

Бортовая информационно-измерительная система оценки состояния железнодорожного пути. Метрологическое сопровождение

В. В. Алексеев¹, А. М. Боронахин², П. Г. Королев³, Н. В. Орлова⁴

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

¹vvalekseev@etu.ru, ²amboronahin@etu.ru, ³pgkorolev@etu.ru, ⁴nvorlova@etu.ru

Аннотация. В докладе рассмотрены вопросы метрологического обеспечения бортовых информационно-измерительных систем (ИИС), размещаемых на вагонах-путеизмерителях и локомотивах. Данные ИИС используются для оценки состояния верхнего строения железнодорожного пути. ИИС включает в себя измерительные каналы, позволяющие оценить величину дефектов железнодорожного пути и осуществить их привязку к координатам. Ввиду того, что каждая из измерительных подсистем вносит свои систематические и случайные составляющие погрешности, в докладе рассматриваются вопросы оценки достоверности полученных результатов.

Ключевые слова: транспортная безопасность; железнодорожный путь; бортовая измерительная система; измерительный канал

I. ВВЕДЕНИЕ

Бортовые ИИС оценки состояния железнодорожного пути (ИИС ОСЖДП) применяются для предотвращения аварийных ситуаций на участке обращения локомотивов. ИИС ОСЖДП позволяют определять величины нескольких видов дефектов и их координаты. Для этого в состав системы включены измерительные каналы, позволяющие определять линейные и географические координаты. Результаты измерений величин дефектов и координат, в общем случае являются случайными величинами, вследствие чего для достоверной оценки состояния пути необходимо использовать многократные измерения. В то же время, с учетом особенностей эксплуатации и динамики состояния пути, формирование репрезентативных выборок нецелесообразно и решения необходимо принимать, используя малые выборки. Ранее были проведены исследования критерия Манна и Уитни на устойчивость к ошибкам первого и второго рода [1]. Также сформулированы правила удаления выбросов из малых выборок, для исключения ошибок второго рода [2]. В настоящем докладе будут рассмотрены правила совместной обработки результатов измерений величины дефектов от микромеханических датчиков и навигационной подсистемы.

II. ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ЗАДАЧА

Бортовая ИИС ОСЖДП производит измерения значений дефектов ЖДП во время каждого проезда. При этом формируются массивы результатов измерений $X_l = \{x_{li}\}$, привязанные к координатам места нахождения дефекта на ЖДП, где l – номер дефекта, имеющий свои координаты, i – номер проезда (результата измерения). Важным для анализа величины дефекта является точность измерения его значения, которая определяется методической и инструментальной составляющими. В качестве измерительного датчика в системе используется микромеханический акселерометр, для которого методическая составляющая определена (сведена к минимуму) на этапе проектирования, а инструментальная определяется аппаратной реализацией. При этом по мере эксплуатации аппаратная реализация измерительного канала (ИК) меняет свои характеристики, изменяется величина систематической и случайной составляющих. Для определения значений этих составляющих используем опорные значения дефектов $x_{l0п}$, которые представлены как множество опорных значений, описывающее исходное состояние ЖДП – $X_{l0п} = \{x_{l0п}\}$. За величину характеризующую инструментальную составляющую ИК примем разницу между результатом измерения и опорным значением величины дефекта $\Delta_{li} = x_{li} - x_{l0п}$. Данная характеристика может оцениваться значением систематической и случайной составляющих. При этом систематическая составляющая может характеризовать либо изменение величины дефекта, либо, если ее значение изменяется для всех дефектов ЖДП, отражать изменение метрологических характеристик (МХ) ИК. В первом случае имеет место изменение характеристики дефекта и это значение должно быть передано в систему анализа состояния ЖДП. Во втором – характеризует изменение МХ ИК и может быть использовано для корректировки результатов измерений с целью повышения точности измерений, а также анализируя изменение величины систематической составляющей во времени можно принимать решения о необходимости калибровки ИК бортовой ИИС. Ниже рассмотрим перечисленные вопросы.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации по государственной поддержке ведущих научных школ Российской Федерации НШ-4165.2018.8

III. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОТКЛОНЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ ОТ ОПОРНОГО ЗНАЧЕНИЯ

Определяющим информационным элементом ИИС ОСЖДП, обеспечивающим достоверность и точность ее работы, является опорная модель линейного участка (ОМЛУ) ЖДП, представляющая собой информационную структуру, описывающую последовательность событий на ЖДП, которые характеризуют состояние линейного участка железнодорожного пути (ЛУ ЖДП) [3].

