

ОБНАРУЖЕНИЕ МЕСТ С УСТОЙЧИВЫМИ ДЕФЕКТАМИ НА КОНТАКТНОЙ СЕТИ С ПОМОЩЬЮ РЕГИСТРАЦИИ ДУГОВЫХ НАРУШЕНИЙ ТОКОСЪЕМА ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМОЙ

Наведено принципи побудови, структуру оптоелектронної системи для реєстрації дугових порушень струмознімання; описано методологічні основи використання системи для автоматизації визначення стійких дефектів контактної мережі.

Ключові слова: струмознімання, реєстрація порушень струмознімання, автоматизація визначення дефектів контактної мережі

Приведены принципы построения, структура оптоэлектронной системы для регистрации дуговых нарушений токосъема; описаны методологические основы использования системы для автоматизации обнаружения устойчивых дефектов на контактной сети.

Ключевые слова: токосъем, регистрация нарушений токосъема, автоматизация обнаружения дефектов контактной сети

The construction principles, structure of optic-electronic system for registration of arcing sliding contact breaks are presented; the methodological bases of using the system for automated detection of steady defects on an electric-traction network are described.

Keywords: current collection, registration of current collection violations, automated detection of defects in electric-traction network

Введение

«Стратегией развития железнодорожного транспорта в РФ до 2030 года» предусматривается создание и развитие комплексной системы содержания инфраструктуры железных дорог. В состав комплексной системы содержания должна также входить автоматизированная система диагностики контактной сети с целью определения ее текущего состояния и раннего обнаружения дефектов, в том числе путем объездов участков вагоном-лабораторией (ВИКС). В процессе эксплуатации контактная сеть приобретает ряд опасных дефектов, которые сопровождаются дуговыми нарушениями токосъема при каждом проходе токоприемника. Такие дефекты являются опасными, быстро развиваются и приводят к усиленному износу контактных проводов, их разупрочнению и обрывам. В настоящее время регистрация таких опасных мест из ВИКС не проводится из-за отсутствия необходимой аппаратуры и методологии ее использования для достоверного обнаружения дефектов.

В Ростовском государственном университете путей сообщения проведено исследование метода регистрации оптических излучений от дуговых нарушений скользящего контакта, которое позволило разработать современную ав-

томатизированную оптоэлектронную систему регистрации дуговых нарушений токосъема.

Цель работы

Задача состоит в разработке принципов построения автоматизированной системы для регистрации дуговых нарушений токосъема, а также методологических и алгоритмических основ ее использования для автоматизации процесса обнаружения устойчивых дефектов контактной сети по дуговым нарушениям токосъема.

Состав и принцип работы оптоэлектронной системы

Автоматизированная система предназначена для бесконтактной регистрации дуговых и искровых нарушений токосъема на участках контактной сети постоянного и переменного тока из ВИКС при плановых объездах участков и работает на принципе приема оптического излучения от дуговых или искровых нарушений токосъема в спектре германиевых фотоприемников. Система ведет непрерывный дистанционный контроль дуговых и искровых нарушений токосъема на токоприемнике локомотива, с которым следует ВИКС.

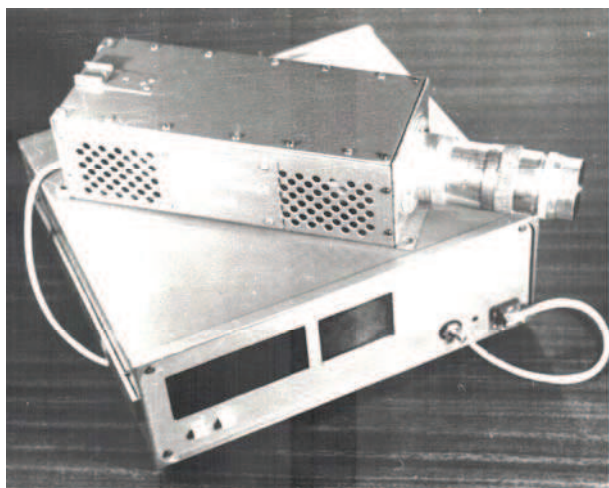


Рис. 1. Внешний вид оптоэлектронной системы

Конструктивно система состоит из двух блоков: приемного оптического блока и блока регистрации и обработки информации. Внешний вид системы показан на рис. 1. Приемный оптический блок стационарно устанавливается внутри наблюдательной вышки ВИКС и оптической системой ориентируется на задний рабочий токоприемник электровоза, расположенный на расстоянии 15 м от заднего токоприемника локомотива. Поле обзора оптической системы во фронтальной плоскости, проходящей через лыжу токоприемника локомотива, имеет размер 1300 мм по высоте и 3000 мм по ширине. Размеры поля обзора оптической системы выбраны из условий возможных перемещений точки скользящего контакта по вертикали и возможного ее смещения по горизонтали на кривых участках пути. В качестве объектива использован стандартный телеобъектив «Юпитер-11» с фокусным расстоянием 110 мм.

