

## АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ТОНАЛЬНОЙ РЕЛЬСОВОЙ ЦЕПИ ПЕРЕГОНА

В даній статті проведено порівняльний аналіз методик розрахунків тонального рейкового кола перегону з використанням двох існуючих методик та однієї вдосконаленої.

*Ключові слова:* тональне рейкове коло перегону, еквівалентний опір, ізоляція баласту, порівняльний аналіз методик розрахунків

В данной статье проведен сравнительный анализ методик расчетов тональной рельсовой цепи перегона с использованием двух существующих и одной усовершенствованной методики.

*Ключевые слова:* тональная рельсовая цепь перегона, эквивалентное сопротивление, изоляция балласта, сравнительный анализ методик расчетов

In this paper a comparative analysis of computation methods of railway track circuit of tonal frequency on trackside, using two current and one advanced techniques, is made.

*Keywords:* track circuit of tonal frequency on trackside, equivalent resistance, insulation of ballast, comparative analysis of computation methods

### Введение

Рельсовая цепь является основным путевым датчиком систем, с помощью которых регулируется движение на железнодорожных магистралях и обеспечивают при этом высокий уровень безопасности. Работа каждой рельсовой цепи характеризуется определенными строго заданными критериями, которые получают в результате электрического расчета каждого из режимов работы.

В настоящее время тональные рельсовые цепи (ТРЦ) активно эксплуатируются при отсутствии изолирующих стыков (ИС), вследствие чего повышаются их эксплуатационно-экономические характеристики. Для определения критериев работы рельсовой цепи с ИС используют общие, а также основные схемы замещения [1 – 3]. В бесстыковых рельсовых цепях (БРЦ) проблема усугубляется из-за необходимости учета влияния смежных рельсовых цепей (РЦ).

В литературе предложены различные методики, компенсирующие отсутствие стыков [1, 3], при котором необходимо провести перерасчет параметров четырехполюсника рельсовой линии РЦ [1] либо использовать измененную основную схему замещения [2] для расчета.

### Анализ проблемы

Одним из вопросов при расчете тональной рельсовой цепи является близость математической модели к ее реально эксплуатируемому

условиям, таким как параметры кабельных и рельсовых линий смежных ТРЦ, выходные сопротивления фильтров ФПУ или ФПМ [4] и др.

Для тональных рельсовых цепей, содержащих один или два ИС, расчеты критериев режимов работы (коэффициенты перегрузки, шунтовой чувствительности, тока локомотивной сигнализации, чувствительности к поврежденному рельсу [5]) значительно упрощаются. Однако, в реальных условиях на перегоне без ИС эксплуатируются все ТРЦ кроме двух, граничащих со станцией. Кроме этого, при наличии короткой смежной рельсовой линии ее аппаратура может вносить изменения в цепь протекания тока утечки, увеличивая его, особенно при несущих частотах 420 и 480 Гц. В данном случае изменяются электрические параметры сигналов на релейных концах даже в ТРЦ с равными плечами, что необходимо учитывать. Таким образом, анализ методов замещения ИС в расчетах является актуальным.

*Целью работы* является определение оптимальной методики замещения ИС в расчетах ТРЦ, включая существующие методы и метод с наибольшим приближением к реальным условиям эксплуатации.

### Расчет по эквивалентным формулам

Методика расчета непосредственно рельсовых цепей тональной частоты без ИС, описанная в [1], предусматривает отсутствие ИС изменением параметров рельсовой линии (РЛ), которые определяются по табл. 1.

Таблица 1

Расчетные параметры рельсовой линии  
нормального режима

Параметры рельсовой линии	РЛ с ИС	РЛ без ИС
$A$	$\text{ch}(\gamma l)$	$\text{ch}(\gamma l) + \text{sh}(\gamma l)$
$B$	$Z_b \text{sh}(\gamma l)$	$Z_b \text{sh}(\gamma l)$
$C$	$\text{sh}(\gamma l) / Z_b$	$2(\text{ch}(\gamma l) + \text{sh}(\gamma l)) / Z_b$
$D$	$\text{ch}(\gamma l)$	$\text{ch}(\gamma l) + \text{sh}(\gamma l)$

В табл. 1 приведены такие параметры:

$A, B, C, D$  – параметры РЛ как четырехполюсника;

$\gamma$  – коэффициент волнового распространения РЛ;

$l$  – длина рельсовой линии;

$Z_b$  – волновое сопротивление РЛ.

