

Комбинированный метод исследования безбалластного пути

Аннотация. Для получения достаточно точных значений необходимых вероятностных характеристик требуется проведение большого числа натурных экспериментов, что связано со значительными материальными затратами, особенно при исследовании безбалластной конструкции пути.

С целью сокращения объема испытаний необходимо определить концепцию совместного применения математического моделирования и ограниченного числа натурных экспериментов. Предполагается, что систему в целом можно смоделировать, а отдельные элементы модели безбалластного пути подвергнуть натурным испытаниям. В результате теоретических исследований могут быть найдены статистические значения вероятностных характеристик модели системы, а аналитическим путем — вероятностные характеристики упрощенной модели системы. Обычно два указанных вида характеристик модели системы существуют независимо и используются лишь для косвенного взаимного подтверждения их правильности.

Ключевые слова: железнодорожный путь; модель; испытания; расчет; вероятность; моделирование

Натурные испытания безбалластного пути крайне затруднены из-за высокой стоимости его строительства и выбора подходящих условий испытаний. В этой связи возрастает значение математического моделирования, которое должно позволить сократить объем испытаний. Необходимо определить концепцию

совместного применения математического моделирования и ограниченного числа натурных экспериментов. Предполагается, что отдельные элементы модели безбалластного пути можно заменить натурными испытаниями. Таким образом, появляется возможность испытать только отдельные элементы системы, а систему в целом смоделировать.

При исследовании практически всех явлений и процессов в железнодорожном пути конечная цель в общем случае состоит в определении каких-либо вероятностных характеристик. Представляется целесообразным воспользоваться методом, описанным в работе [1].

Рассмотрим обычный порядок исследований при определении вероятностных характеристик (рис. 1). Все виды исследований условно разделим на теоретические и натурные. Для определения вероятностных характеристик при теоретических исследованиях создается математическая модель железнодорожного пути. Далее определяются вероятностные характеристики этой модели. В зависимости от ее сложности могут применяться различные методы, наиболее широко используемые из которых можно разделить на аналитические и метод статистических испытаний.

Аналитические методы весьма разнообразны и в сильной степени зависят от сложности математической модели. Для сложных систем, к которым, безусловно, относится железнодорожный путь, применение только аналитических методов оказывается возможным лишь при существенных упрощениях. Таким образом, в случае применения аналитических методов можно получить вероятностные характеристики некоторой упрощенной модели системы.

Метод статистических испытаний является общим методом без каких-либо теоретических ограничений. Практическое использование этого метода ограничивается в основном возможным объемом моделирования или расчетов.

Определение вероятностных характеристик методом статистических испытаний может проводиться как для математической модели системы, так и для самой системы по результатам натурных экспериментов.

В результате теоретических исследований могут быть найдены методом статистических испытаний статистические значения вероятностных характеристик модели системы и аналитическим



Рис. 1. Схема исследования при определении вероятностных характеристик

путем — вероятностные характеристики упрощенной модели системы. Обычно два указанных вида характеристик модели системы существуют независимо и используются лишь для косвенного взаимного подтверждения их правильности.

Натурные испытания составляют один из важных этапов исследования железнодорожного пути. Только натурные эксперименты дают достоверную картину явлений и процессов. Однако для того, чтобы получить по ним достаточно точные значения необходимых вероятностных характеристик, обычно требуется проведение большого числа экспериментов, что связано со значительными материальными затратами. Это особенно актуально в случае исследования безбалластной конструкции пути [2—8].

Натурные исследования можно разделить на статистические натурные испытания пути в целом или его элементов и натурные исследования пути в целом или его элементов при специальных условиях и воздействиях.

По результатам статистических натурных испытаний определяются воздействия на путь и его элементы и их статистические характеристики, которые используются при теоретических исследованиях математической модели. Кроме того, результаты натурных испытаний пути и его элементов непосредственно служат для получения статистических значений его вероятностных характеристик.

Таким образом, непосредственно по натурным исследованиям находятся статистические значения вероятностных характеристик пути и его элементов. Кроме того, с использованием результатов натурных исследований при теоретических исследованиях определяются вероятностные характеристики математической модели.