Блок регистрации и обработки информации располагается на рабочем столе наблюдательной вышки и соединяется с оптическим блоком специальным кабелем посредством разъемов. Блок регистрации и обработки информации имеет специальный разъем для передачи информации о нарушениях токосъема и их параметров в бортовую компьютерную сеть ВИКС.

На рис. 2 показана структурная схема приемного оптического блока.

Приемный оптический блок содержит оптическую систему ОС и устройство предварительной обработки УПО. Оптическая система состоит из объектива, волоконно-оптического разделителя светового потока, волоконно-оптических фоконов, фотоприемников Ф и отдельного фотоприемного элемента ФРУ. Необ-

ходимость применения такой конструкции ОС [1] продиктована необходимостью решения следующих технических вопросов. Во-первых, необходимо уменьшить постоянную составляющую светового потока, попадающего на светочувствительный слой фотоприемника, что позволит работать фотоприемникам во всем динамическом диапазоне принимаемых уровней световых потоков. Для этой цели служит волоконно-оптический разделитель светового потока. Во-вторых, требуется согласовать часть размера изображения всего поля обзора, передаваемого отдельным каналом разделителя светового потока, с размерами светочувствительного элемента фотоприемника. Это достигается путем использования волоконно-оптических фоконов. Такое техническое решение позволило обеспечить увеличение отношения «полезный сигнал – фон» из-за уменьшения площади поля обзора, попадающего на каждый отдельный фотоприемник. Фотоприемники преобразуют световые потоки в сигналы напряжения на своих выходах.

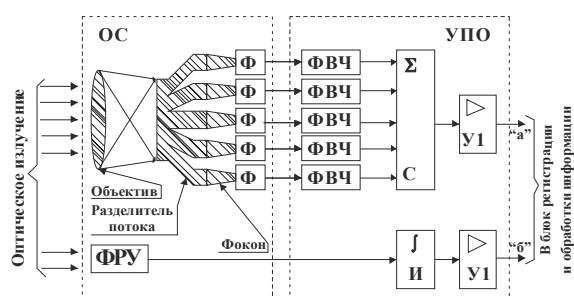


Рис. 2. Структурная схема приемного оптического блока

Вся аналоговая электронная часть приемного оптического блока сосредоточена в узле предварительной обработки УПО. Полученный сигнал от каждого фотоприемника фильтруется оптимальными фильтрами верхних частот ФВЧ [2]. ФВЧ на своих выходах подавляют медленно изменяющуюся составляющую светового потока от фона поля обзора и пропускают на выход короткие вспышки светового потока от дуговых или искровых нарушений токосъема. Сигналы с выходов ФВЧ одновременно суммируются сумматором С и усиливаются линейным усилителем У1. Сигнал с выхода У1 поступает на блок регистрации и обработки информации (выход «а», рис. 2).

При движении ВИКС в дневное время поле обзора изменяет в широких пределах свою яркость. Поэтому возникают ситуации, когда в оптическую систему могут попасть прямые

солнечные лучи или фон значительной яркости (в вечерние или утренние часы). Это может привести к росту числа ложных срабатываний за счет мельканий различных узлов и объектов, пересекающих поле обзора. Поэтому требуется увеличение порога срабатывания в соответствии со средней яркостью фона поля обзора, таким образом, чтобы при предельных засветках поля обзора дополнительно производился запрет регистрации. Для этих целей оптическая система снабжена дополнительным фотоприемником ФРУ, сигнал с которого интегрируется интегратором И, выделяющим средний уровень фона, и усиливается усилителем постоянного тока У2. Сигнал с выхода У2 используется для регулировки порога в блоке регистрации и обработки информации, схема которого показана на рис. 3.