Как видно из табл. 1, при отсутствии ИС не учитываются параметры подключения смеж-

ных рельсовых цепей, в том числе расстояние к месту подключения не только рядом находящегося приемника, но и генераторов остальных рельсовых цепей. В данном расчете принимается, что к электрически длинной линии подключается аппаратура питающего и релейного конца. Дополнительно, в этом же источнике приводятся формулы расчета параметров РЛ с учетом ИС либо на питающем (ПК), либо на релейном (РК) конце. Это дает возможность провести расчет шунтового, контрольного режима, режима короткого замыкания и АЛС.

Недостатком методики, использующей вышеприведенные формулы, является отсутствие привязки к конкретным путевым условиям, что в расчете приводит к искажению полученных результатов.

### Расчет по измененной схеме

Кроме вышеуказанного способа замещения ИС при эксплуатации бесстыковой ТРЦ, существует методика расчета ТРЦ, основная схема замещения которой приведена в [3] и показана на рис. 1.

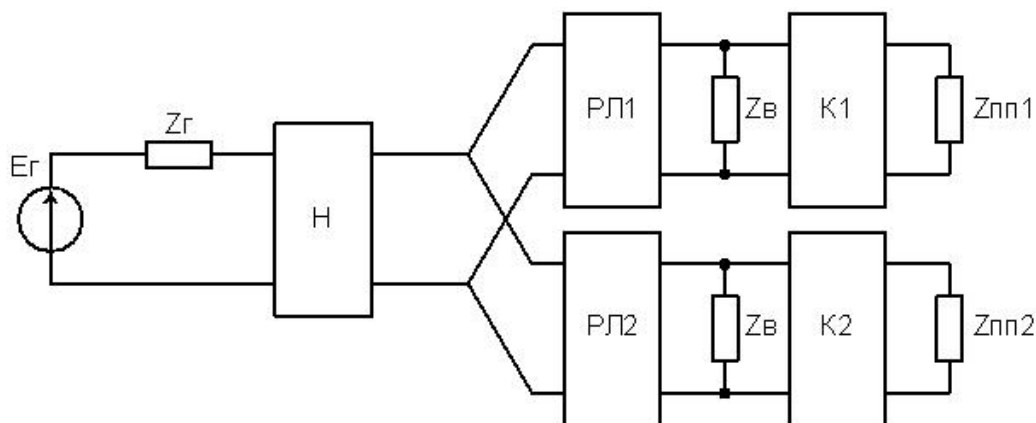


Рис. 1. Схема замещения тональной рельсовой цепи

В данной схеме приняты такие обозначения:

- ЭДС генератора  $E_G$ ;
- сопротивление генератора  $Z_G$ ;
- четырехполюсник аппаратуры начала рельсовой цепи (питающего конца)  $H$ ;
- четырехполюсники рельсовых линий РЛ (параметры из табл. 1, 2-й столбец);
- четырехполюсники аппаратуры конца рельсовой цепи (релейного конца)  $K$ ;
- волновое сопротивление  $Z_b$ ;
- входное сопротивление путевого приемника  $Z_{пп}$ .

В 4-полюснике  $H$  учтены параметры фильтра, конденсатора АЛС, кабельного сопротивле-

ния, кабеля питающего конца, путевого ящика питающего конца. 4-полюсник РЛ учитывает параметры рельсовой линии как электрического элемента рельсовой цепи. В 4-полюснике  $K$  предусмотрены параметры путевого ящика релейного конца, кабельной линии релейного конца, кабельного сопротивления, конденсатора АЛС. Представленная измененная схема замещения дополнительно учитывает отсутствие изолирующих стыков включением волнового сопротивления  $Z_b$  параллельно релейному концу расчетной рельсовой цепи, а также включением эквивалентного сопротивления от смежной РЦ с дополнительным волновым сопротивлением.

Аналогично предыдущему методу, не учитывается полностью наличие эквивалентных сопротивлений от подключения ПК и РК аппаратуры смежных и близлежащих ТРЦ, особенно при коротких длинах смежных ТРЦ и длинных расчетных рельсовых цепях, в том числе на низких несущих частотах.

