

# Метрологическое обеспечение распределенной измерительной системы

Н. В. Орлова<sup>1</sup>, В. А. Саранцева<sup>2</sup>, Г. Никифоров<sup>3</sup>

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

<sup>1</sup>nvorlova115@gmail.com, <sup>2</sup>veronika\_sarance@mail.ru, <sup>3</sup>kefir-go@mail.ru

**Аннотация.** В данной статье рассматриваются вопросы определения метрологических характеристик измерительной системы распределенного объекта на основе анализа отклонений измеряемых физических величин.

**Ключевые слова:** метрологическое обеспечение, распределенный объект, измерительная система, результат измерения, неопределенность измерений.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время сложно представить нашу страну без средств передвижения, таких как, автомобиль, катер, вертолет, локомотив и т.д. Все они играют важную роль в развитии международных экономических отношений, в нормальном функционировании предприятий сельского хозяйства, промышленности, снабжения и торговли.

Непрерывная эксплуатация транспортных средства влечет за собой уменьшение срока эксплуатации не только средств передвижения, но и распределенных транспортных объектов. Оптимальным решением для увеличения срока службы, оперативного контроля, своевременного обнаружения метрологических отказов и идентификации недостоверной информации является использование распределенных измерительных систем.

Мобильные измерительные системы (МИС), размещаемые на борту средств передвижения, обладают рядом преимуществ. В первую очередь это возможность применения дорогостоящих и высокоточных средств измерений (СИ) для контроля важных параметров во многих точках распределенного в пространстве объекта. Они нашли применение в экологических измерениях для контроля природных и техногенных экосистем, технологических для контроля состояния коммуникаций в транспортных системах разного типа, системах безопасности и др.

МИС являются основным элементом системы контроля, который определяет структуру распределенной измерительной системы (РИС) и ее информационного обеспечения.

В данной статье предлагается рассмотреть вопросы реализации РИС, ее программного и метрологического обеспечения на примере системы контроля железнодорожного пути.

## II. СТРУКТУРА РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Структура РИС определяется структурой контролируемого объекта. В рамках поставленной задачи – рассмотрения системы контроля железнодорожного пути, РИС включает:

- центральную измерительную систему (ЦИС), представляющую собой сервер диспетчера, и обеспечивающую координацию работы РИС, сбор всех видов информации, формирование и анализ данных, а также выработку рекомендаций;
- множество стационарных измерительных систем (СИС), осуществляющих постоянный контроль состояния железнодорожного пути и прилегающих территорий для предупреждения аварийных ситуаций на железных дорогах (ЖД);
- мобильные измерительные системы (МИС), расположенные на борту локомотивов и производящие измерения информативных параметров объекта (физических величин) в заданных точках, находящихся на заданном маршруте, в заданное время.

Результаты измерений МИС в режиме реального времени имеют возможность передаваться (например, по радиоканалу) для анализа и обработки в стационарные измерительные системы (СИС) и центральную измерительную систему (ЦИС) [1].

Структурная схема РИС представлена на рис. 1.

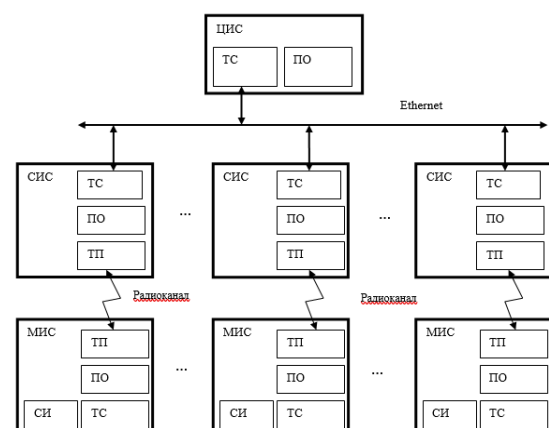


Рис. 1. Структура РИС контроля состояния транспортной железнодорожной системы

На рис. 1: ЦИС – центральная измерительная система, СИС – стационарная измерительная система, МИС – мобильная (бортовая) измерительная система, ПО – программное обеспечение, ТС – технические средства, ТП – телекоммуникационная подсистема, СИ – средства измерений.

