает лучшую помехозащищенность при воздействии белого гауссовского шума, что позволяет уменьшить вероятность ошибки при обнаружении сигнала.

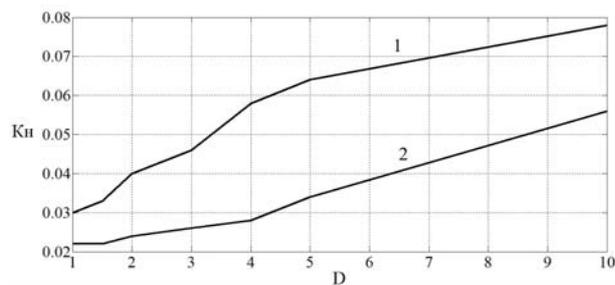


Рис. 5. Зависимость коэффициента ошибки при обнаружении сигнала КРЛ от дисперсии шума:

1 – традиционный приемник;  
2 – корреляционный приемник

На следующем этапе исследований на вход путевых приемников подавались сигналы «своей» рельсовой цепи (480 Гц / 12 Гц) и смежных рельсовых цепей. Для каждого случая измерялась амплитуда сигнала на выходе первого фильтра моделирующей частоты (табл. 1). Результаты моделирования показали высокую помехозащищенность обоих типов путевых приемников к сигналам смежных рельсовых цепей.

### Выводы

1. Одним из направлений дальнейшего развития рельсовых цепей является использование цифровой техники, что позволит использовать новые, более совершенные алгоритмы цифровой обработки сигналов контроля рельсовой линии, выполнение которых на старой эле-

ментной базе было затруднительно или практически невозможно.

Таблица 1

**Амплитуда сигнала на выходе фильтра ФМ при воздействии сигнала «своей» и смежных рельсовых цепей**

Несущая / моделирующая частота, Гц	Традиционный приемник	Корреляционный приемник
480 / 12	2,52	2,09
420 / 8	0,028	0,046
420 / 12	0,033	0,021
480 / 8	0,33	0,31
580 / 8	0,035	0,023
580 / 12	0,037	0,032
720 / 8	0,009	0,009
720 / 12	0,011	0,007
780 / 8	0,007	0,008
780 / 12	0,009	0,008

2. В результате исследований было установлено, что в качестве входного фильтра в путевом приемнике можно использовать коррелятор, амплитудно-частотная характеристика которого согласована со спектром сигнала контроля рельсовой линии.

3. При воздействии белого гауссовского шума корреляционный приемник обеспечивает лучшую помехозащищенность, чем приемник с традиционным входным полосовым фильтром. При воздействии сигналов смежных рельсовых цепей помехозащищенность путевых приемников практически одинакова.

4. Дальнейшие исследования в данном направлении связаны с разработкой вероятностных моделей помех, которые влияют на работу рельсовых цепей, и усовершенствованием алгоритма обработки сигнала контроля рельсовой линии.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Путевая блокировка и авторегулировка [Текст] / Н. Ф. Котляренко [и др.]. – М.: Транспорт, 1983. – 408 с.
2. Федоров, Н. Е. Современные системы автоблокировки с тональными рельсовыми цепями [Текст]: учеб. пособие / Н. Е. Федоров. – Самара: СамГАПС, 2004. – 132 с.
3. Кулик, П. Д. Тональные рельсовые цепи в системах ЖАТ: построение, регулировка, обслуживание, поиск и устранение неисправностей,

- повышение эксплуатационной надежности [Текст] / П. Д. Кулик, Н. С. Ивакин, А. А. Удовиков. – К.: Изд. дом «Мануфактура», 2004. – 288 с.
4. Сперанский, В. С. Сигнальные микропроцессоры и их применение в системах телекоммуникаций и электроники [Текст] / В. С. Сперанский. – М.: Горячая линия-Телеком, 2008. – 168 с.
  5. Чепцов, М. М. Методы синтезу сигнально-процесорної централізації стрілок і сигналів [Текст] : монографія / М. М. Чепцов, А. Б. Бойнік, Д. М. Кузьменко. – Донецьк: ДонІЗТ, 2010. – 181 с.
  6. О повышении надежности рельсовых цепей с использованием цифровой обработки сигналов [Текст] / А. П. Разгонов [и др.] // Тезисы IV Межд. науч.-практ. конф. «Электромагнитная совместимость и безопасность на железнодорожном транспорте», пгт. Чинадиево. – Д.: ДИИТ, 2011. – С. 65-66.
  7. Гончаров, К. В. Исследование цифрового путевого приемника тональных рельсовых цепей [Текст] / К. В. Гончаров // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2011. – Вип. 37. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2011. – С. 176-181.
  8. Тихонов, В. И. Оптимальный прием сигналов [Текст] / В. И. Тихонов. – М.: Радио и связь, 1983. – 320 с.
  9. Тихонов, В. И. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем [Текст] / В. И. Тихонов, В. Н. Харисов. – М.: Радио связь, 1991. – 608 с.
  10. Липкин, И. А. Статистическая радиотехника. Теория информации и кодирования [Текст] / И. А. Липкин. – М.: Вузовская книга, 2002. – 216 с.
  11. Изюмов, Н. М. Основы радиотехники [Текст] / Н. М. Изюмов, Д. П. Линде. – М.: Радио и связь, 1983. – 376 с.
  12. Smith, S. W. Digital signal processing [Text] / S. W. Smith. – California Technical Publishing, 1999. – 650 p.
  13. Ермаков, С. М. Курс статистического моделирования [Текст] / С. М. Ермаков, Г. А. Михайлов. – М.: Наука. – 320 с.
  14. Методичні вказівки з експлуатації тональних рейкових кіл [Текст] : керівний нормативний документ «Укрзалізниці», ЦШ/0034 : Затв.: Наказ Укрзалізниці від 23.02.2004 № 030-Ц. – К.: Мінтранс України, 2004. – 48 с.

Надійшла до редколегії 19.05.2011.

Прийнята до друку 25.05.2011.