Перечисленные вероятностные характеристики, как правило, существуют самостоятельно и независимо. Близость значений вероятностных характеристик математической модели пути и самого пути часто используется для утверждения о том, что при малом числе натурных экспериментов в качестве оценки вероятностных характеристик пути можно принять соответствующие характеристики его математической модели. Это утверждение, построенное в основном на интуитивных соображениях исследователя о близости созданной им модели и самого пути, нельзя признать в какой-либо мере математически обоснованным.

В настоящее время имеется необходимость разработки комбинированных методов определения вероятностных характеристик железнодорожного пути, одновременно и совместно использующих аналитические методы, метод статистических испытаний и результаты натурных экспериментов. Главная задача, которую должны решать эти методы, заключается в

использовании по возможности всей информации о вероятностных характеристиках системы, полученных при различных видах исследований, для более точной оценки этих характеристик или для получения их с требуемой точностью, но при возможно меньшем числе экспериментов. Необходимость в комбинированных методах исследования обусловлена трудоемкостью и высокой стоимостью натурных экспериментов, а требуемая точность результата при обычном способе его получения приводит к необходимости большого числа этих экспериментов.

В настоящее время практически не разработаны математически обоснованные методы определения вероятностных характеристик железнодорожного пути при совместном использовании результатов натурных испытаний и теоретических исследований. Необходимость развития таких методов чрезвычайно велика, так как стоимость и трудоемкость проведения натурных экспериментов на железнодорожном пути являются определяющими факторами в ограничении числа экспериментов. Это, в свою очередь, ограничивает точность получения вероятностных характеристик для оценки стоимости жизненного цикла при обосновании применения новых дорогостоящих конструкций пути.

До проведения статистических испытаний исследователь довольно часто имеет априорную информацию о математической модели и протекающих в ней процессах. Привлечение априорных сведений при организации экспериментов и обработке их результатов позволяет повысить точность оценок вероятностных характеристик или уменьшить число необходимых экспериментов. Вопросы рациональной организации, обработки результатов экспериментов и привлечения априорных сведений также являются существенным резервом снижения стоимости испытаний, особенно при внедрении новых конструкций пути.

Методы определения вероятностных характеристик железнодорожного пути и его математических моделей, базирующиеся на совместном применении аналитических методов, метода статистических испытаний и натурных экспериментов, а также методы организации экспериментов и вопросы привлечения априорных сведений при статистических испытаниях можно объединить одним общим названием — комбинированные методы определения вероятностных характеристик.

Представляется целесообразной следующая последовательность решения задач:

- разрабатывается новая или используется существующая математическая модель системы;
- осуществляются теоретические исследования с использованием математической модели системы, представляющей отображение знаний о системе,

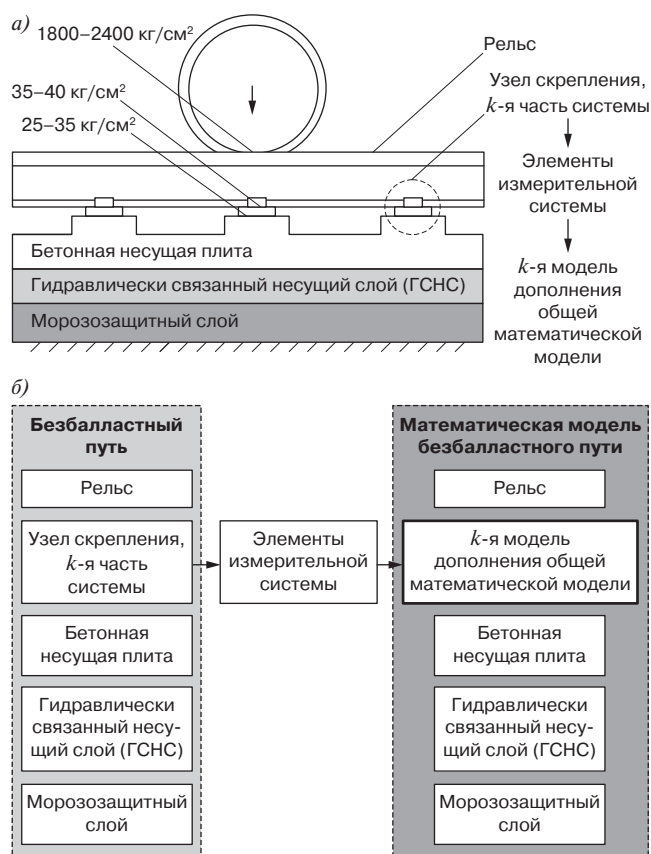


Рис. 2. Модель безбалластного пути как объекта испытаний:
а — напряжения в элементах железнодорожного пути; б — схема k -й модели дополнения системы

накопленных в процессе проектирования, разработки и испытаний аналогичных систем;

- проводятся натурные эксперименты с фиксированием результатов измерительной системой, вносящей случайные ошибки измерения;
- выводятся формулы для оценок вероятностных характеристик системы, например интенсивности осадки пути;
- определяется точность оценок и находится выигрыш в точности за счет использования результатов теоретических исследований;
- решается задача о минимизации числа экспериментов с системой и ее элементами.