На рис. 1 представлена информационная структура в виде схемы участка ЖДП между стыками рельс, где St_k, St_{k+1} – стыки, определяющие начало и конец рельса и представляющие собой реперные точки; x_{i_l} – значение обнаруженного дефекта по i -му проезду на дистанции l , $x_{l_{оп}}$ – опорное значение контролируемой величины (дефекта) на дистанции l .

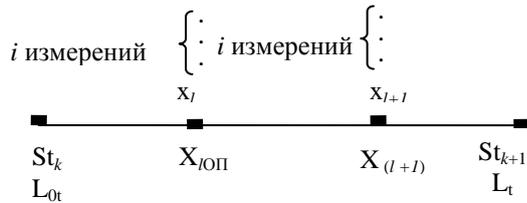


Рис. 1. Пример схемы участка ЖДП

В процессе движения локомотива бортовая ИИС ОСЖДП регистрирует значение дефекта по каждому проезду. Данные контрольных измерений поступают от бортовой ИС в виде множества параметров дефекта $x_{i_l}^* = \{x_{i_l}, l, x_t, y_t\}$, где x_{i_l} – результат измерения величины дефекта рельс, l – дистанция (линейная координата), измеренная одомером, (мм); x_t, y_t – географические координаты (широта и долгота соответственно), вырабатываемые спутниковой навигационной системой, град.

Результат измерения величины дефекта в общем случае является случайной величиной, зависящей от многих факторов – сезонного, скорости движения локомотива или путеизмерительного вагона, соседствующих дефектов и т.п., приводящих к появлению дополнительных погрешностей и выбросам. Следовательно, необходимо делать выводы о динамике развития дефекта и принимать организационно-технические решения, основываясь на результатах обработки статистических наблюдений [1].

По каждому проезду отклонение результата измерений контролируемой величины от опорного значения на l дистанции определяется как $\Delta_{i_l} = x_{i_l} - x_{l_{оп}}$, где Δ_{i_l} – отклонение результата измерений, x_{i_l} – результат измерения контролируемой величина (дефекта) по i -му проезду; $x_{l_{оп}}$ – опорное значение дефекта, записанное в ОМЛУ.

В результате по l проездам по каждому дефекту ЖДП x_l отклонение результата измерений контролируемой

величина от опорного значения представляет собой случайную величину с математическим ожиданием

$$M(\Delta_{i_l})_l = \frac{1}{I_l} \sum_{i=1}^{I_l} \Delta_{i_l}$$

и дисперсией $D(\Delta_{i_l})_l = \frac{1}{I_l - 1} \sum_{i=1}^{I_l} (\Delta_{i_l} - M(\Delta_{i_l})_l)^2$.

Таким образом, по участку получим

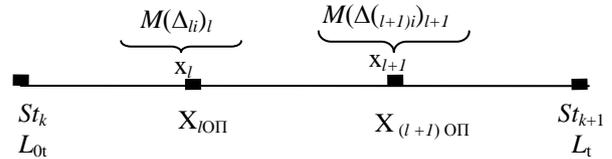


Рис. 2. Пример схемы участка ЖДП

IV. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МХ ИК ИИС ОСЖДП

Отклонение по каждому дефекту математического ожидания $M(\Delta_{i_l})_l$ от опорного значения $x_{l_{оп}}$ по всему участку с учетом всех дефектов также будет случайной величиной с математическим ожиданием

$$M_y = \frac{1}{L} \sum_{L=1}^{L_y} M_{\Delta_{i_l}}$$

и дисперсией $D_y = \frac{1}{L - 1} \sum_{L=1}^{L_y} (M_{\Delta_{i_l}} - M_y)^2$.