Предполагается, что в системе работают  $m=p$  МИС, каждая из которых размещена на локомотиве. МИС производят контрольные измерения величины дефектов (заданной физической величины)  $h(m, l, d, t)$  на каждом линейном участке  $l=1$  (маршрута движения  $L$ ), находящихся в определенных точках дистанции  $d=1$  (линейного участка  $D$ ) в заданное время  $t$ . Место нахождения дефектов и их величина определены опорной моделью линейного участка (если дефект был обнаружен ранее) или регистрируются МИС как результат измерения дистанции от начала линейного участка. Таким образом, в базе данных ЦИС накапливаются результаты контрольных измерений всех МИС во всех точках маршрута движения локомотива, в которых обнаружены дефекты [2 ... 5].

### III. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РИС

В процессе работы системы изменяются не только характеристики контролируемого объекта (величины дефектов железнодорожного пути), но и метрологические характеристики (МХ) каналов МИС. Результаты контрольных измерений содержат значения обеих составляющих этих изменений.

Задачей анализа является, используя статистические методы обработки результатов контрольных измерений и логику организации баз данных (БД) выделить эти составляющие с целью коррекции метрологических характеристик средств измерений МИС, повышая достоверность обнаружения точности измерения величины дефектов.

С целью решения поставленной задачи – разделения изменения МХ СИ и значений величины дефектов введем понятие опорной модели объекта (ОМО).

Опорная модель представляет собой базы данных, содержащую значения контролируемых информативных физических величин, отражающих состояние объекта. На начальном этапе работы системы ОМО содержит известную на этот момент времени информацию – начальные значения значений физических величин (ФВ) –  $H_0 = \{h_0(l, d)\}$ . Эти значения являются опорными (образцовыми) при анализе результатов измерений. Они определяются на основе априорной информации или в результате измерений высокоточными методами и средствами.

Аналізу подвергаются значения отклонения результатов измерения  $h(m, l, d, t)$  относительно опорного значения  $h_0(l, d)$  для разных подмножеств результатов контрольных измерений

$$\theta = h(m, l, d, t) - h_0(l, d) \quad (1)$$

Для создания системы анализа необходимо определить структуру формируемых БД.

В качестве базового выделяется период времени, за который все МИС пройдут свой маршрут и проведут измерения во всех точках, таких как  $T_{Di} = T_i - T_{i-1}$ , где  $T_{i-1}$  – начало  $i$ -ого периода измерений,  $T_i$  – его окончание (начало  $i+1$ -ого периода измерений). Работа системы анализа начинается с первого периода –  $T_{D1} = T_1 - T_0$ , где  $T_0$  – момент времени установления нового значения опорной величины контролируемого параметра, и может осуществляться до текущего –  $T_{DT}$ .

Структура БД пространства точек контрольных измерений показана на рис. 2 [7].

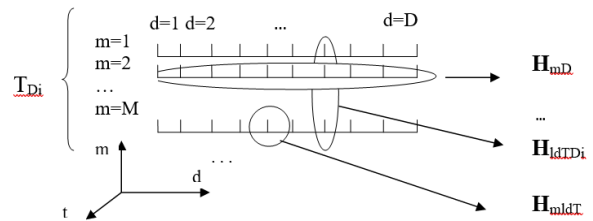


Рис. 2. Структура пространства точек контрольных измерений на  $l$ -ом линейном участке

Для осуществления разделения величин множество результатов всех измерений представляется в виде ряда подмножеств, отражающих специфику измерений:

- подмножества результатов контрольных измерений  $m$ -ой МИС во всех точках  $d$ , на  $l$ -ом участке, за весь период времени от  $T_{D1}$  до  $T_{DT}$  –  $H_m = \{h(m, l, d, t)\}$ , где  $m = \text{const}$ ,  $l = \text{const}$ ,  $d = \text{var}$ ,  $t = \text{var}$ ;
- подмножества результатов измерений  $m$ -ой МИС, во всех точках  $d=1, D$ , на первом участке, за время  $T_{Di} - H_{mD} = \{h(m, l, d, t)\}$ , где  $m = \text{const}$ ,  $l = \text{const}$ ,  $d = \text{var}$ ,  $t = \text{const}$ ;
- подмножества результатов измерений значения дефекта в заданной точке  $d$ , на  $l$ -ом участке, всеми МИС за период времени  $T_{Di} - H_{ldT} = \{h(m, l, d, t)\}$ , где  $m = \text{var}$ ,  $l = \text{const}$ ,  $d = \text{const}$ ,  $t = \text{var}$ ;
- подмножества результатов измерений значения дефекта в заданной точке  $d$ , на  $l$ -ом участке,  $m$ -ой МИС за время анализа от  $T_{D1}$  до  $T_{DT}$  –  $H_{mldT} = \{h(m, l, d, t)\}$ , где  $m = \text{var}$ ,  $l = \text{const}$ ,  $d = \text{const}$ ,  $t = \text{var}$ ;

Таким образом, из полной БД можно выделить множества, обеспечивающие определение тех или иных статистических характеристик распределенного объекта, их изменение или характеристики СИ.

