

УДК 656.259.9

Сергей Валентинович Бушуев, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Уральского государственного университета путей сообщения, проректор по научной работе и международным связям Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,
Антон Николаевич Попов, аспирант кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

ОБЕСПЕЧЕНИЕ СХОДИМОСТИ И ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ СИГНАЛОВ ТОНАЛЬНЫХ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ

Sergey V. Bushuev, PhD in Engineering, Associate Professor at the chair 'Automation, signaling and communication on railway transport' of the Ural State University of Railway Transport, Vice-Rector of Scientific Work and International Affairs of the Ural State University of Railway Transport (USURT).

Anton N. Popov, post-graduate student of the chair 'Automation, signaling and communication on railway transport' of the Ural State University of Railway Transport.

Measurement Precision And Repeatability Control Of Audio Frequency Track Circuit Signals

Аннотация

Ряд преимуществ тональных рельсовых цепей обусловил их широкое внедрение на железнодорожном транспорте. Принцип действия таких рельсовых цепей основан на сигналах сложной формы. Существующие измерители систем технической диагностики и переносные измерительные приборы не обеспечивают сходимость и воспроизводимости результатов измерений сигналов тональных рельсовых цепей.

В статье исследована форма сигналов в разных точках тональной рельсовой цепи. Рассмотрено влияние формы сигналов на точность, сходимость и воспроизводимость измерений.

Ключевые слова: тональная рельсовая цепь, системы технической диагностики и мониторинга, среднеквадратическое значение, качество измерений, амплитудно-модулированные сигналы, перемодуляция.

Abstract

The number of advantages of audio frequency track circuits stipulates their wide implementation on railway transport. The functional principle of such track circuits is based on complex waves. The existing meters of technical diagnostics systems and portable meters don't assure precision and repeatability of measurement results of audio frequency track circuit signals.

In the article the signals form in various points of audio frequency track circuit has been investigated. It has been also examined the influence of signals form on measurement accuracy, precision and repeatability.

Key words: audio frequency track circuit, technical diagnostics and monitoring systems, root-mean-square value, measurement quality, amplitude-modulated signals, overmodulation.

Рельсовая цепь — один из основных элементов систем железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ). От надежной работы рельсовых цепей зависит безопасность движения.

На сегодняшний день благодаря ряду преимуществ все большее распространение находят тональные рельсовые цепи (ТРЦ). Использование частот тонального диапазона позволяет существенно повысить помехозащищенность и ослабить взаимные влияния соседних рельсовых цепей, централизованно размещать аппаратуру рельсовых цепей, в несколько раз снизить потребляемую мощность и исключить изолирующие стыки. Однако, как и все типы рельсовых цепей, ТРЦ требуют выполнения правильной регулировки, периодических измерений параметров и контроля своего состояния согласно технологическим картам для обеспечения необходимой надежности и безопасной работы.

Для контроля текущего состояния, настройки и регулировки ТРЦ в настоящее время применяется ряд приборов разных производителей. Кроме того, переход к техническому обслуживанию по состоянию требует активной разработки и внедрения систем технической диагностики и мониторинга (СТДМ), позволяющих отслеживать динамику изменения контролируемых параметров. Поэтому очень важно для создания эффективной системы обслуживания ТРЦ использовать измерительные приборы, показания которых обладают свойствами сходимости и воспроизводимости с измерительными средствами систем диагностики, что в настоящее время не всегда выполняется.

С другой стороны, важной характеристикой для систем диагностики является длительность цикла измерений всех объектов на станции, но при эксплуатации уменьшение времени

измерения каждого объекта снижает точность, поэтому следует говорить не только о точности, но и о качестве измерений вообще. Под качеством измерений понимают совокупность свойств, обеспечивающих получение в установленный срок результатов измерений с требуемой точностью, достоверностью, правильностью, сходимостью и воспроизводимостью [1].