### Расчет по реальным условиям

Т.к. ИС относятся к системе рельсовой цепи, то для наибольшего приближения к реально существующим условиям эксплуатации при расчете ТРЦ предлагаю использовать основную схему замещения, изображенную на рис. 2:

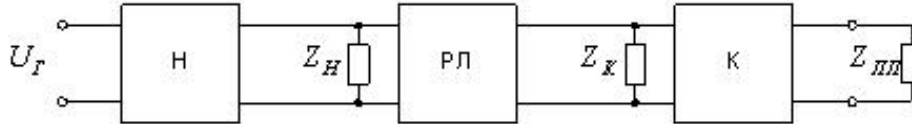


Рис. 2. Основная схема замещения для расчета ТРЦ

На основной схеме замещения (см. рис. 2)  $Z_H$  и  $Z_K$  – эквивалентные сопротивления (ЭС), которые учитывают включение аппаратуры близлежащих ТРЦ перегона со стороны ПК и РК соответственно. Отличие от существующих методик состоит в оптимальном определении значений ЭС. При этом необходимо учитывать

реальные условия эксплуатации, например, длины рельсовых и кабельных линий и др.

Достаточно важно провести точный расчет  $Z_H$  и  $Z_K$  для каждого значения сопротивления балласта  $Z_B$ , не только при 1 Ом·км и 50 Ом·км (крайние значения для расчета нормального и шунтового режимов). Схема замещения сопротивлений изображена на рис. 3:

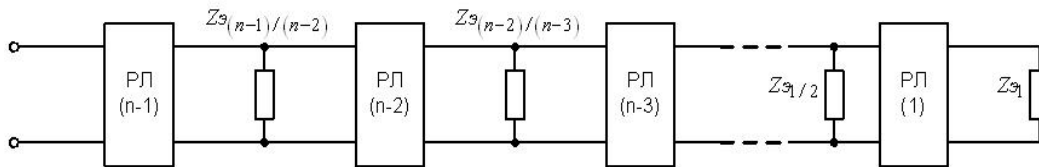


Рис. 3. Схема замещения ЭС  $Z_H$  и  $Z_K$

На схеме замещения ИС показано: РЛ( $n-1$ ), РЛ( $n-2$ ), РЛ( $n-3$ ), РЛ(1) – рельсовые цепи со стороны релейного либо релейного конца;  $Z_{Э1}$ ,  $Z_{Э1/2}$ ,  $Z_{Э(n-1)/(n-2)}$ ,  $Z_{Э(n-2)/(n-3)}$  – эквивалентные сопротивления от аппаратуры ПК или РК рельсовых цепей перегона.

### Определение эквивалентных сопротивлений

Сопротивления  $Z_H$  и  $Z_K$ , исходя из рис. 3, определяются следующим образом: сначала вычисляется сопротивление, замещающее РЛ(1) с нагрузкой  $Z_{Э1}$ :

$$Z_{\{1\}} = \frac{A_{РЛ(1)} \cdot Z_{Э1} + B_{РЛ(1)}}{C_{РЛ(1)} \cdot Z_{Э1} + D_{РЛ(1)}} \quad (1)$$

Далее производится вычисление сопротивления, вносимого РЛ(1) и РЛ(2):

$$Z_{\{1-2\}} = \frac{A_{РЛ(2)} \cdot \frac{Z_{Э1/2} \cdot Z_{\{1\}}}{Z_{Э1/2} + Z_{\{1\}}} + B_{РЛ(2)}}{C_{РЛ(2)} \cdot \frac{Z_{Э1/2} \cdot Z_{\{1\}}}{Z_{Э1/2} + Z_{\{1\}}} + D_{РЛ(2)}} \quad (2)$$

По формуле (2) производится свертка сопротивлений до значения  $Z_{\{1-(n-1)\}}$ , которое представляет собой  $Z_K$  или  $Z_H$  и определяется по формуле (3):

$$Z_{\{1-(n-1)\}} = \frac{A_{РЛ(n-1)} \cdot \frac{Z_{Э(n-1)/(n-2)} \cdot Z_{\{1-(n-2)\}}}{Z_{Э(n-1)/(n-2)} + Z_{\{1-(n-2)\}}} + B_{РЛ(n-1)}}{C_{РЛ(n-1)} \cdot \frac{Z_{Э(n-1)/(n-2)} \cdot Z_{\{1-(n-2)\}}}{Z_{Э(n-1)/(n-2)} + Z_{\{1-(n-2)\}}} + D_{РЛ(n-1)}}, \quad (3)$$

где  $n$  – порядковый номер рассчитываемой ТРЦ; в скобках  $\{ \}$  указываются номера рельсовых линий, которые учитываются данным сопротивлением (с ЭС от ПК и РК рельсовой цепи).