Принцип работы блока регистрации и обработки информации БРОИ следующий [3]. При дуговых нарушениях этот сигнал «а» представляет собой импульсный процесс, где первым появляется выброс положительной полярности, а за ним следует отклик фильтра ФВЧ отрицательной полярности. При резких затемнениях фона поля обзора первым появляется выброс отрицательной полярности, а после него следует положительный отклик фильтра ФВЧ. Сигнал «а» от приемного оптического блока поступает одновременно на два пороговых устройства ПУ1 и ПУ2. Пороги устройств ПУ1 и ПУ2 определяются оптимальными значениями [4]. На ПУ1 и ПУ2 поступает управляющий сигнал «б», пропорциональный усредненной по времени фоновой засветке поля обзора оптической системы со временем усреднения 10 с. Этот сигнал служит для создания управляемых порогов срабатывания ПУ1 и ПУ2 в зависимости от уровня фоновой засветки поля обзора. Поэтому оптимальный порог срабатывания регулируем, пропорциональный среднему уровню фоновой засветки.

При приходе сигнала от дугового нарушения первым срабатывает ПУ1 и заставляет работать блок регистрации сигнала БР. При этом БР сигналом своего выхода заблокирует срабатывание блока запрета БЗ. При приходе кратковременной помехи большой амплитуды от резкого перекрытия фона поля обзора первым срабатывает ПУ2 и включит БЗ, который сигналом своего выхода заблокирует БР и запретит регистрацию. Схемотехнически БР и БЗ представляют собой одновибраторы, находящиеся в

ждущем режиме при отсутствии сигналов. Время удержания БР либо БЗ в состоянии срабатывания поддерживается в дальнейшем как положительными, так и отрицательными входными импульсами, прошедшими ПУ1 и ПУ2. Поддержание одновибраторов в состоянии срабатывания обеспечивается элементами ИЛИ, И1, И2. После окончания действия чередующихся импульсов одновибраторы приходят в исходное ждущее состояние с определенной задержкой времени, длительность которой определяется временем успокоения входного сигнала, прошедшего ФВЧ.

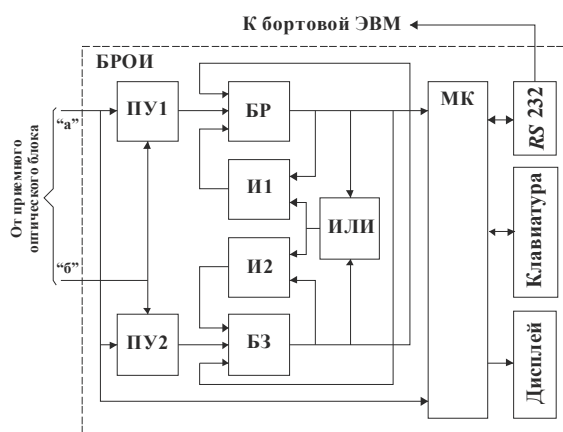


Рис. 3. Структурная схема блока регистрации и обработки информации

При условии срабатывания БР на микроконтроллер МК поступает разрешающий сигнал, в течение которого МК производит преобразование входного сигнала «а» в цифровую форму, а также осуществляет программную обработку входного сигнала. Программная обработка производит определение параметров входного сигнала. Фиксируются факт дугового нарушения, его длительность, отметка текущего времени появления факта, суммарная длительность дуговых нарушений. Производится селекция длительностей и амплитуд оптических сигналов, подсчитывается количество дуговых нарушений, рассчитывается энергия регистрируемых сигналов и др. МК ведет протокол событий с возможностью вывода нужной информации на дисплей. Вызов необходимой информации осуществляется со встроенной в БРОИ специальной клавиатуры. МК имеет возможность подключения к персональному компьютеру бортовой сети ВИКС через порт RS232.

Описываемая система обладает вероятностью регистрации дуговых нарушений 0,74 на участках постоянного тока и 0,875 – на участках переменного тока.

Методические основы обнаружения устойчивых дефектов

Обнаружение должно базироваться на двух методических направлениях: первое – на анализе результатов нескольких объездов участка с помощью ВИКС на совпадение мест с дугообразованием или искрением по координате пути и второе – на анализе зарегистрированных длительностей дуговых нарушений. Причем должны подвергаться анализу результаты не менее двух, совершенных подряд, объездов, т.к. необходимо исключить из рассмотрения места со случайно возникшими дуговыми нарушениями, вероятность совпадения которых по координате пути ничтожна.