К сожалению, особенно для ТРЦ вопросы скорости измерений практически не рассматриваются, а вопросы сходимости и воспроизводимости находятся на начальном этапе изучения. Из редких публикаций [2 — 4] следует, что результаты, полученные применяемыми для измерений в ТРЦ приборами разных типов и даже разными приборами одного типа, в зависимости от точки включения прибора в рельсовую цепь, различаются на 10 — 40%. Это говорит о низкой сходимости и воспроизводимости таких измерений. Причинами значительного расхождения показаний авторы считают разное входное сопротивление приборов [5], сложную форму самих сигналов ТРЦ и операции цифровой обработки сигналов.

Исследуем, как влияет форма сигнала ТРЦ на разброс показаний приборов. Сигналы ТРЦ характеризуются среднеквадратическим значением (СКЗ). Среднеквадратическое значение за интервал времени τ [6] равно

$$U = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_{t_0}^{t_0+\tau} u^2(t) dt}. \quad (1)$$

СКЗ, мера способности электрического сигнала выделять теплоту, определяется как площадь под кривой сигнала, усредненная на интервале времени τ . При $\tau = \infty$ получается истинное СКЗ. Если сигнал периодический, то средняя площадь каждого периода — величина постоянная и равна средней площади любого числа периодов, т. е. для периодических сигналов истинное СКЗ может быть получено при $\tau = kT$, где T — период сигнала $u(t)$, k — натуральное число.

Если при измерении СКЗ периодических сигналов $\tau \neq kT$ (рис. 1), то полученное значение будет отличаться от истинного. Появится методическая погрешность [7 — 8]. Причем величина погрешности будет определяться формой сигнала, длительностью интервала измерений τ , а также фазой сигнала в момент начала измерений. Таким образом, рассматриваемая методическая погрешность определяется не только характеристиками средств измерений, но и свойствами самого сигнала.

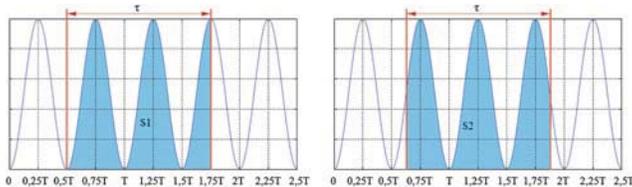


Рисунок 1 — Измерение СКЗ при $\tau \neq kT$

Оценим методическую погрешность в процентах отклонения от истинного СКЗ U' по выражению

$$E = \left(\frac{U}{U'} - 1 \right) \cdot 100\% \quad (2)$$

и определим, в какой области может изменяться погрешность, обусловленная рассмотренным эффектом при измерениях в ТРЦ.

Рассмотрим сигналы ТРЦ в разных точках рельсовой цепи: на входе путевого приемника (рис. 2), выходе путевого генератора (рис. 3) и выходе путевого фильтра (рис. 4) и их спектры, чтобы выяснить, как форма сигналов влияет на результат измерения.