При использовании комбинированных методов решаются две задачи определения вероятностных характеристик: первая — с требуемой точностью при минимальном общем числе экспериментов и вторая — с наилучшей точностью при заданном общем числе экспериментов.

При наличии априорных сведений о малости влияния какого-либо параметра можно, во-первых, вместо исходной рассматривать упрощенную модель железнодорожного пути, а во-вторых, по отношению к разбросам значений применять аналитические методы.

Натурным испытаниям новых конструкций пути, предназначенным для оценки его вероятностных характеристик, обычно предшествуют всесторонние и значительно большие по числу экспериментов испытания его элементов (рельсов, шпал, рельсовых креплений и др.). При этом условия проведения некоторых экспериментов соответствуют условиям проведения натурных испытаний пути, предназначенных для оценки его вероятностных характеристик. Естественно, что результаты натурных экспериментов элементов пути несут определенную информацию о вероятностных характеристиках пути в целом, а использовать эту информацию удобнее всего с привлечением математической модели пути.

Итак, пусть с железнодорожным путем и m его различных компонентов проведены N и $N_1, N_2, \dots, N_m$ независимых натурных экспериментов в одинаковых условиях, соответствующих условиям, для которых необходимо найти вероятностные характеристики системы. В общем случае различные элементы пути, с которыми проведены натурные эксперименты, могут иметь некоторое число одинаковых элементов, т. е. под различными элементами пути понимаются различные совокупности элементов. Так, узел рельсового крепления, являясь элементом железнодорожного пути, сам состоит из отдельных элементов — прокладка, клемма, анкер или шуруп и др. В свою очередь шпала для рельсового крепления АРС имеет в своем составе анкер, который является и ее неотъемлемой частью, и частью рельсового крепления.

В общем случае если железнодорожный путь называть системой, состоящей из элементов A, B, C , то возможные различные части системы будут $A, B, C, (AB), (AC)$ и (BC) .

Каждую часть системы можно дополнить моделью недостающих элементов до полной системы. Модель недостающих элементов можно называть моделью дополнения. Внешними воздействиями для модели дополнения являются измеренные значения соответствующих процессов части системы при ее натурных испытаниях. Внутренними воздействиями модели дополнения являются все остальные недостающие воздействия. Внутренние воздействия формируются в самой модели дополнения на основе имеющейся априорной информации об этих воздействиях.

Для простоты изложения k -ю часть системы, элементы измерительной системы, обеспечивающие измерение процессов на ее выходе, и соответствующую модель дополнения можно в совокупности назвать k -й моделью системы (рис. 2). Такое название является условным, так как k -я модель системы не просто модель, а содержит k -ю часть системы. Помимо k -х моделей системы, будет рассматриваться полная модель системы.

По результатам натурных испытаний системы в объеме N_m экспериментов могут быть найдены статистическое значение вероятностной характеристики системы, статистические и расчетные значения вероятностных характеристик модели в целом и k -х моделей системы.

Значения вероятностных характеристик k -й модели системы находятся аналогично вероятностным характеристикам всей модели с той лишь разницей, что вместо модели системы исследуется k -я модель дополнения.

При этом, естественно, вместо измеренных значений воздействий на систему (ее модель) рассматриваются измеренные значения процессов на выходе k -й части системы, которые являются воздействиями на модель дополнения.

