

Л. В. ГОЙХМАН, А. Н. САВОСЬКИН, Д. А. ХАРИН

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ВАГОНОВ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ПРОЧНОСТИ И ВИБРОСТОЙКОСТИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Комплекты приборов, состоящие из сейсмоприемников ВБП-3 [8] и ВБП-5 [9], осциллографов Н-700 [1] и ИСО-2, оснащенных гальванометрами ГБ-III и ГБ-IV, предполагается применять для регистрации движения грунта и сооружений при разрушительных землетрясениях силой 8 баллов и выше. Чрезвычайная редкость таких землетрясений и вызываемые ими большие перегрузки требуют от приборов особой надежности и прочности.

Сейсмоприемники ВБП-3 многократно записывали, не разрушаясь, в ближайшей зоне мощных промышленных взрывов колебания грунта, доходившие по амплитудам до $100 + 150$ мм. Только в отдельных случаях, при взрывах в скальных породах, в приборах были обнаружены повреждения — поломки «по живому месту» подковообразных магнитов из сплава магнитов и срывы с них полюсных наконечников, закрепленных клеем БФ.

Однако это были импульсивные, протекавшие в доли секунды перегрузки и нет уверенности в том, что приборы также успешно выдержат длительные знакопеременные перегрузки при землетрясениях. Лабораторные испытания приборов, выполненные при построении их амплитудно-частотных характеристик и при изучении искажений при записи переходных процессов, проводились на маломощных однокомпонентных линейных и поворотных вибрационных платформах с большими амплитудами, но на относительно низких частотах, т. е. в ограниченном диапазоне перегрузок.

Двухмаятниковые сейсмоприемники ВБП-5, разработанные значительно позже для раздельной регистрации линейных и угловых перемещений, вообще не прошли еще полевых испытаний на прочность, а в лаборатории испытывались на тех же стендах.

Большой интерес представляет выяснение поведения рамочных гальванометров различных типов при сотрясениях и вносимых ими искажений в записи сильных землетрясений. При регистрации колебаний при взрывах осциллографы, подвешенные на амортизирующих резиновых жгутах, располагались, как правило, значительно дальше от эпицентра, чем сейсмоприемники, и соединялись с ними проводами. Поэтому начало записей — вступления продольных волн не искажались вообще. На рис. 1, а показана осциллограмма, на отдельных каналах которой видны

периодические ослабления или пропадания записи. Эти искажения внесены возникшими от сотрясения грунта колебаниями всего магнитного блока (с переуспокоенными гальванометрами ГБ-III), закрепленного для отвязки от высокочастотных вибраций мотора на резиновых амортизаторах.

На рис. 1, б показан участок записи, полученной вблизи эпицентра контактного взрыва, воздушная ударная волна от которого потрясла автобус вместе с подвешенными в нем на резиновых амортизаторах осциллографами, оснащенными гальванометрами ГБ-III. На всех каналах видны синхронные, одинаковые по форме всплески колебаний.

В отличие от приведенных примеров сильные землетрясения будут воздействовать на осциллограф и его гальванометры в течение всего процесса регистрации.

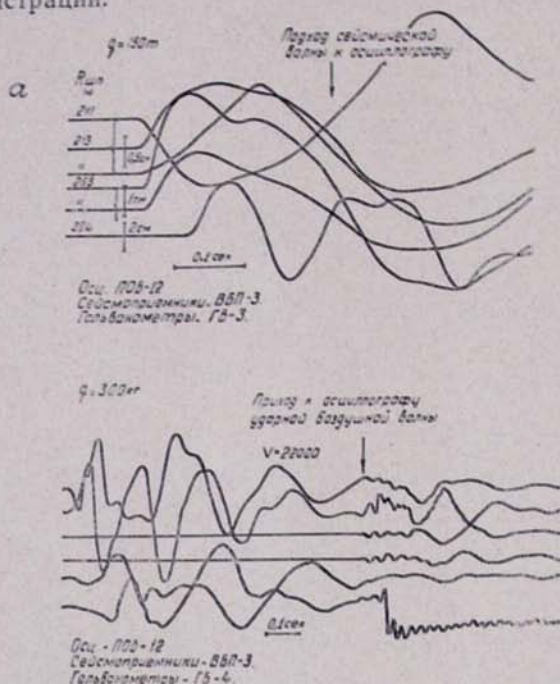


Рис. 1. Искажения записи: а—от колебаний блока гальванометров при прохождении сильной сейсмической волны; б—от колебаний переуспокоенных гальванометров при прохождении ударной воздушной волны

Из-за отсутствия в ИФЗ мощного стенда с широким спектром и динамическим диапазоном колебаний, имитирующего сильное землетрясение, на котором можно было бы разместить одновременно сейсмоприемники и осциллограф, решено было для испытания приборов на прочность и на искажения использовать трамвайный, а так же железнодорожный вагон, находящийся в движении. При этом предполагалось решить еще одну задачу, а именно: выяснив пригодность сейсмической аппаратуры для записи колебаний вагонов, получить информацию о зависимости колебаний от различных факторов.

Замеры колебаний вагонов производились бригадой Академии коммунального хозяйства и Московского института инженеров железнодорожного транспорта совместно с Институтом физики Земли АН СССР¹.

Вагон электропоезда или трамвая, идеализированная схема которого показана на рис. 2, является сложной колебательной системой. В нем имеется семь различных сосредоточенных масс (массами пружин пренебрегаем), кузов вагона— m_1 , две тележки— m_2 и m_3 и четыре колесных пары— m_4 — m_7 с буксами (и моторными приводами).