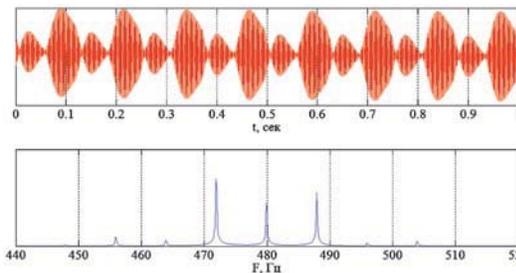


Рисунок 2 — Сигнал на входе путевого приемника ТРЦ и его спектр

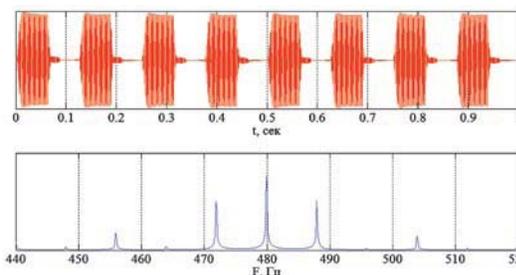


Рисунок 3 — Сигнал на выходе путевого генератора ТРЦ и его спектр

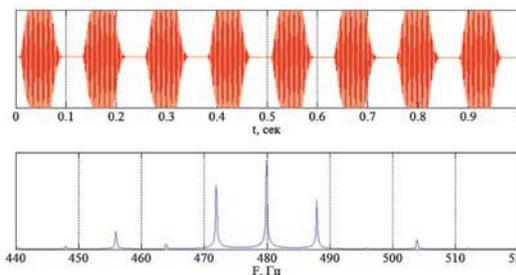


Рисунок 4 — Сигнал на выходе путевого фильтра ТРЦ и его спектр

Вид спектров показывает, что эти сигналы можно рассматривать как однотоновые амплитудно-модулированные (ОАМ) сигналы с перемодуляцией (коэффициентом модуляции больше 1). Такой сигнал состоит из несущего и модулирующего колебаний, а замена реальных сигналов ТРЦ на ОАМ позволит исследовать влияние интервала измерений, формы и начальной фазы сигнала на точность измерений.

Аналитическое выражение для ОАМ сигнала записывается следующим образом [9]:

$$S(t) = U_m [1 + M \sin(2\pi F_M t + \varphi_M)] \sin(2\pi F_H t + \varphi_H), \quad (3)$$

где M — коэффициент модуляции.

Вычисление (1) после подстановки в него (3) дает сложное выражение, практическое использование которого затруднительно. ОАМ-сигнал состоит из двух синусоидальных составляющих с разными частотами, причем частота модуляции значительно ниже несущей частоты. Погрешность измерения СКЗ

синусоидального сигнала затухает с увеличением интервала измерения и имеет нулевые значения, если в интервал измерения помещается целое число полупериодов [7]. Поэтому можно предположить, что несущая частота оказывает меньшее влияние на погрешность, чем частота модуляции при измерении сигнала ТРЦ. Так как сигнал ТРЦ не имеет симметрии относительно полупериода, в отличие от синусоидального сигнала, то, чтобы избавиться от влияния модулирующей частоты, следует рассмотреть влияние несущей на периоде частоты модуляции.

Рассмотрим, как влияет методическая погрешность от несущего колебания на одном периоде сигнала ТРЦ на результат измерений. Несущее колебание сигнала ТРЦ представляет собой синусоиду с частотами для ТРЦЗ 420, 480, 580, 720 или 780 Гц, а для ТРЦ4 4545, 5000 или 5555 Гц. Наибольшая методическая погрешность для синусоидального сигнала может быть определена по выражениям [7]:

$$E = \left(\sqrt{1 + \frac{1}{2\pi F_c \tau}} - 1 \right) \cdot 100\%; \quad (4)$$

$$E = \left(\sqrt{1 - \frac{1}{2\pi F_c \tau}} - 1 \right) \cdot 100\%. \quad (5)$$

Для всех возможных комбинаций частот сигналов ТРЦ вычислим по выражениям (4), (5) наибольшие значения погрешности измерений несущего колебания на одном периоде сигнала ТРЦ (табл. 1).

Таблица 1 — Погрешность измерений несущего колебания на одном периоде сигнала ТРЦ

Частота модуляции, Гц	Несущая частота, Гц	Количество периодов несущей частоты в периоде сигнала ТРЦ	Наибольшая погрешность измерения несущей частоты за один период сигнала ТРЦ, %
8	420	52,5	0,15
	480	60	0,13
	580	72,5	0,11
	720	92	0,09
	780	97,5	0,08
	4545	568,1	0,01
	5000	625	0,01
	5555	694,4	0,01
12	420	35	0,23
	480	40	0,2
	580	48,33	0,17
	720	60	0,13
	780	65	0,12
	4545	378,8	0,02
	5000	416,7	0,02
	5555	462,9	0,02

В наихудшем случае — при комбинации частот 420/12 — погрешность не превысит 0,23%. Следует отметить, что наибольшее значение погрешности затухает с ростом интервала измерения (рис. 5).