Учитывая, что значения величин дефектов в разных местах ЖДП являются величинами независимыми, предполагаем, что математические ожидания отклонений имеют случайный характер и в случае незначительных изменений МХ ИК имеет значение близкое к нулю. В случае изменения МХ ИК, увеличение математического ожидания инструментальной составляющей ИК, его значение проявится во всех измерениях и суммарная величина отклонений результатов измерений будет существенной, т.е. математическое ожидание отклонений результатов измерений на всем участке будет значительно отличаться от нуля.

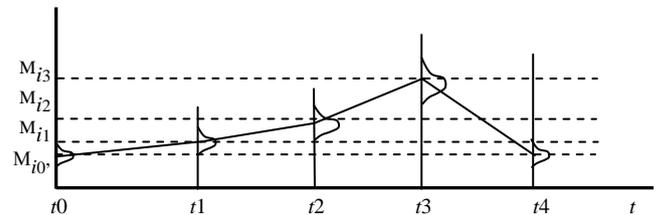


Рис. 3. Деградация измерительного канала

На рис. 3: расхождения математических ожиданий значений дефектов M_{i_1} и M_{i_2} и M_{i_2} и M_{i_0} незначимы; расхождение M_{i_3} и M_{i_2} , а также M_{i_3} и M_{i_0} значимы. После

эксперимента в момент времени 3 проведена коррекция характеристики преобразования измерительного канала. Таким образом, систематическая составляющая отклонения результатов измерений от опорных значений позволяет регистрировать изменение величины дефекта, или, если ее значение изменяется для всех измерений участка ЖДП, характеризует изменение МХ ИК и может быть использовано как поправка для результатов измерений. Анализ изменения величины, систематической составляющей отклонений во времени обеспечивает возможность принятия решений о необходимости калибровки ИК бортовой ИИС ОСЖДП.

Необходимо отметить, что точность позиционирования на дистанции линейного участка ЖДП результатов измерений имеет важное значение. Вопросы измерения координат рассмотрены в работах авторов [3] и поэтому они не рассматриваются. Однако при решении диагностических задач они должны быть учтены.

V. ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ СИТУАЦИИ

Введем следующие обозначения: РВД – рост величины дефекта, СВД – снижение величины дефекта, РССД – рост случайной составляющей дефекта, СССД – снижение случайной составляющей дефекта, СК – смещение координаты, РК – разброс в векторе координат.

При анализе результатов многократных измерений двух выборок возможны ситуации, представленные в таблице 1.

Проведем классификацию ситуаций.

$C1 = \text{нет РВД} \wedge \text{нет РССД} \wedge \text{нет СК} \wedge \text{нет РК}$ – стабильное состояние;

$C2 = \text{нет РВД} \wedge \text{нет РССД} \wedge \text{нет СК} \wedge \text{есть РК}$ – возможно некорректная работа одометра из-за изменений тяги, коррекция с помощью подсистемы GPS не выполняется;

$C3 = \text{нет РВД} \wedge \text{нет РССД} \wedge \text{есть СК} \wedge \text{нет РК}$ – при смещениях одного знака, возможно неполная коррекция показаний одометра с помощью подсистемы GPS;

$C4 = \text{нет РВД} \wedge \text{нет РССД} \wedge \text{есть СК} \wedge \text{есть РК}$ – неисправность системы позиционирования;

$C5 = \text{нет РВД} \wedge \text{есть РССД} \wedge \text{нет СК} \wedge \text{нет РК}$ – рост случайной составляющей, возможно, вследствие влияния сезонного фактора;

$C6 = \text{нет РВД} \wedge \text{есть РССД} \wedge \text{нет СК} \wedge \text{есть РК}$ – рост случайной составляющей, возможно, вследствие влияния сезонного фактора, возможно некорректная работа одометра из-за изменений тяги, коррекция с помощью подсистемы GPS не выполняется;

$C7 = \text{нет РВД} \wedge \text{есть РССД} \wedge \text{есть СК} \wedge \text{нет РК}$ – возможно, влияние сезонного фактора, при смещениях одного знака, возможно неполная коррекция показаний одометра с помощью подсистемы GPS;

$C8 = \text{нет РВД} \wedge \text{есть РССД} \wedge \text{есть СК} \wedge \text{есть РК}$ – возможно, влияние сезонного фактора, неисправность системы позиционирования;