### Оптимизация определения эквивалентных сопротивлений

При наличии на перегоне большого количества ТРЦ усложняется процесс вычисления и значительно увеличивается его громоздкость при отсутствии средств автоматического вычисления. Учитывая вышесказанное, предлагается пошагово изменять количество учитываемых ТРЦ и контролировать изменение определяемой величины ЭС по их соотношению. При превышении заданного соотношения (назовем его ошибкой расчета) необходимо рассчитать эквивалентное сопротивление с учетом большего количества смежных рельсовых цепей. Для сопротивлений  $Z_H$  и  $Z_K$ , например, первое

приближение  $Z_{H[1]}$  и  $Z_{K[1]}$  можно описать схемой, показанной на рис. 4.

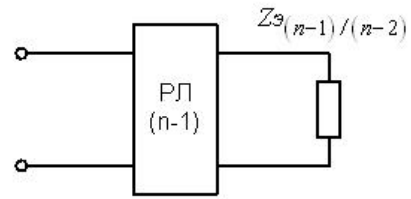


Рис. 4. Первое приближение при расчете сопротивлений, эквивалентное отсутствию ИС

Второе и третье приближения при расчете  $Z_H$  описываются схемами, показанными на рис. 5, и рассчитываются по формуле (3).

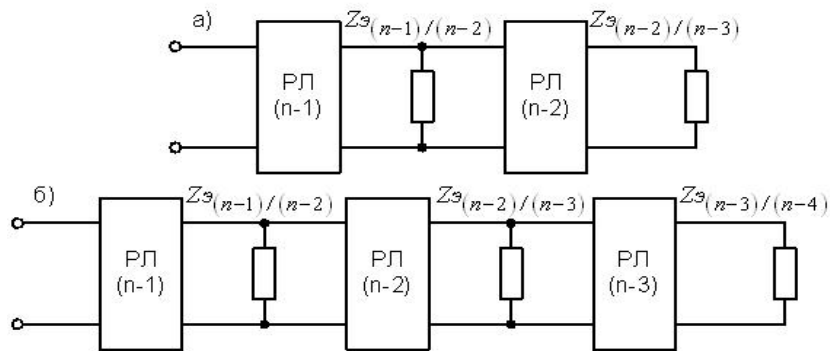


Рис. 5. Второе (а) и третье (б) приближения при расчете  $Z_H$

Во время вычисления приближенных значений строится график амплитудного изменения данных сопротивлений и определяется пошаговая ошибка:

$$\delta_i = \frac{Z_{[i+1]} - Z_{[i]}}{Z_{[i+1]}} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где  $\delta_i$  – ошибка  $i$ -го шага расчета;  $Z_{[i+1]}$ ,  $Z_{[i]}$  –  $i$ -е и  $(i + 1)$ -е приближение ЭС.

Количество приближений в расчете сопро-

тивлений  $Z_H$  и  $Z_K$  будет минимально необходимым в том случае, когда ошибка  $i$ -го шага расчета будет меньше заданного порогового значения и дополнительно проделано не менее 3-х приближений для исключения недостоверности полученных данных.

Значения  $Z_{Э}$  (все, кроме  $Z_{Э1}$ ), которые представляют собой эквивалент подключения аппаратуры РК или ПК, определяются из структурной схемы на рис. 6 и вычисляются по формуле (5).