Поэтому увеличение интервала измерения более одного периода сигнала ТРЦ приведет к еще большему снижению погрешности. Таким образом, влиянием несущего колебания на погрешность измерения сигнала ТРЦ можно пренебречь и рассматривать только влияние огибающей.

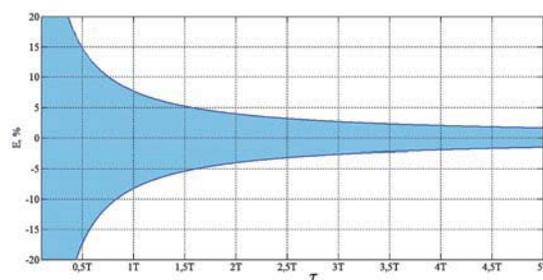


Рисунок 5 — Область значений погрешности для синусоидального сигнала

Рассмотрим зависимость величины методической погрешности измерения сигнала ТРЦ от формы огибающей. При амплитудной модуляции связь между огибающей и модулирующим сигналом $s(t) = \sin(2\pi F_M t + \varphi_M)$ определяется следующим образом:

$$S(t) = U_m [1 + M \sin(2\pi F_M t + \varphi_M)]. \quad (6)$$

В соответствии с (1) получим выражение для определения СКЗ огибающей сигнала ТРЦ

$$U = U_m \sqrt{\frac{M^2 + 2}{2} + 2M \frac{\cos(\frac{\psi}{2}) - \cos(2\pi F \tau + \frac{\psi}{2})}{\pi F \tau} + \frac{M^2}{2} \frac{\sin(\psi) - \sin(4\pi F \tau + \psi)}{4\pi F \tau}}, \quad (7)$$

где $\psi = 4\pi F_M t_0 + 2\varphi_M$ — величина, зависящая от момента начала измерения.

Для оценки методической погрешности измерения огибающей сигнала ТРЦ по выражению (2) требуется знать истинное СКЗ огибающей. Получим его, устремив к бесконечности в (7) интервал измерения τ , и подставим полученное значение в (2)

$$E = \left(\sqrt{1 + \frac{4M}{2 + M^2} \frac{\cos(\frac{\psi}{2}) - \cos(2\pi F \tau + \frac{\psi}{2})}{2\pi F \tau} + \frac{M^2}{2 + M^2} \frac{\sin(\psi) - \sin(4\pi F \tau + \psi)}{4\pi F \tau}} - 1 \right) 100\%. \quad (8)$$

Если интервал измерения не синхронизирован с сигналом (ψ — случайная величина), то для получения точных границ области методической погрешности можно определить максимальные и минимальные значения, которые могут принимать функции $K_1 = \cos(\psi/2) - \cos(2\pi F \tau + \psi/2)$ и $K_2 = \sin(\psi) - \sin(4\pi F \tau + \psi)$ при одинаковых значениях аргументов. Можно также определить с заданной вероятностью значения K_1 и K_2 путем статистических исследований реальных сигналов ТРЦ.

Первый способ не учитывает отличий ОАМ-модели от реальных сигналов ТРЦ, которые имеют в своем спектральном составе дополнительные гармонические составляющие (см. рис. 2 — 4). Поэтому погрешность реальных сигналов может выходить за полученные границы.

Второй способ обладает большей трудоемкостью, но позволяет получить наиболее точные результаты.

Возможно также заменить каждую тригонометрическую функцию в (8) ее областью определения. При одинаковых значениях аргументов области определения функции в (8)

будут несколько хуже, но это обеспечит запас для учета отличий между ОАМ-моделью и сигналами ТРЦ, а также упростит расчетное выражение. В дальнейшем предлагаемая модель может быть уточнена.