$C9 = \text{есть РВД} \wedge \text{нет РССД} \wedge \text{нет СК} \wedge \text{нет РК}$ – при единичных случаях считать факт нарастания дефекта установленным, в случае роста величины дефекта по L отсчетам, провести калибровку измерительной подсистемы;

$C10 = \text{есть РВД} \wedge \text{нет РССД} \wedge \text{нет СК} \wedge \text{есть РК}$ – при единичных случаях предполагается появление новых дефектов, в случае роста величины дефекта по L отсчетам, провести калибровку измерительной подсистемы и системы GPS;

ТАБЛИЦА 1

	нет СК, нет РК	нет СК, есть РК	есть СК, нет РК	есть СК, есть РК
величины дефектов	нет РВД	нет РВД	нет РВД	нет РВД
	есть РВД	есть РВД	есть РВД	есть РВД
случайные составляющие дефектов	нет РССД	нет РССД	нет РССД	нет РССД
	есть РССД	есть РССД	есть РССД	есть РССД

$C11 = \text{есть РВД} \wedge \text{нет РССД} \wedge \text{есть СК} \wedge \text{нет РК}$ – при единичных случаях предполагается появление новых дефектов, в случае роста величины дефекта по L отсчетам, провести калибровку измерительной подсистемы и проверку эффективности коррекции координат за счет системы GPS;

$C12 = \text{есть РВД} \wedge \text{нет РССД} \wedge \text{есть СК} \wedge \text{есть РК}$ – провести ремонт системы позиционирования;

$C13 = \text{есть РВД} \wedge \text{есть РССД} \wedge \text{нет СК} \wedge \text{нет РК}$ – предполагается влияние сезонного фактора, при опровержении необходимо провести техобслуживание измерительной подсистемы;

$C14 = \text{есть РВД} \wedge \text{есть РССД} \wedge (\text{есть СК} \vee \text{есть РК})$ – необходимо провести техобслуживание измерительной и навигационной подсистем;

РВД, если $MO(X_i) > MO(X_{OM})$ и если для $X_i = \{x_{i1}, \dots, x_{ij}, x_{ij}, x_{ik}, \dots, x_{iL}\}$ и $X_{OM} = \{x_{11}, \dots, x_{1i}, x_{1j}, x_{1k}, \dots, x_{1L}\}$ не существует $(x_{1i} > x_{ij}) \wedge (x_{1k} < x_{1j})$

РССД, если $MO(X_i) \approx MO(X_{OM})$ и если для $X_i = \{x_{i1}, \dots, x_{ij}, x_{ij}, \dots, x_{iL}\}$ и $X_{OM} = \{x_{11}, \dots, x_{1i}, x_{1j}, \dots, x_{1L}\}$ выполняется неравенство $X_{imax} - X_{imin} > X_{OMmax} - X_{OMmin}$.

Ситуации C1, C9 – C12 позволяют делать диагностические выводы об изменении величины дефектов, C2 – C4 – о неисправности системы позиционирования, C5 – C8 – о влиянии сезонного фактора на состояние железнодорожного пути. Ситуации C13 и C14 говорят о необходимости технического обслуживания измерительной и навигационной подсистем.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В докладе рассмотрены особенности получения измерительной информации о величинах и координатах дефектов железнодорожного пути. Представлен подход к определению метрологических характеристик измерительных каналов. Описаны диагностические ситуации, позволяющие делать выводы о метрологической исправности измерительных каналов и состоянии железнодорожного пути.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Оценка дефектов железнодорожного полотна. Исследование критерия. / Королев П.Г., Костыря В.А., Кук С.А., Микус О.А. // XXI Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. SCM'2018, Санкт-Петербург, 23–25 мая 2018, С. 85–88.
- [2] Королев П.Г. Анализ развития дефектов железнодорожного полотна // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2018. №. 9, С. 93–98.
- [3] Опорная модель линейного участка железнодорожного полотна / Алексеев В.В., Орлова Н.В., Седунова Е.Н.// XX Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. SCM'2017, Санкт-Петербург, 24–26 мая 2017, С. 256–259.