Для наглядности эти подмножества можно представить в виде таблицы (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. МНОЖЕСТВА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ РАСПРЕДЕЛЕННОГО ОБЪЕКТА

Множество	Признаки			
	$m = \text{var}$	$l = \text{var}$	$d = \text{var}$	$t = \text{var}$
$H = \{h(m, l, d, t)\}$	$m = \text{var}$	$l = \text{var}$	$d = \text{var}$	$t = \text{var}$
$H_m = \{h(m, l, d, t)\}$	$m = \text{const}$	$l = \text{const}$	$d = \text{var}$	$t = \text{var}$
$H_{mD} = \{h(m, l, d, t)\}$	$m = \text{const}$	$l = \text{const}$	$d = \text{var}$	$t = \text{const}$
$H_{ldT} = \{h(m, l, d, t)\}$	$m = \text{const}$	$l = \text{const}$	$d = \text{const}$	$t = \text{var}$
$H_{mldT} = \{h(m, l, d, t)\}$	$m = \text{var}$	$l = \text{const}$	$d = \text{const}$	$t = \text{var}$

Указанная организация БД контрольных измерений позволяет вычислить значение отклонения (1) для любой информативной точки распределенного объекта, любой МИС в любой момент времени. Значение отклонения результата измерений от его опорной величины носит случайный характер. Появление систематической составляющей (тренд) говорит об изменении значения контролируемого дефекта (ЗКД) или об изменении МХ МИС.

Определим статистические характеристики отклонений результатов измерений, которые позволяют решить поставленную задачу.

Анализируемые характеристики можно разделить на три алгоритма А1, А2 и А3 [7].

А1  $M_{\theta ml}$ . Математическое ожидание (МО) отклонения результатов измерений  $m$ -ой МИС на подмножестве  $H_{mD}$ :

$$M_{\theta ml} = N_{ml}^{-1} \sum_{\substack{m=const \\ l=const \\ d \in D \\ t=const}} \theta_{mlt}$$

А2  $D_{\theta ml}$ . Разброс (дисперсия) отклонений результатов измерений на заданном участке  $l$  на подмножестве  $H_{mD}$ :

$$D_{\theta ml} = (N_{ml} - 1)^{-1} \sum_{\substack{m=const \\ l=const \\ d \in D \\ t=const}} (\theta_{mlt} - M_{\theta ml})^2$$

А2  $M_{\theta ld}$ . Математическое ожидание (МО) отклонения результатов измерений в заданных точках  $d$  на подмножестве  $H_{ldT}$ :

$$M_{\theta ld} = N_{ld}^{-1} \sum_{\substack{m \in M \\ l=const \\ d=const \\ t \in T_D}} \theta_{mlt}$$

А2  $D_{\theta ld}$ . Разброс (дисперсия) отклонений результатов измерений в заданных точках  $d$  на подмножестве  $H_{ldT}$ :

$$D_{\theta ld} = (N_{ld} - 1)^{-1} \sum_{\substack{m \in M \\ l=const \\ d=const \\ t \in T_D}} (\theta_{mlt} - M_{\theta ld})^2$$

А3  $M_{\theta mld}$ . Математическое ожидание (МО) отклонения результатов измерений в заданной точке  $d$  на подмножестве  $H_{mldT}$ :

$$M_{\theta mld} = N_{mld}^{-1} \sum_{\substack{m=const \\ l=const \\ d=const \\ t \in T_D}} \theta_{mlt}$$

А3  $D_{\theta mld}$ . Разброс (дисперсия) отклонений результатов измерений в заданной точке  $d$  на подмножестве  $H_{mldT}$ :

$$D_{\theta mld} = (N_{mld} - 1)^{-1} \sum_{\substack{m=const \\ l=const \\ d=const \\ t \in T_D}} (\theta_{mlt} - M_{\theta mld})^2$$

Алгоритм идентификации А1: анализ всех отклонений результатов измерений на линейном участке МИС за один проезд (на множестве  $H_{mD}$ ).