Заменим в (8) тригонометрические функции областью их определения и получим:

$$E_{\max} = \left(\sqrt{1 + \frac{M(8+M)}{2\pi F\tau(2+M^2)}} - 1 \right) 100; \quad (9)$$

$$E_{\min} = \left(\sqrt{1 - \frac{M(8+M)}{2\pi F\tau(2+M^2)}} - 1 \right) 100. \quad (10)$$

Коэффициенты модуляции сигналов ТРЦ находятся в пределах от 1 до 4, что видно по их спектральному представлению (см. рис. 2 — 4). Для указанной области построим зависимость погрешности от коэффициента модуляции для двух значений интервала измерения $\tau = 1,5$ периода огибающей и $\tau = 1,75$ периода огибающей (рис. 6).

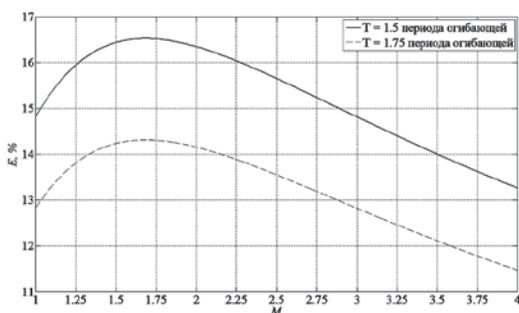


Рисунок 6 — Зависимость погрешности от коэффициента модуляции

Оба графика показывают, что максимум погрешности наблюдается при значении коэффициента модуляции, примерно равном 1,7. Используем именно это значение, чтобы получить границы области погрешности для сигналов ТРЦ (рис. 7).

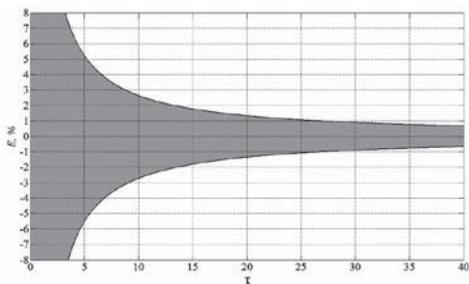


Рисунок 7 — Область погрешности для сигнала ТРЦ

Необходимый интервал измерений для обеспечения заданной величины погрешности определяется по выражению

$$\tau = \frac{M(M+8)}{2\pi F(E_3^2 + 2E_3)(M^2 + 2)}. \quad (11)$$

Границы области погрешности достигают значений менее 2% при интервале измерения более 13 периодов сигнала ТРЦ (1,1 с — для частоты модуляции 12 Гц или 1,66 с — для частоты модуляции 8 Гц) и менее 1% при интервале измерения более 28 периодов (2,4 с — для частоты модуляции 12 Гц или 3,5 с — для частоты модуляции 8 Гц). Кроме того, измеритель должен обеспечивать значение погрешности измерений для обеих частот модуляции, т. е. следует выбирать наибольший интервал измерения. Применение такого способа для выбора параметров измерителей сигналов ТРЦ весьма ограничено — полученный измеритель будет обладать недостаточным быстродействием.

Рассмотрим возможности увеличения быстродействия измерителей без потери точности измерений. Графиком функции погрешности измерений (8) является поверхность, зависящая от двух переменных: фазы в момент начала измерений и интервала измерений. Полагая, что влиять на фазу измеряемого сигнала мы не можем, интерес будет представлять проекция полученной зависимости в плоскости $(E; \tau)$, приведенная для значения коэффициента модуляции $M = 1,7$ (рис. 8).

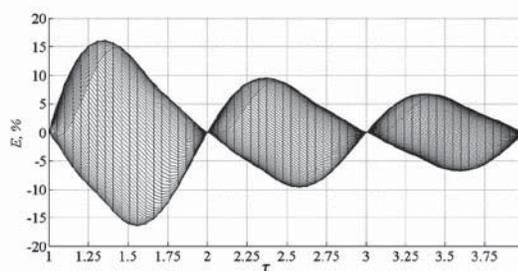


Рисунок 8 — Зависимость погрешности от интервала измерения для сигналов ТРЦ

Погрешность может принимать любые значения из заштрихованной области, в зависимости от фазы сигнала в момент начала измерения при заданном интервале измерения.

Точки, в которых погрешность равна нулю, соответствуют случаю, когда в интервал измерения помещается целое число периодов сигнала.

