

УДК 656.25

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.158.2015.62390>

**СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ КОЛІЙНОГО ПРИЙМАЧА СИГНАЛІВ З АМПЛІТУДНОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ**

Канд. техн. наук В.Ш. Хісматулін, магістрант К.В. Козар

**СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ПУТЕВОГО ПРИЕМНИКА СИГНАЛОВ С АМПЛИТУДНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ**

Канд. техн. наук В.Ш. Хисматулин, магистрант Е.В. Козарь

**THE SYNTHESIS OF THE OPTIMAL STRUKTURE TRACK RECEIVER OF SIGNALS WITH AMPLITUDE MODULATION**

Cand. of techn. sciences V. Khismatulin, master student E. Kozar

*Оптимальна структура приймача являє собою гетеродинний приймач. Проблемою при практичній реалізації є забезпечення суворої синфазності сигналу і напруги гетеродина, тому для систем автоблокування з централізованим розміщенням апаратури в якості сигналу гетеродина використовується сигнал несучої від «свого» колійного генератора. При децентралізованому розміщенні апаратури необхідно використовувати систему фазового автопідстроювання сигналу гетеродина.*

**Ключові слова:** *тональні рейкові кола, колійний приймач, приймач прямого перетворення, гетеродин.*

*Оптимальная структура приемника представляет собой гетеродинный приемник. Проблемой при практической реализации является обеспечение строгой синфазности сигнала и напряжения гетеродина, поэтому для систем автоблокировки с централизованным размещением аппаратуры в качестве сигнала гетеродина используется сигнал несущей от "своего" путевого генератора. При децентрализованном размещении аппаратуры необходимо использовать систему фазовой автоподстройки частоты сигнала гетеродина.*

**Ключевые слова:** *тональные рельсовые цепи, путевого приемник, приемник прямого преобразования, гетеродин.*

*The optimal structure of the receiver is a heterodyne receiver. Problem in practical implementation is to ensure strict phase and local oscillator voltage, so the auto lock systems with centralized deployment of*

*equipment in use as a local oscillator signal from the carrier signal "his" track generator. With decentralized deployment of equipment necessary to use the phase locked loop oscillator signal.*

**Keywords:** *tonal track circuits, track receiver, direct conversion receiver, oscillator.*

**Вступ.** Рейкові кола мають більш ніж вікову історію. За цей період відбувався безперервний розвиток їх теорії, удосконалення структурних і схемних рішень, модернізація технічних засобів. На сьогодні найбільші експлуатаційні, технічні й економічні переваги мають ТРК, що знаходять застосування на вітчизняних і закордонних залізницях, лініях метрополітену та швидкісного трамвая [1].

Використання сигнального струму тонального діапазону дозволяє істотно підвищити завадозахищеність і послабити взаємні впливи між РК, знизити потужність, що споживається, застосувати сучасну елементну базу, здійснити централізоване розміщення апаратури. До переваг ТРК слід віднести можливість позбавлення від ізолюючих стиків, що особливо важливо для ділянок із суцільнозварними рейковими плітками. Відсутність ізолюючих стиків забезпечує електричну безперервність кола повернення тягового струму, скорочує кількість дросель-трансформаторів і знижує витрати електроенергії на тягу поїздів [1, 2].

**Постановка проблеми.** Зараз у складі апаратури тональних рейкових кіл (ТРК) блок колійного приймача побудовано за принципом прямого підсилення [1-3]. У складі колійних приймачів застосовуються вхідні фільтри зі смугою пропускання 24-30 Гц, які настраюються на одну з частот ТРК. З метою забезпечення необхідного рівня заглушення сусідніх каналів приймання не менше 38 дБ вони мають складну структуру й тому не можуть бути перестроєними на інші частоти. З вказаних причин колійні приймачі мають велику кількість різновидів (виконань), які відрізняються несучою частотою і частотою модуляції робочого сигналу [3, 4].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Зазначеній проблемі присвячено публікації [10, 11], у яких виконано аналіз проблем побудови універсальних колійних приймачів і забезпечення та доказів їх функціональної безпечності. У них наведено варіанти побудови вхідних кіл і математичні моделі функціональної безпечності приймачів прямого перетворення. Але в публікаціях немає

обґрунтування оптимальних структур приймачів амплітудно-модульованих сигналів.