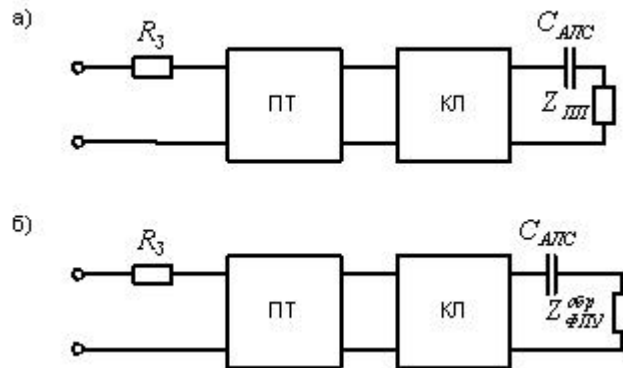


Рис. 6. Структурная схема для определения  $Z_{Э}$  РК (а) и ПК (б)

На структурной схеме эквивалентного сопротивления  $Z_{\Sigma}$  (рис. 6) показаны следующие сокращения: ПТ – путевой трансформатор; КЛ – кабельная линия;  $R_3$  – защитное сопротивление;  $C_{АЛС}$  – конденсатор автоматической локомотивной сигнализации (АЛС);  $Z_{ПТ}$  – сопротивление путевого приемника (составляет 140 Ом при совпадении несущей и модулирующей частоты и 0 Ом в остальных случаях [1, 5]);  $Z_{ФПУ}^{обр}$  – обратное входное сопротивление фильтра ФПУ (определяется из [3]). При вы-

числении значений  $Z_{\Sigma 1}$  и  $Z_{\Sigma (n+k)}$  вместо ПТ и  $R_3$  присутствует дроссель-трансформатор.

$$Z_{\Sigma} = \frac{\underline{A}_{АП} \cdot Z_{нагр} + \underline{B}_{АП}}{\underline{C}_{АП} \cdot Z_{нагр} + \underline{D}_{АП}}, \quad (5)$$

где  $\underline{A}_{АП}$ ,  $\underline{B}_{АП}$ ,  $\underline{C}_{АП}$ ,  $\underline{D}_{АП}$  – параметры общего 4-полосника аппаратуры  $R_3$ , ПТ, КЛ,  $C_{АЛС}$  и определяются по формуле (6);  $Z_{нагр}$  – сопротивление  $Z_{ПТ}$  или  $Z_{ФПУ}^{обр}$  (в зависимости от подключения ПК или РК).

$$\begin{pmatrix} \underline{A}_{АП} & \underline{B}_{АП} \\ \underline{C}_{АП} & \underline{D}_{АП} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & R_3 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \underline{A}_{ПТ} & \underline{B}_{ПТ} \\ \underline{C}_{ПТ} & \underline{D}_{ПТ} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \underline{A}_{КЛ} & \underline{B}_{КЛ} \\ \underline{C}_{КЛ} & \underline{D}_{КЛ} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & -\frac{j}{\omega \cdot C_{АЛС}} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

### Сравнительные результаты методик

Ниже в качестве примера приведены расчеты вышеуказанными методами. Исходные данные: количество ТРЦ на перегоне – 27, несущая частота – 420 Гц, модулирующая частота – 8 Гц, длина РЦ – 600 м, количество ТРЦ со сто-

роны ПК и РК – по 13 (использованы данные реального перегона с ТРЦ).

На рис. 7 и 8 показаны графики изменения сопротивлений, эквивалентных отсутствию ИС при крайних значениях изоляции балласта для приближения  $Z_H$  и  $Z_K$ , соответственно.

В табл. 1 сведены результаты расчетов ТРЦ различными методами.

Таблица 1

Результаты расчетов

	Метод формул источника [1]	Метод схемы замещения из [3]	Метод максимальных приближений
Напряжение генератора, В	3,633	3,712	4,004
Коэффициент перегрузки	1,704	1,844	1,642
Мощность при КЗ, В·А	1,513	1,58	1,519
Коэффициент шунтовой чувствительности на питающем конце	5,801	5,692	5,793
Коэффициент шунтовой чувствительности на релейном конце	4,582	4,584	4,588
Абсолютная шунтовая чувствительность на питающем конце, Ом	0,69	0,406	0,694
Абсолютная шунтовая чувствительность на релейном конце, Ом	0,53	0,193	0,534
Коэффициент чувствительности к поврежденному рельсу	7,8	7,877	7,766

### Выводы по работе

Проанализировав расчеты ТРЦ по различным методам замещения ИС можно сказать, что методом максимального приближения к реальным условиям работы в нормальном режиме получено значение напряжения генератора, необходимое для работы рельсовой цепи тональной частоты выше, чем при расчетах другими методами. В результате этого при за-

ниженном напряжении на путевом приемнике может не корректно выполняться работа при низком сопротивлении балласта за счет уменьшения фактического коэффициента запаса на срабатывание. Либо при низком значении сопротивления изоляции балласта и пониженном напряжении сети питания рельсовая цепь не будет выполнять своей основной функции по определению свободы участка пути. В остальном, все коэффициенты в пределах нормы.