Для синтеза подходящего измерителя необходимо использовать интервалы измерения, на которых помещается целое число периодов сигналов ТРЦ с частотами модуляции 8 Гц и 12 Гц одновременно. Такими интервалами измерений для сигналов ТРЦ являются 0,25 с; 0,5 с; 0,75 с; 1 с; 1,25 с; 1,5 с; 1,75 с; 2 с; 2,25 с; 2,5 с; 2,75 с; 3 с и т. д. Чем меньше значение интервала измерения, тем большей величины может достигать погрешность (см. рис. 7) при отклонении от номинальных значений и расчетных параметров (частота модуляции сигналов ТРЦ, величина постоянной времени для аналоговых приборов, частота дискретизации и разрядность АЦП для цифровых средств измерений). Точное значение погрешности при этом может быть получено с помощью моделирования.

На основе предложенной модели можно также сформулировать требования к допустимому отклонению интервала измерения от периода модуляции для обеспечения требуемой точности измерений (рис. 9).

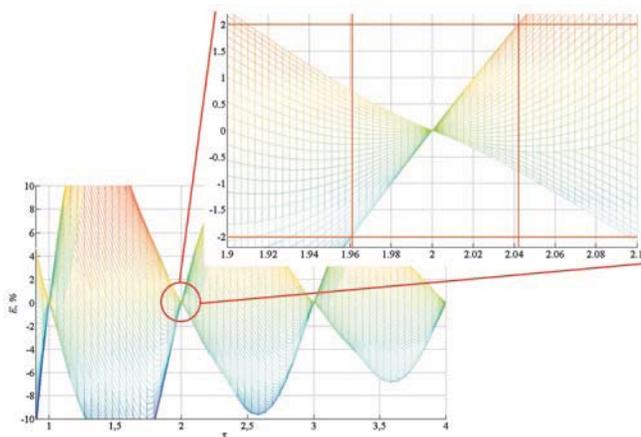


Рисунок 9 — Отклонение интервала измерения
 Например, для обеспечения погрешности не более 2% время измерения для ТРЦ может отклоняться от 0,25 с (2 периода частоты 8 Гц) на 0,005 с, от 0,5 с (4 периода частоты 8 Гц) на 0,01 с. Отклонение временных параметров не должно превышать 2%.

Таким образом, можно существенно повысить быстродействие средств измерений сигналов ТРЦ с 1,66 до 0,25 с (более 6 раз) для величины погрешности 2% при условии, что отклонение интервала измерения не превысит 2%. Такие требования

могут быть легко реализованы в цифровых средствах измерений.

Корректировка интервала измерения существующих цифровых приборов позволит обеспечить сходимость и воспроизводимость результатов измерений сигналов ТРЦ при существенном повышении быстродействия.

В измерителях на основе TRUE-RMS-преобразователей интервал измерения задается с помощью усредняющего конденсатора. Сигнал ТРЦ является низкочастотным, поэтому требуется конденсатор большой емкости, но такие конденсаторы обладают низкой точностью (10 — 20%). Из-за этого в приборах на TRUE-RMS-преобразователях невозможно обеспечить отклонение интервала измерения менее 2% и, как следствие, невозможно обеспечить высокую точность при высоком быстродействии измерителя.

Кроме того, интервал измерения прибора на основе TRUE-RMS-преобразователя с усредняющим конденсатором большой емкости может измениться, например, из-за снижения емкости конденсатора. Поэтому обеспечить высокое быстродействие аналоговых приборов для данного типа сигналов с использованием предложенного метода практически нецелесообразно. Реально обеспечить точность можно только выбором увеличенного интервала измерений, который скомпенсирует низкую точность конденсатора (например, для обеспечения точности измерений 2% требуется интервал измерений сигналов ТРЦ около 2 с).