**Визначення мети та задачі дослідження.** Метою роботи є пошук оптимальної структури колійного приймача та шляхів її реалізації. Кінцевою метою є побудова універсального колійного приймача, який функціонує на всіх частотах ТРК. При цьому необхідно, щоб переведення приймача з однієї частоти на іншу було якомога простішим і не потребувало здійснення будь-яких складних перемикачів і налаштувань. Одночасно необхідно провести й пошук сучасної елементної бази, яка б дозволила підвищити його надійність та спростити налагоджування.

**Основний матеріал.** Основою синтезу оптимальних приймачів пристроїв інформаційних повідомлень при впливі на приймач функціональних шумів є теорія оптимальної нелінійної фільтрації [5, 8].

Визначимо структуру оптимального приймача, коли на його вхід впливає сума корисного сигналу  $u_c(t, \lambda)$  з амплітудною модуляцією (АМ) і флуктуаційного білого шуму  $u_{ш}(t)$ :

$$u_{\Sigma}(t) = u_c(t, \lambda) + u_{ш}(t). \quad (1)$$

Завдання приймача полягає в оптимальному виділенні повідомлення  $\lambda(t)$  з вхідної суміші  $u_{\Sigma}(t)$ .

Корисний сигнал запишемо у вигляді звичайного АМ колювання:

$$u_c(t, \lambda) = A_0(1 + m_A \lambda) \cos(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (2)$$

Тут  $A_0, m_A, \omega_0, \varphi_0$  – амплітуда немодульованого колювання, коефіцієнт АМ, частота і початкова фаза відповідно, які передбачаються відомими постійними величинами;  $\lambda$  – повідомлення, що являє собою марковський процес, описуваний стохастичним диференціальним рівнянням виду

$$\lambda'(t) = -\alpha \lambda(t) + u_{\lambda}(t), \quad (3)$$

де  $u_{\lambda}(t)$  – інформаційний шум (шум збудження) білого типу з відомими статистичними характеристиками  $\langle u_{\lambda}(t) \rangle = 0$ ,  $\langle u_{\lambda}(t_1)u_{\lambda}(t_2) \rangle = 0,5N_{\lambda}\delta(t_1 - t_2)$  ( $N_{\lambda}$  – спектральна щільність).

Таким чином, на вході приймача вважаються відомими всі параметри сигналу, статистичні характеристики вхідного та інформаційного шумів, а єдиним невідомим параметром є повідомлення  $\lambda(t)$ .

У разі квазіоптимальної фільтрації в гаусовому наближенні маємо такий алгоритм побудови оптимальної оцінки [8]:

$$\hat{\lambda}' = a(\hat{\lambda}) + \sigma_{\lambda}^2 \frac{\partial l(t, \hat{\lambda})}{\partial \hat{\lambda}}, \quad (4)$$

де

$$\sigma_{\lambda}^2 = \frac{\alpha}{\left| \frac{\partial^2 l(t, \hat{\lambda})}{\partial \lambda^2} \right|} \cdot \left( \sqrt{1 + \frac{b}{\alpha^2} \left| \frac{\partial^2 l(t, \hat{\lambda})}{\partial \lambda^2} \right|} - 1 \right) \quad (5)$$

$$\frac{\partial l(t, \hat{\lambda})}{\partial \hat{\lambda}} = \frac{1}{N_0} \left[ 2u_{\Sigma}(t) A_0 m_A \cos(\omega_0 t + \varphi_0) - A_0^2 (1 + m_A \hat{\lambda}) m_A \right]. \quad (8)$$

Підставивши вирази (6) і (8) у вираз (4), отримаємо диференціальне рівняння для оптимальної оцінки повідомлення

$$\hat{\lambda}' + \alpha \hat{\lambda} = \frac{\sigma_{\lambda}^2 A_0 m_A}{N_0} \left[ 2u_{\Sigma}(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0) - A_0 (1 + m_A \hat{\lambda}) \right]. \quad (9)$$