Начальные условия:

- определение СКО СИ –  $\sigma_{СИ}$  как требование технического задания к реализации МИС;
- вычисление МО в соответствии с алгоритмом А1  $M_{\theta ml}$  ( $H_{mD}$ );
- вычисление СКО в соответствии с алгоритмом А1  $D_{\theta ml}$ .  $\sigma_{\theta ml} = D_{\theta ml}^{1/2}(H_{mD})$ .

Анализ презентабельности выборки:

Если  $\sigma_{\theta ml} < \sigma_{СИ}$  выборка презентабельная, может быть использована для анализа характеристик результатов измерений; если нет, необходимо увеличить выборку (добавить еще один проезд) или провести дополнительный анализ с выявлением «промахов».

Алгоритм анализа (рис. 3):

- если МО отклонений  $M_{\theta ml}$  больше порога  $k\sigma_{СИ}$  ( $M_{\theta ml} > k\sigma_{СИ}$ ), возможны две причины: смещение всех результатов измерений (изменение МХ СИ); изменение одного или нескольких результатов измерений значений ФВ (увеличение дефекта). Для разделения причины проведем проверку на «промах» – большее отклонение: если значение ФВ  $h_d > M_{\theta ml} + k\sigma_{СИ}$ , значение отклонения ФВ от опорного большое – вероятно это связано с увеличением дефекта (необходимо запомнить для дальнейшего анализа), результат Р1-1; если  $h_d < M_{\theta ml} + k\sigma_{СИ}$  – дефект не изменил своих характеристик, возможно изменение МХ СИ, результат Р1-2;
- если МО отклонений  $M_{\theta ml}$  меньше порога  $k\sigma_{СИ}$  ( $M_{\theta ml} < k\sigma_{СИ}$ ) – существенных отклонений от опорной модели нет.

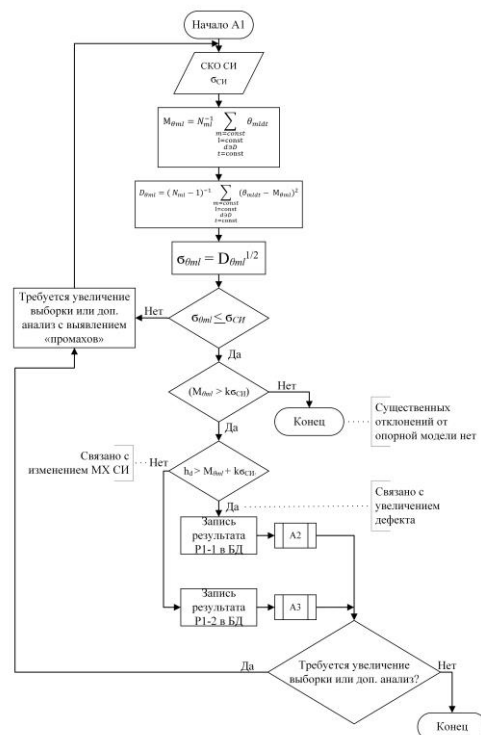


Рис. 3. Блок-схема алгоритма анализа А1

Алгоритм идентификации А2: анализ отклонений результатов измерений заданного дефекта на линейном участке всеми МИС за один проезд (на множестве  $H_{l,d,T_1}$ ) проверка и подтверждение результата Р1-1.

Начальные условия:

- определение значения неопределенности результатов измерений как требование технического задания –  $\sigma_{PI}$ ;
- вычисление МО в соответствии с алгоритмом А2  $M_{\theta_{ld}}(H_{l,d,T_1})$ ;
- вычисление СКО в соответствии с алгоритмом А2  $D_{\theta_{ld}}. \sigma_{\theta_{ld}} = D_{\theta_{ld}}^{1/2}(H_{l,d,T_1})$ .

Анализ презентабельности выборки:

Если  $\sigma_{\theta_{ld}} < \sigma_{PI}$ , то выборка презентабельная, может быть использована для анализа характеристик результатов измерений; если нет, то необходимо увеличивать выборку (добавить еще один проезд) или провести дополнительный анализ с выявлением «промахов».

Блок-схема алгоритма анализа А2 представлена на рис. 4.