Рассмотрим первое методическое направление. Известна методика регистрации дефектных мест по результатам регистрации отрывов токоприемника [5], основанная на выявлении мест с совпавшими координатами отрывов по результатам двух объездов участка контактной сети и направленная на поиск устойчивых дефектов. Однако такая методика не учитывает реальные возможности регистрирующей аппаратуры с точки зрения вероятностей регистрации дуговых нарушений токосяема (отрывов) и вероятности пропуска полезных сигналов этой аппаратурой. В нашем случае, как было показано выше, все системы регистрации, основанные на любом принципе, имеют вероятности регистрации ниже единицы. Поэтому возможные пропуски полезного сигнала необходимо компенсировать увеличением числа сравниваемых результатов, полученных при каждом последовательном во времени объезде участка. Поскольку возникновение искрения или дуги в месте дефекта, а также его регистрация происходит с некоторой вероятностью, то о наличии дефекта можно судить тоже с определенной вероятностью. В дальнейшем такая вероятность названа вероятностью обнаружения дефекта.

Наличие дефекта будем считать установленным, если в процессе анализа результатов нескольких объездов участка искрение или дуговое нарушение зафиксировано системой в одном и том же месте участка два и более раз. Определим достаточного количества сравниваемых результатов (количества опытных объездов) в зависимости от вероятности обнаружения дефектов следующим образом.

Пусть событие A заключается в появлении дугового нарушения в точке дефекта. Событие A возникает с вероятностью $P(A)$. Регистрация факта дугового нарушения есть событие B , ко-

торое происходит с вероятностью $P(B/A)$, найденной при условии, что событие A произошло. Вероятность $P(B/A)$ в нашем случае есть условная вероятность регистрации дуговых нарушений системой. При этом полная вероятность того, что на выходе системы появится результат регистрации (событие C) равна:

$$P(C) = P(A) \cdot P(B/A). \quad (1)$$

Если проводится n независимых испытаний (объездов), а наличие дефекта определяется по совпадению в одном и том же месте участка дуговых или искровых нарушений два и более раз, то вероятность обнаружения дефекта определится биномиальным законом Бернулли. Вероятность обнаружения дефекта, т.е. вероятность того, что при n независимых испытаниях событие C , происходящее с вероятностью $P(C)$ появится k и более раз равна:

$$P_0 = \sum_{k=2}^n C_n^k \cdot P^k(C) [1 - P(C)]^{n-k}, \quad (2)$$

где C_n^k – число сочетаний из n элементов по k .

С учетом (1) выражение (2) приводится к виду:

$$P_0 = \sum_{k=2}^n C_n^k \cdot P^k(A) \cdot P^k(B/A) \cdot [1 - P(A) \cdot P(B/A)]^{n-k}. \quad (3)$$

В табл. 1 приведены рассчитанные по формуле (3) при $n \geq 2$ значения вероятностей обнаружения устойчивых дефектов контактной сети различными системами контроля. В расчетах принято, что вероятность появления дуговых отрывов в месте дефекта $P(A) = 1$, т.е. дугообразование сопровождается дефектом при каждом объезде участка, что характерно для устойчивых дефектов. Расчет проводился для двух значений вероятностей регистрации $P(B/A)$, соответствующих вероятностям регистрации дуговых нарушений оптоэлектронной аппаратурой на участках переменного и постоянного тока.

Анализ табл. 1 показывает, что устойчивый дефект с вероятностью более 0,95 может быть обнаружен системой путем анализа результатов текущего объезда с результатами двух предыдущих объездов на участках переменного тока, а на участках постоянного тока – с результатами трех предыдущих. Учитывая то, что объезды участков ВИКС совершает два раза в квартал, то такой подход к обнаружению дефектов в отдельных случаях может оказаться неэффективным.

Таблица 1

**Вероятность обнаружения дефектов
от числа сравниваемых результатов**

Род тока	n	k	$P(A)$	$P(B/A)$	P_0
Переменный	2	2	1	0,875	0,766
	3	2; 3			0,957
	4	2; 3; 4			0,993
Постоянный	2	2	1	0,74	0,547
	3	2; 3			0,832
	4	2; 3; 4			0,943

Второе методическое направление обнаружения дефектов контактной сети по длительностям дуговых нарушений по результатам текущего объезда. С целью установления вероятностной связи между длительностями дуговых нарушений и наличием в соответствующем месте устойчивого дефекта были проведены исследования на действующем участке СКЖД. При однократном объезде ВИКС участка фиксировались места с дуговыми нарушениями и их длительности с помощью описанной системы. Определялась вероятность попадания длительностей дуговых нарушений в интервалы времени по 10 мс каждый:

$$p_i^* = \frac{n_i^*}{N}, \quad (4)$$

где n_i^* – число дуговых нарушений в i -м интервале длительностей; N – общее число зафиксированных дуговых нарушений ($N = 162$).