Литература

1. Сергеев А.Г. Метрология : учебник. М. : Логос, 2005. 272 с.
2. Мартынюк П.П. Измерения в рельсовых цепях тональной частоты // Автоматика, связь, информатика. 2004. № 12. С. 16.
3. Молодцов А.Н. Измерения напряжения и силы тока цифровым мультиметром В7-63 // Автоматика, связь, информатика. 2003. № 9. С. 39 — 41.
4. Федорчук А.Е. Функциональное развитие системы АДК-СЦБ // Автоматика, связь, информатика. 2005. № 12. С. 42 — 45.
5. Сепетый А.А., Кольцов В.В., Прищеп В.С. и др. Измерительно-вычислительные средства в системе автоматизации диагностирования и контроля устройств СЦБ : учебник для вузов. Ростов-на-Дону : Рост. гос. ун-т путей сообщения, 2009. 416 с.
6. Попов В.С., Желбаков И.Н. Измерение среднеквадратического значения напряжения. М. : Энергоатомиздат, 1987. 120 с.
7. Бушуев С.В., Попов А.Н. Исследование точности измерений среднеквадратических значений электрических сигналов на ограниченных интервалах времени // Транспорт Урала. 2011. № 2 (29). С. 46 — 50.
8. Бушуев С.В., Попов А.Н. Проблемы точности измерений среднеквадратических значений сигналов в устройствах автоматике и телемеханики // Транспорт XXI века: исследования, инновации, инфраструктура : матер. науч.-техн. конф., посв. 55-летию УрГУПС : в 2 т. / УрГУПС. Т. 1. Екатеринбург, 2011. С. 745 — 752.

References

1. Sergeev A.G. Metrologija: uchebnik. [Metrology: coursebook] M.: Logos, 2005. 272 s. ISBN 5-94010-374-X.
2. Martynchuk P.P., Izmerenija v relsovykh tsepjakh tonalnoj chastoty [Measurements in audio frequency track circuits] // Avtomatika, svjaz, informatika. 2004. №12. S.16. ISSN 0005-2329.
3. Fedorchuk, A.E. Funktsionalnoe razvitie sistemy ADK-StSb [Functional development of ADK-signaling arrangement system] // Avtomatika, svjaz, informatika. 2005. №12. S. 42 – 45. ISSN 0005-2329.
4. Sepetyj A. A., Koltsov V. V., Priwepa V. S. i dr. Izmeritelno-vychislitelnye sredstva v sisteme avtomatizatsii diagnostirovanija i kontrolja ustrojstv StSb: ucheb. dlja vuzov. [Instrumentation and computer tools in the system of diagnostics automation and control of signaling arrangement: coursebook for Universities] Rostov-na-Donu: Rost. gos. un-t putej soobshhenija. 2009. 416 s. ISBN 978-5-88814-214-1.
5. Molodtsov A.N., Izmerenija naprjazhenija i sily toka tsifrovym multimetrom V7-63 [Voltage and current intensity measurement by digital multimeter V7-63] // Avtomatika, svjaz, informatika. 2003. №9. S.39 – 41. ISSN 0005-2329.
6. Popov V.S., Zhelbakov I.N. Izmerenie srednekvadrateskogo znachenija naprjazhenija. [Measurement of root-mean-square voltage] M.: Energoatomizdat, 1987. 120 s.
7. Bushuev S.V., Popov A.N. Issledovanie tjchnosti izmerenij srednekvadrateskikh znachenij elektricheskikh signalov na ogranichenykh intervalah vremeni [Investigation of electrical signals RMS values measurements accuracy in limited time intervals] // Transport Urala. 2011. # 2 (29). s. 46 — 50.
8. Bushuev S.V., Popov A.N. Problemy tochnosti izmerenij srednekvadrateskikh znachenij signalov v ustrojstvah avtomatiki i telemehaniki [Problems of signals RMS values measurements accuracy in automation and remote control] // Transport XXI veka: issledovanija, innovacii, infrastruktura : mater. nauch.-tehn. konf., posv. 55-letiju UrGUPS : v 2 t. / UrGUPS. T. 1. Ekaterinburg, 2011. S. 745 — 752.