По результатам натурных испытаний k -й части системы (N_k экспериментов) могут быть определены статистическое и расчетное значения вероятностной характеристики математической модели всей системы, например интенсивность осадки пути. Точность этой оценки характеризуется дисперсией K_0 , которая зависит от чисел экспериментов $N, N_1, N_2, \dots, N_m$ с путем в целом и его элементами. Следовательно, можно написать, что

$$K_0 = f(N_1, N_2, \dots, N_m).$$

Вклад, вносимый в точность оценки различными экспериментами, различный. Стоимость получения оценки вероятностной характеристики системы по натурным экспериментам определяется в основном стоимостью этих экспериментов. Поэтому, пренебрегая стоимостью теоретических исследований, необходимых для оценки вероятностной характеристики системы, можем написать, что стоимость A_0 получения оценки будет

$$A_0 = A_N + \sum A_i N_i,$$

где A_N и A_i — стоимость одного эксперимента с системой и i -й ее частью ($i = 1, \dots, m$); N — число экспериментов.

Зная зависимости дисперсии оценки и стоимости ее получения от чисел экспериментов $N, N_1, N_2, \dots, N_m$, можно решать задачу рационального планирования экспериментов, т. е. выбора указанных чисел, например, с целью получения наименьшей дисперсии K_0 при заданном значении стоимости A_0 или, наоборот, наименьшей стоимости A_0 при необходимом значении дисперсии. При этом необходимо иметь в виду, что зависимость K_0 от N до проведения экспериментов неизвестна. Эту зависимость можно найти, проведя достаточное число экспериментов только с самой системой.

Пусть N' — число экспериментов с системой, достаточное для получения требуемой зависимости. Тогда выбор чисел $N, N_1, N_2, \dots, N_m$ следует проводить исходя из вышеуказанных соображений с учетом ограничительных условий

$$\left. \begin{aligned} N &\geq N', \\ N_i &\geq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, m). \end{aligned} \right\}$$

Для определения N' можно рекомендовать следующее. Сначала проводится сравнительно небольшое число экспериментов с системой (порядка 10) и решается задача по определению рационального числа экспериментов. Затем после каждого нового эксперимента с системой вновь проводится определение этих чисел. Достаточность числа N' проведенных экспериментов оценивается по стабильности чисел экспериментов, получаемых при решении задачи. Далее порядок проведения экспериментов, в принципе, может быть любой. Однако желательнее провести сначала эксперименты с системой, а затем с ее элементами, так как зависимость, полученная по N экспериментам, будет более точной, чем полученная по N' экспериментам, поскольку $N' \leq N$. При этом эксперименты с системой можно проводить до тех пор, пока их число не превысит рационального N , найденного при фактически проделанном числе экспериментов.

Пусть числа предварительных экспериментов с различными частями системы, пригодных для оценки вероятностной характеристики системы, равны $N'_1, N'_2, \dots, N'_m$. Для получения зависимости K_0 от N проведем достаточное число N' экспериментов с системой. При построении этой зависимости целесообразно также привлечь результаты экспериментов с частями системы, так как это позволит повысить точность этой зависимости или уменьшить достаточное число экспериментов N' . Из этого следует, что реализация рационального планирования экспериментов требует проведения сначала экспериментов с системой и лишь потом с ее отдельными частями, что противоречит логике и обычно складывающемуся порядку испытаний. Действительно, отдельные части системы, как правило, бывают подготовлены к испытаниям раньше, чем вся система. Кроме того, отработку системы рациональнее и дешевле вести, отладив и испытав сначала отдельные ее элементы.

Таким образом, до начала испытаний пути в целом, как правило, уже имеются проведенные эксперименты с его отдельными элементами. Причем объем имеющегося экспериментального материала определяется не задачей оценки вероятностных характеристик системы, а какими-либо другими задачами,

например степенью готовности отдельных элементов и узлов.

Вывод. Предлагаемые решения возможно использовать для уменьшения объемов дорогостоящих натуральных испытаний такой конструкции, как безбалластный путь. Предполагается, что отдельные элементы модели безбалластного пути можно заменить натурными испытаниями. Таким образом, можно испытать только отдельные элементы системы, а систему в целом смоделировать.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пугачев В. Н. Комбинированные методы определения вероятностных характеристик. М.: Советское радио, 1973. 256 с.
2. Y. Bezin, D. Farrington, C. Penny, B. Temple, S. Iwnicki. The dynamic response of slab track constructions and their benefit with respect to conventional ballasted track. Taylor & Francis. Manchester, UK. November 2010. P. 12 – 19.
3. Giannakos K. Requirements of tomorrow's rail transport infrastructure. "InnoTrans 2004" Exhibition, Berlin, September 21 – 24, 2004. OSE, pp. 8 – 12.