Зафиксированные места подвергались визуальному осмотру с целью определения наличия устойчивого дефекта. Вероятность наличия устойчивого дефекта в i -м интервале длительностей дуговых нарушений определялась как

$$p_{ид}^* = \frac{n_{ид}^*}{N_d}, \quad (5)$$

где $n_{ид}^*$ – число устойчивых дефектов в i -м интервале; N_d – общее число выявленных дефектов ($N_d = 32$).

Результаты расчетов по (4) и (5) представлены в виде гистограмм на рис. 4 и 5.

Анализ показывает, что основная часть длительностей дуговых нарушений токосяема (рис. 4) лежит в области до 20 мс, в то время как основная часть выявленных на участке де-

фектов (рис. 5) приходится на длительности более 20 мс.

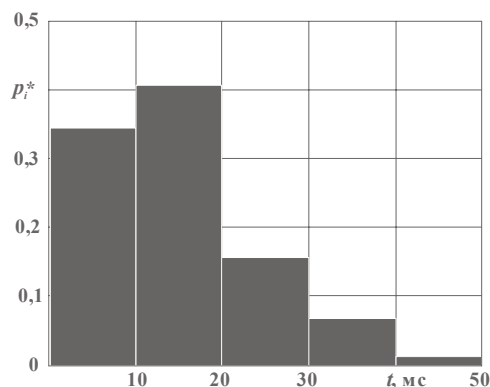


Рис. 4. Распределение числа дуговых нарушений по интервалам длительностей

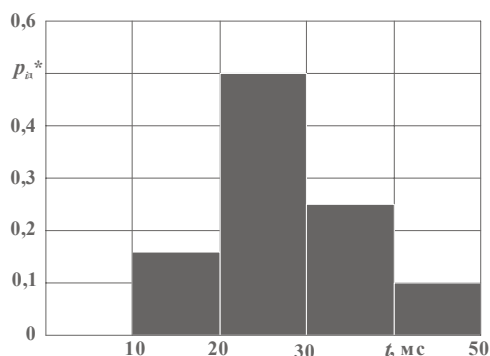


Рис. 5. Распределение числа обнаруженных устойчивых дефектов по интервалам длительностей

Рассмотрение отношения количества найденных дефектов $n_{ид}^*$ к числу дуговых нарушений n_i^* в каждом интервале длительностей дает следующий ряд, представленный в табл. 2.

Таблица 2

**Отношение числа обнаруженных дефектов
к числу дуговых нарушений в интервалах
длительности**

Диапазон длительности, мс	0÷10	10÷20	10÷30	0÷40	0÷50
$n_{ид}^* / n_i^*$	0	0,075	0,615	0,727	1

Ряд показывает, что существует вероятностная связь между длительностью дугового нарушения и вероятностью наличия устойчивого дефекта в месте дугового нарушения. Причем эта корреляционная связь растет с увеличением длительности дугового нарушения. Величина отношения $n_{ид}^* / n_i^*$ определяет условную вероятность наличия дефекта в каждом отдельном

i -м интервале длительности, при условии, что в нем зарегистрировано n_i^* дуговых нарушений.

Оценка вероятности наличия устойчивого дефекта в отрезках времени длительностью от интервала с номером k до номера $k+j$ при условии, что дуговые нарушения зарегистрированы системой регистрации, определится как:

$$P_d^*(k, k+j) = \sum_{i=k}^{k+j} p_{id}^*, \quad (6)$$

где $k = 1, 2, \dots, s; j = 0, 1, 2, \dots, (s-k); s$ – номер последнего интервала.

Так, например, расчеты по (6) показывают, что в отрезке времени от 20 до 50 мс ($k = 3; j = s - k = 2$) вероятность наличия устойчивого дефекта $P_d^*(3, 5) = 0,843$. Таким образом, регистрация длительностей дуговых нарушений свыше 20 мс позволит обнаружить порядка 84 % от всех обнаруженных устойчивых дефектов N_d , при условии проверки всех мест с зарегистрированными дуговыми нарушениями длительностями свыше 20 мс. Следовательно, длительности отдельных дуговых нарушений связаны вероятностно с устойчивостью и степенью опасности дефекта и определяют в некоторой степени его образ.

Учет обоих направлений приводит к следующей обобщенной методике обнаружения опасных дефектов контактной сети, учитывающей оба методических направления. Рассмотрим совмещенную методику.