Розв'язуючи це диференціальне рівняння, знайдемо вихідний алгоритм для оптимальної структури приймача

$$\hat{\lambda} = \frac{K}{Tp + 1} \left[ 2u_{\Sigma}(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0) - A_0 - A_0 m_A \hat{\lambda} \right], \quad (10)$$

де  $T = 1/\alpha$ ,  $K = \sigma_{\lambda}^2 A_0 m_A / N_0 \alpha$ .

Дисперсія апостеріорного розподілу визначається з виразу (5):

$$\sigma_{\lambda}^2 = \frac{\alpha N_0}{(A_0 m_A)^2} \cdot \left( \sqrt{1 + \frac{(A_0 m_A)^2 N_{\lambda}}{2\alpha^2 N_0}} - 1 \right), \quad (11)$$

де  $\alpha = 1/RC = \Delta F_{\lambda}$  – смуга частот інформаційного повідомлення  $\lambda(t)$ .

– постійна в часі дисперсія апостеріорного розподілу, що характеризує помилку у визначенні повідомлення.

На підставі апіорного рівняння (3) коефіцієнт зносу

$$a(\hat{\lambda}) = -\alpha \hat{\lambda}. \quad (6)$$

Оскільки повідомлення закладено в законі зміни амплітуди сигналу, при адитивній суміші сигналу і нормального білого шуму (1) функція  $l(t, \hat{\lambda})$  визначається виразом [8,9]:

$$l(t, \lambda) = \frac{1}{N_0} \left[ 2u_{\Sigma}(t)u_c(t, \lambda) - u_c^2(t, \lambda) \right]. \quad (7)$$

Вважатимемо, що вхідне коло приймача забезпечує фільтрацію сигналів з подвійною частотою  $2\omega_0$ . У цьому випадку з урахуванням виразу (2), опускаючи члени з частотою  $2\omega_0$ , отримаємо

Рівняння (11) моделюється когерентним (синхронним) приймачем, структурна схема якого наведена на рис. 1.

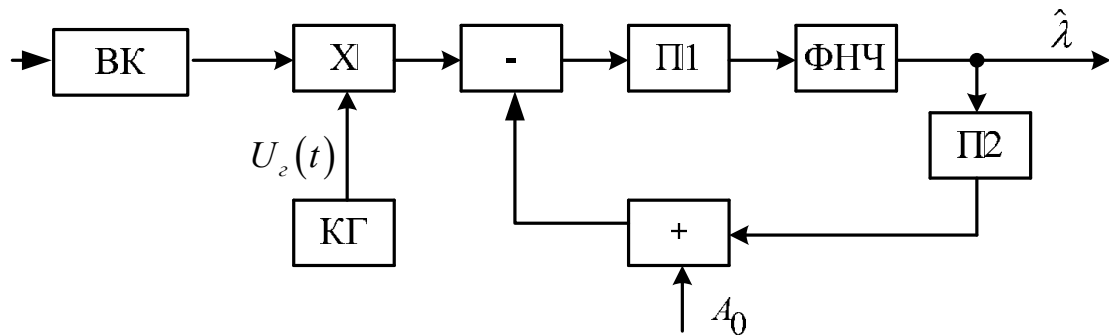


Рис. 1. Схема когерентного приймача

Після лінійного входного кола (ВК) суміш сигналу і шуму  $u_{\Sigma}(t)$  надходить на перемножувач (фазовий детектор), на вхід якого від когерентного гетеродина (КГ) подається опорне коливання

$$U_z(t) = 2 \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (12)$$

частота  $\omega_0$  та початкова фаза  $\varphi_0$  якого співпадають з параметрами сигналу (2). Напруга з виходу перемножувача, зміщена на величину  $A_0(1 + m_A \hat{\lambda})$ , що формується за допомогою підсилювача П2 з коефіцієнтом

підсилення  $m_A A_0$  та суматора, далі подається на підсилювач П1 з коефіцієнтом посилення К і в фільтр низьких частот (ФНЧ) – інтегруючу RC-ланку з постійною часу Т. Вихідна напруга інтегруючої ланки дає оцінку повідомлення  $\hat{\lambda}$ . Смугу пропускання ФНЧ обирають, виходячи з спектру частот демодульованого повідомлення і прагнення пропустити якомога менше шумів.