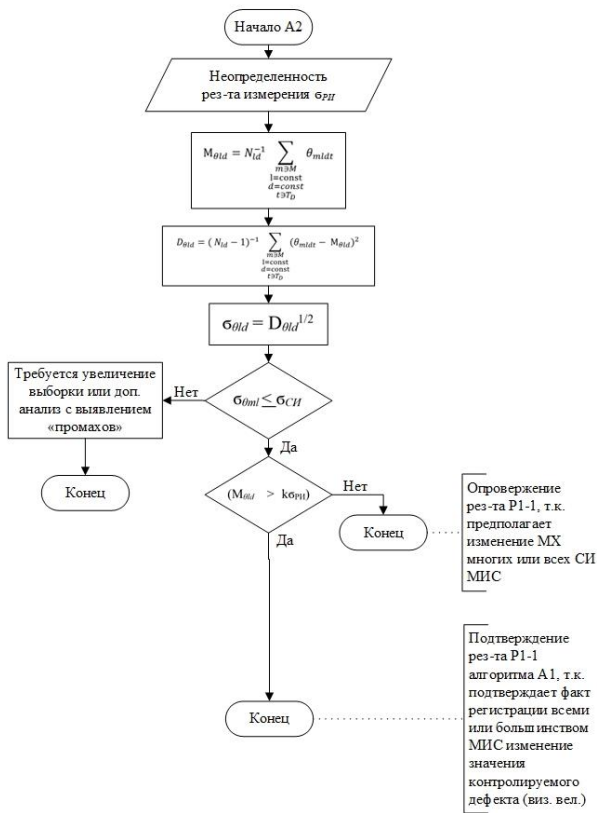


Рис. 4. Блок-схема алгоритма анализа А2

Алгоритм анализа:

- если МО отклонений  $M_{\theta_{ld}}$  больше порога  $k_{\sigma PI}$  ( $M_{\theta_{ld}} > k_{\sigma PI}$ ), возможны две причины: смещение всех результатов измерений (всех МИС в заданной точке) связано с увеличением дефекта (изменением результатов измерений значений ФВ  $h(l,d,t) > h_0(l,d)$ ) или с изменением МХ СИ. Второе утверждение маловероятно, так как предполагает

изменений МХ многих или всех СИ МИС. Первое наиболее вероятно, так как подтверждает факт регистрации всеми или большинством МИС изменения значения контролируемого дефекта (физической величины) – подтверждается результат Р1-1 алгоритма АИ1;

- если МО отклонений  $M_{\theta_{ld}}$  меньше порога  $k_{\sigma PI}$  ( $M_{\theta_{ld}} < k_{\sigma PI}$ ), результаты измерений всеми МИС не подтверждают изменение дефекта. Результат выявления изменений дефекта Р1-1 алгоритма АИ1 не подтверждается.

Алгоритм идентификации А3: анализ отклонений результатов измерений заданного дефекта на линейном участке заданной МИС за все проезды (на множестве  $H_{mld,T}$ ) проверка и подтверждение результата Р1-2.

Начальные условия:

- определение СКО СИ –  $\sigma_{СИ}$  как требование технического задания к реализации МИС;
- вычисление МО в соответствии с алгоритмом А3  $M_{\theta_{mld}}(H_{mld,T})$ ;
- вычисление СКО в соответствии с алгоритмом А3  $D_{\theta_{mld}}. \sigma_{\theta_{mld}} = D_{\theta_{mld}}^{1/2}(H_{mld,T})$ .

Анализ презентабельности выборки:

Если  $\sigma_{\theta_{mld}} < \sigma_{СИ}$ , то выборка презентабельная, может быть использована для анализа характеристик результатов измерений; если нет, то необходимо увеличить выборку (добавить еще один проезд) или провести дополнительный анализ с выявлением «промахов».