Пусть событие C заключается в предположении об обнаружении устойчивого дефекта по результатам сравнения опытных объездов. Пусть событие D заключается в предположении об обнаружении устойчивого дефекта по принадлежности длительности дугового нарушения t_i к определенному i -му интервалу длительностей.

Здесь можно рассматривать два варианта принятия решений. Первый из них – это принятие решения о наличии дефекта по совмещению двух независимых событий, т.е. получения события $E = C \wedge D$, соответствующего принятию решения о наличии устойчивого дефекта. Данный подход ужесточает требования к обнаружению устойчивого дефекта. Это условие будет выполняться редко, так как требует одновременного совпадения места искрения по результатам объездов участков и большой длительности искрений при последнем из них. Такой подход позволяет выделить из всего поля дефектов только самые устойчивые и опасные,

что недостаточно. Кроме того, если дефект появился в период перед текущим объездом, то совмещение событий C и D вообще невозможно, а решение о наличии дефекта не будет принято.

Второй вариант принятия решения заключается в том, что под решением E понимается следующая логическая связь событий C и D :

$$E = \begin{cases} 1; & \text{при } C_i = 1, (i = 1 \dots k \dots s); \\ 1; & \text{при } D_i = 1, (i = k \dots s), C_i \vee \overline{C}_i; \\ 0; & \text{при } \overline{C}_i \wedge \overline{D}_i, \end{cases} \quad (7)$$

где i – номер интервала длительностей дуговых нарушений ($i = 1, 2 \dots k \dots s$); k – пороговое значение номера интервала, с которого начинается принятие решения по событию D_i .

Выражение (7) определяет совмещенную методику обнаружения устойчивых дефектов контактной сети по дуговым нарушениям токосъема. Решение об устойчивом дефекте $E = 1$ принимается в двух случаях:

1) при совпадении места дугового нарушения по результатам нескольких объездов участка (событие C_i) при попадании длительности дугового нарушения в любой интервал ($i = 1 \dots k \dots s$);

2) при попадании длительности дугового нарушения (событие D_i) в интервалы от k -го до s -го ($i = k \dots s$), в которых вероятность наличия дефекта в месте нарушения значительна, и вне зависимости от появления или отсутствия события C_i .

Решение об устойчивом дефекте отвергается ($E = 0$), если одновременно отсутствуют события C_i и D_i .

При реализации данного алгоритма уменьшается вероятность пропуска дефекта при его появлении в период перед последним объездом. Кроме того, при малых длительностях дуговых нарушений, когда наблюдается проход токоприемником дефекта на пониженных скоростях, решение о дефекте может быть принято по совпадению. Поэтому последний алгоритм является предпочтительнее первого.

Выводы

1. Применение разработанной аппаратуры позволяет производить регистрацию мест с дуговыми нарушениями токосъема с достаточной вероятностью.

2. Предлагаемые методические основы анализа результатов регистрации позволяют принимать решение о наличии опасных дефектов

на контактной сети сразу при текущем объезде участка.

3. Длительность дугового нарушения определяет степень его опасности и позволяет установить порядок устранения дефекта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А.с. 815501 СССР, МКИ³ В60 L 5/00 (СССР). Устройство для регистрации искрения токоприемника [Текст] / Ю. Г. Семенов, Е. П. Фигурнов. – № 2771563/18; Оpubл. 23.03.81, Бюл. № 11.
2. Семенов, Ю. Г. Основы оптимальной фильтрации сигналов от дуговых нарушений токосъема автоматизированными системами контроля [Текст] / Ю. Г. Семенов // Вестник РГУПС. – Ростов-н/Д, 2009. – № 2. – С. 113-119.
3. А.с. 1050927 СССР, МКИ³ В60 L 5/00 (СССР). Устройство для регистрации искрения токоприемника [Текст] / Ю. Г. Семенов, Е. П. Фигурнов. – № 3448343/24; Оpubл. 30.10.83, Бюл. № 40.
4. Семенов, Ю. Г. Оптимальные уровни принятия решений системами контроля дуговых нарушений токосъема [Текст] / Ю. Г. Семенов // Вестник РГУПС. – Ростов-н/Д, 2009. – № 3. – С. 107-112.
5. Мирошниченко, Р. И. Автоматизированная система контроля и оценки тяговой сети (АСКОТ) [Текст] / Р. И. Мирошниченко, Ю. Е. Купцов, Т. Ф. Шинкарева // Труды ВНИИЖТ. – Вып. 635. – М.: Транспорт, 1980. – С. 42-60.

Поступила в редколлегию 05.10.2010.

Принята к печати 14.10.2010.