4. Schilder R., Diederich D. Installation quality of slab track — A decisive factor for maintenance. Railway Technology Review, July 2007, spec. iss., pp. 20 – 25.

5. Савин А. В. Выбор конструкции пути для высокоскоростного движения // Вестник ВНИИЖТ. 2014. № 1. С. 55 – 59.

6. Савин А. В. Опыт укладки и эксплуатации безбалластного пути LVT // Путь и путевое хозяйство. 2013. № 5. С. 31 – 34.

7. Савин А. В. Участки переменной жесткости для безбалластного пути // Путь и путевое хозяйство. 2014. № 8. С. 2 – 6.

8. Савин А. В., Овчинников Д. В. Расчет устойчивости бесстыкового пути на подходах к искусственным сооружениям // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство: материалы 7-й Научно-практической конференции с международным участием МГУПС (МИИТ). 2014. С. 108 – 116.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

САВИН Александр Владимирович, заведующий отделением, начальник испытательного центра ОАО «ВНИИЖТ». 129626, Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10. Тел.: (499) 260-41-36. E-mail: 2604136@mail.ru

Combined Method of Ballastless Track Examination

Alexander V. Savin, Candidate of Technical Science, Head of Department for Certification, Metrology and Standardisation, Head of Testing Centre, JSC Railway Research Institute (JSC VNIIZhT). 10, 3rd Mytischinskaya str., 129626 Moscow, Russian Federation. Tel.: +7 (499) 2604136. E-mail: 2604136@mail.ru

Abstract. For obtaining precise enough values of the required probabilistic characteristics it is necessary to carry out a large number of full-scale experiments demanding for considerable expenditures (especially in the case of ballastless track examination).

For the purpose of the testing scope reduction it is necessary to define the common use concept of mathematic modeling and limited number of full-scale tests. It is supposed possible to obtain satisfactory model of a system as a whole and put to full-scale test limited number of ballastless track structure elements. Theoretical researches may help to find probabilistic characteristics' statistical values of the system model. And probabilistic characteristics of the simplified system model may be obtained from the analysis. As a rule the two types of the system model characteristics are available independently of each other to be used for the purpose of indirect mutual proof of their correctness only.

Keywords: railway track; model; tests; calculation; probability; modeling

References

1. Pugachev V. N. *Kombinirovannye metody opredeleniya veroyatnostnykh kharakteristik* [Combined methods for determining the probability characteristics]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1973. 256 p.
2. Bezin Y., Farrington D., Penny C., Temple B., Iwnicki S. *The dynamic response of slab track constructions and their benefit with*

respect to conventional ballasted track. Manchester, UK, Taylor & Francis Publ., November 2010, pp. 12 – 19.

3. Giannakos K. *Requirements of tomorrow's rail transport infrastructure*. "InnoTrans 2004" Exhibition, Berlin, September 21 – 24, 2004. OSE, pp. 8 – 12.

4. Schilder R., Diederich D. *Installation quality of slab track — A decisive factor for maintenance*. Railway Technology Review, July 2007, spec. iss., pp. 20 – 25.

5. Savin A. V. *Vybor konstruktssii puti dlya vysokoskorostnogo dvizheniya* [Track design selection for high-speed traffic operations]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2014, no. 1, pp. 55 – 59.

6. Savin A. V. *Opyt ukladki i ekspluatatsii bezballastnogo puti LVT* [Experience in laying and exploitation of non-ballasted LVT track]. Put' i putevye khozyaystvo, 2013, no. 5, pp. 31 – 34.

7. Savin A. V. *Uchastki peremennoy zhestkosti dlya bezballastnogo puti* [Line sections of variable rigidity for non-ballasted track]. Put' i putevye khozyaystvo, 2014, no. 8, pp. 2 – 6.

8. Savin A. V., Ovchinnikov D. V. *Raschet ustoychivosti besstykovogo puti na podkhodakh k iskusstvennym sooruzheniyam* [Calculation of the stability of welded rails on the approaches to engineering structures]. Vnedrenie sovremennykh konstruktssiy i peredovykh tekhnologiy v putevye khozyaystvo. Mat. 7-y nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchast. [The introduction of modern constructions and advanced technology to track facilities. Proc. 7th sci.-pract. conf. with int. particip.]. Moscow, Moscow State University of Railway Transport Publ., 2014, pp. 108 – 116.