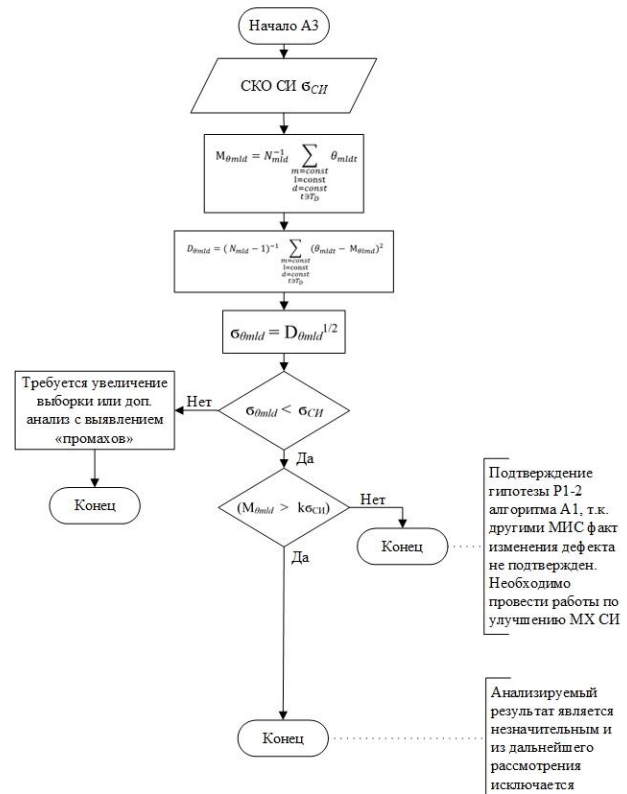


Рис. 5. Блок-схема алгоритма анализа А2

Алгоритм анализа (рис. 5):

- если МО отклонений  $M_{\theta_{\text{mld}}}$  больше порога  $k_{\text{бси}}$  ( $M_{\theta_{\text{mld}}} > k_{\text{бси}}$ ), подтверждается гипотеза об отклонении МХ СИ Р1-2 алгоритма АИ1, так как другими МИС факт изменения дефекта не подтвержден – необходимо провести работы по улучшению МХ СИ;
- если МО отклонений  $M_{\theta_{\text{mld}}}$  меньше порога  $k_{\text{бси}}$  ( $M_{\theta_{\text{mld}}} < k_{\text{бси}}$ ), анализируемый результат является незначительным и из дальнейшего рассмотрения исключается.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, рассмотренная структура базы данных контрольных измерений, применение опорной модели объекта (линейного участка железнодорожного пути), обеспечивающей возможность вычисления приращений результатов измерений в реальном времени, позволили разработать алгоритмы анализа, обеспечивающие разделение источников отклонения и увеличивающие вероятность обнаружения дефектов, а также выявить необходимость метрологической проверки СИ МИС с целью обеспечения требуемой точности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Алексеев В.В., Королев П.Г., Куракина Н.И., Орлова Н.В. Информационно-измерительные и управляющие системы мониторинга состояния распределенных технических и природных объектов // Приборы.-2009.-№10. С.28-42.
- [2] Алексеев В.В., Боронахин А.М., Калякин И.В., Коновалова В.С., Подгорная Л.Н. Измерение характеристик железнодорожного полотна с помощью измерительной системы, построенной на базе микро механических акселерометров. // Приборы, вып. №12 (138), 2011, С. 22–29.
- [3] Концепция построения системы динамического мониторинга рельсового пути. / В.В. Алексеев, П.Г. Королев, Л.Д. Ларионов Д.Ю., М.Н. Шилов. Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» 2014. №10. с. 45-49.
- [4] Оценка состояния железнодорожного пути с применением геоинформационной технологии / В.В. Алексеев, П.Г. Королев, Н.В. Орлова, А.А. Минина и [др.] СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2018. 160 с.
- [5] Алексеев В.В. Бортовая информационно-измерительная система оценки состояния железнодорожного пути. Метрологическое сопровождение / В.В. Алексеев, А.М. Боронахин, П.Г. Королев, Н.В. Орлова // XXII Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям (SCM-2019). Сборник докладов. Санкт-Петербург. 23–25 мая 2019 г. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». С. 21-24. DOI: 10.1109/SCM.2019.8903884
- [6] Алексеев В.В., Орлова Н.В., Седунова Е.Н. Опорная модель линейного участка железнодорожного полотна //XX Межд. конф. по мягким вычислениям и измерениям по мягким вычислениям и измерениям (SCM-2017). Сб. докладов в 3-х томах. СПб. 24-26 мая 2017 г Т.2. С. 256-260.
- [7] Алексеев В.В. Анализ метрологических характеристик средств измерения распределенной мобильной измерительной системы на основе опорной модели объекта /В.В. Алексеев, П.Г. Королев, Н.В. Орлова и [др.] // XXIII Межд. конф. по мягким вычислениям и измерениям (SCM-2020). Сборник докладов. Санкт-Петербург. 27–29 мая 2020 г. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». С.79-82 DOI: 10.1109 / SCM50615.2020.9198766.