Практична реалізація отриманої оптимальної структури відома як приймач прямого перетворення (ППП) або гетеродинний приймач [9]. Він має структурну схему, яку подано на рис. 2.

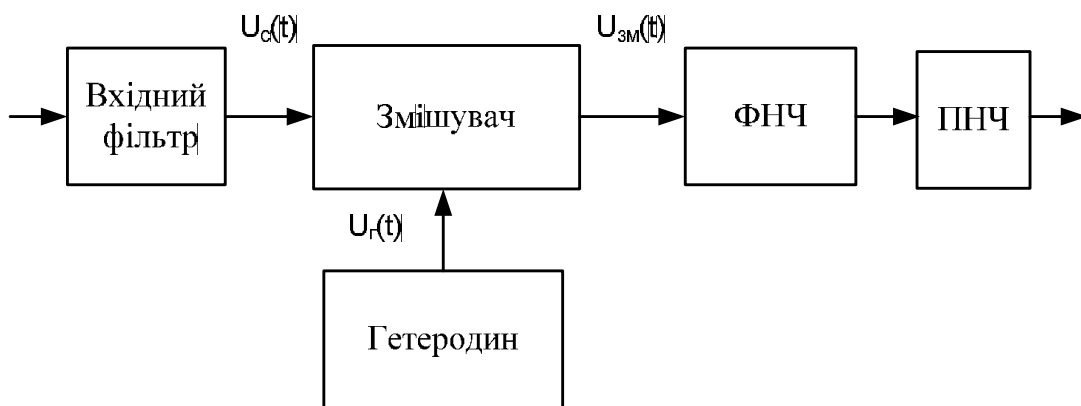


Рис. 2. Приймач прямого перетворення

Змішувач виконує функцію перемноження вхідного сигналу з сигналом гетеродина. Коливання з подвійною частотою сигналу фільтрується на виході змішувача без

будь-яких труднощів. На навантаженні змішувача виділяється корисна напруга, вона містить коливання лише різницевої частоти сигналу і гетеродина, і його амплітуда

пропорційна підсиленню змішувача. При цьому спектр прийнятих сигналів лінійно переходить в область низьких (інформаційних) частот. Корисний сигнал різницевої частоти виділяється у фільтрі нижніх частот (ФНЧ).

Внаслідок того, що в ППП основна селекція корисного сигналу здійснюється у ФНЧ, вхідний фільтр, на відміну від приймача прямого підсилення, може мати широку смугу пропускання – до однієї октави. Таким чином, розглянута структура дозволяє виключити складний вхідний фільтр [10]. Завдяки цьому виникає можливість побудови єдиного варіанта колійного приймача. Перестроювання на будь-яку частоту сигналу ТРК здійснюється шляхом лише зміни частоти гетеродина.

Відмітною рисою розглянутої структури ППП є те, що частота і фаза сигналу гетеродина повинна строго дорівнювати частоті і фазі прийнятого сигналу. У цьому випадку сигнал на виході змішувача має лише одну складову, яка дорівнює частоті модуляції  $F_m$ . Ця складова виділяється ФНЧ з відповідною частотою настроювання й далі застосовується для керування колійним реле.

Проблема синхронізації частот гетеродина та сигналу є найбільш складною у практичній реалізації ППП. При застосуванні систем автоблокування з централізованим

розміщенням апаратури АБТЦ, прийнятої в якості типової для устаткування ділянок при новому будівництві й капітальному ремонті, варіант рішення проблеми полягає в тому, що в якості сигналу гетеродина потрібно взяти сигнал несучої від "свого" колійного генератора. Для систем автоблокування з децентралізованим розміщенням апаратури рішенням проблеми є застосування системи фазового автопідстроювання частоти сигналу гетеродина.

**Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку.** Проблема синхронізації частот гетеродина та сигналу є найбільш складною у практичній реалізації ППП. При застосуванні систем автоблокування з централізованим розміщенням апаратури АБТЦ, прийнятої в якості типової для устаткування ділянок при новому будівництві й капітальному ремонті, варіант рішення проблеми полягає в тому, що в якості сигналу гетеродина потрібно взяти сигнал несучої від "свого" колійного генератора. Для систем автоблокування з децентралізованим розміщенням апаратури рішенням проблеми є застосування системи фазового автопідстроювання частоти сигналу гетеродина.

#### *Список використаних джерел*

1. Практичний посібник з технічного утримання апаратури тональних рейкових кіл [Текст] / П.Д. Кулик, О.О. Удовіков, В.І. Басов [та ін.] // ЦШ-0041. – К.: Укрзалізниця, 2006. – 288 с.
2. Кулик, П.Д. Тональные рельсовые цепи в системах ЖАТ: построение, регулировка, обслуживание, поиск и устранение неисправностей [Текст] / П.Д. Кулик, Н.С. Ивакин, А.А. Удовиков. – К.: Изд. дом «Мануфактура», 2003. – 216 с.
3. Дмитриев, В.С. Системы автоблокировки с рельсовыми цепями тональной частоты [Текст] / В.С. Дмитриев, В.А. Минин. — М.: Транспорт, 1992. — 182 с.
4. Сороко, В.И. Аппаратура железнодорожной автоматики и телемеханики [Текст]: справочник в 2-х т. / В.И. Сороко, В.А. Милуков; под ред. В.И. Сороко. – М.: НПФ Планета, 2000. – Т. 1 – 2.
5. Хісматулін, В.Ш. Теорія автоматичного керування. Ч. 1. Теорія лінійних неперервних систем автоматичного керування [Текст]: підруч. для вузів / В.Ш. Хісматулін, С.В. Панченко. – Харків: УкрДАЗТ, 2008. – 239 с.
6. Радиоприемные устройства [Текст]: учеб. для вузов / Н.Н. Фомин, Н.Н. Буга, О.В. Головин [и др.]. – М.: Горячая линия–Телеком, 1997. – 420 с.
7. Математическое моделирование и расчет систем управления техническими объектами [Текст]: учеб. пособие / Б.М. Борисов, В.И. Маларёв, Р.М. Проскуряков. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный горный институт, 2002. – 63 с.
8. Радиоприемные устройства [Текст] / под ред. А.П. Жуковского. – М.: Высшая школа, 1989. – 342 с.

9. Поляков, В.Т. Техника прямого преобразования [Текст] / В.Т. Поляков. – М.: Патриот, 1990. – 264 с.

10. Писар, Р.М. Вхідні фільтри універсальних колійних приймачів тональних рейкових кіл [Текст] / Р.М. Писар, В.Ш. Хісматулін // Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – Харків, 2013. – Вип. 141 – С. 31-36.

11. Чепцов, М.Н. Безопасность программного обеспечения приемника прямого преобразования тональных рельсовых цепей [Текст] / М.Н. Чепцов // Зб. наук. праць Дон. інст. залізнич. трансп. – Донецьк, 2006. – Вип. 4 – С. 54-61.

Рецензент д-р техн. наук, професор А.Б. Бойнік

---

Хісматулін Володимир Шайдулович, канд. техн. наук, професор, кафедра автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: 730-10-32.

Козар Катерина Валеріївна, магістрант, кафедра автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту. E-mail: kozar.ekaterina@mail.ru.

Khismatulin Volodymyr Sh. cand. of techn. sciences, professor of department Computer automation and telecontrol train traffic Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.:7301032

Kozar Ekaterina, master student of department Computer automation and telecontrol train traffic Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: kozar.ekaterina@mail.ru.

Наукова праця здана до друку 22.09.2015 р.