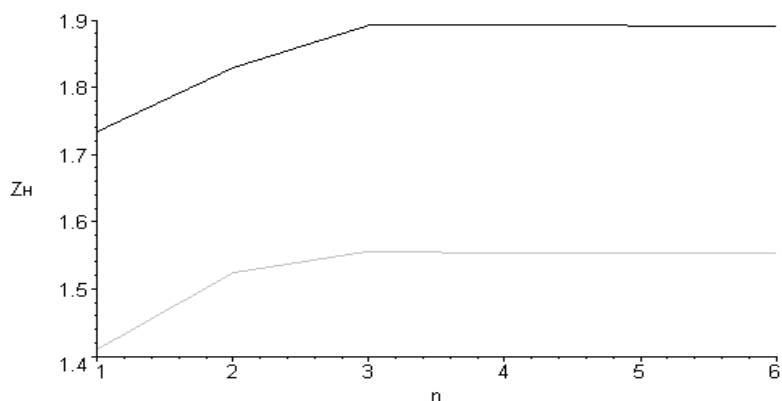


Рис. 7. Зависимость амплитуды сопротивления  $Z_H$  от количества приближений при сопротивлении изоляции балласта 1 Ом·км (серый) и 50 Ом·км (черный)

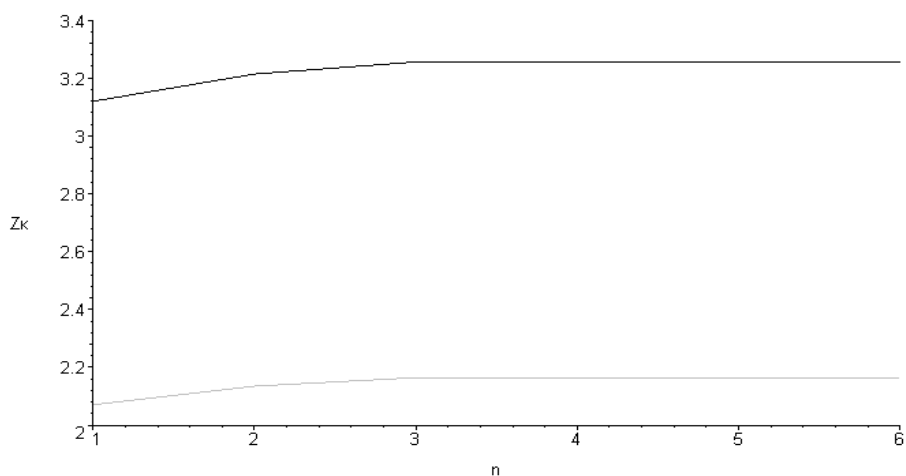


Рис. 8. Зависимость амплитуды сопротивления  $Z_K$  от количества приближений при сопротивлении изоляции балласта 1 Ом·км (серый) и 50 Ом·км (черный)

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аркатов, В. С. Рельсовые цепи. Анализ работы и техническое обслуживание [Текст] / В. С. Аркатов, Ю. А. Кравцов, Б. М. Степенский. – М.: Транспорт, 1990. – 295 с.
2. Путевая блокировка и авторегулировка [Текст] : учебник для вузов / Н. Ф. Котляренко [и др.]; под ред. Н. Ф. Котляренко. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1983. – 408 с.
3. Кулик, П. Д. Тональные рельсовые цепи в системах ЖАТ [Текст] / П. Д. Кулик, Н. С. Иванкин, А. А. Удовиков. – К.: Изд. дом «Мануфактура», 2004. – 288 с.
4. Практичний посібник з технічного утримання апаратури тональних кіл ЦШ-0041 [Текст]. – К., 2006. – 236 с.
5. Методичні вказівки з експлуатації тональних рейкових кіл ЦЦ-0034 [Текст] / Гол. управління автоматики, телемеханіки та зв'язку. – К.: Вид. дім «Мануфактура». 2004. – 48 с.

Поступила в редколлегию 26.05.2010.

Принята к печати 15.06.2010.