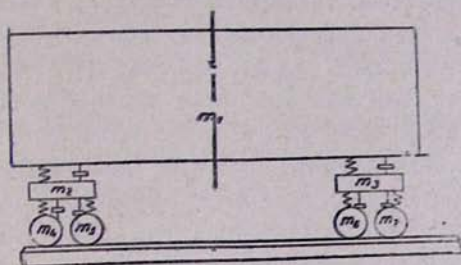


Рис. 2. Схема вагона

Массы кузова и тележек соединяются рессорами или сложными цилиндрическими пружинами. Тележки опираются на колесные пары вертикальными цилиндрическими пружинами. Между тележками, колесами и кузовом имеются амортизаторы для гашения собственных колебаний.

Конструкция вагона такова, что кузов и тележки приближенно могут рассматриваться как твердые тела, каждое из которых обладает шестью степенями свободы в пространстве.

В технической литературе линейным колебаниям вдоль вертикальной оси присвоено название подпрыгивания, вдоль продольной горизонтальной оси — подергивания и вдоль поперечной горизонтальной оси — оттопы. Соответственно вращательные колебания вокруг вертикальной оси называются виляниями, вокруг горизонтальной поперечной — галопированием и вокруг горизонтальной продольной — боковой качкой.

Свободные (собственные) вертикальные колебания обрессоренной части вагона теоретически исследовались многими авторами. В частности, эти сведения приведены в [5].

Периоды колебаний галопирования и подпрыгивания кузова вагона заключены в пределах 0,12—0,52 сек.

Экспериментальным путем вертикальные свободные колебания вагона не замерялись.

Собственные поперечные колебания кузова и тележки подвижного состава теоретически рассматривались так же во многих трудах [6, 7]. Периоды колебаний боковой качки и оттопы кузова заключены в пределах 0,108—1,41 сек. Период его виляния 0,303—1,43 сек.

¹ В производстве измерений участвовали П. В. Хромов и В. Я. Либин, которым авторы выражают свою благодарность.

Факторы, вызывающие вынужденные колебания колес, многообразны. К ним относятся неровности и стыки рельс, отклонения рельсовых путей, колес и колесных бандажей от симметрии, переменные прогибы верхнего строения пути, стрелки, крестовины и т. п.

Проведенная в ЛИИЖТ'e систематизация вертикальных неровностей [12] показала большое разнообразие их формы и размеров по амплитуде (0,5—5,00 мм) и длине (0,3 до 5 м). Вследствие этого полученный на моделях спектр колебаний колесз зависящей от скорости движения по этим неровностям, чрезвычайно широк. Частоты колебаний букс достигают 240 гц, а величины ускорений—30—50 g.

Из изложенного видно, что вагоны отвечают задаче испытания приборов на прочность, так как являются многокомпонентными динамическими системами с широким спектром колебаний. К приборам для измерения колебаний подвижного состава действительно предъявляются серьезные требования как к диапазону амплитуд и интервалу частот, измеряемых колебаний, так и к прочности и виброустойчивости. Выполнение последних требований особенно важно при замерах колебаний нерессоренных частей вагона.

Приборы ВБП-3 и ВБП-5 устанавливались в кузовах вагонов и на буксах колесных пар. Внутри кузова вагона приборы жестко прикреплялись к полу и ориентировались в различных плоскостях для записи как линейных, так и угловых перемещений кузова. На буксах приборы устанавливались с помощью специальных кронштейнов и при движении вагона регистрировали траектории центров колесных пар.

Осциллограф подвешивался в вагоне на резиновых шнурах для амортизации гальванометров от тряски.

Работа приборов проверялась при различных скоростях движения. Так, для трамвайных вагонов максимальная скорость достигла 50 км/час, для вагонов электропоезда—150 км/час.

Одной из задач исследования было сопоставление данных, получаемых приборами разных типов. Для этого как в кузове, так и на буксах колесных пар устанавливались параллельно сейсмоприемники ВБП-3 и ВБП-5.

Первые отказы приборов ВБП-3, установленных на буксах, возникали, как правило, после 20 часов непрерывной работы. Эти отказы были вызваны обрывом выводов индукционных катушек электромагнитного преобразователя в местах их припоя. Следующая группа отказов, возникавшая через 30 часов непрерывной работы, вызывалась поломкой полуоси вблизи места соединения ее с маятником. Аналогичные повреждения наблюдались и приборов ВБП-5, установленных на буксе, однако время безотказной работы не превышало 5—6 часов. Кроме этих повреждений, у приборов ВБП-5 наблюдались изломы маятников вблизи крепления рамки каркаса.

Приборы, установленные в кузовах вагонов, где уровень перегрузок не превышает 0,5 g, отказов не имели в течение 2 месяцев работы.

Выявленные в результате опытных поездок слабые места приборов были изменены конструктивно и усилены. Так, например, маятники приборов ВБП-5 совместно с осью начали изготавливаться из нержавеющей стали. Конструкция выводов электромагнитных преобразователей также была изменена пропуском их через полую полуось. Испытания модернизированных приборов, получивших название ВБПП, показало, что время безотказной работы увеличилось в 3—4 раза.

Большой интерес представляет анализ записей приборов, полученных во время движения вагонов. При этом следует отметить, что траектории центра колеса были записаны впервые.

Образцы осциллограмм с записями колебаний вагона приведены на рис. 3.

Как можно видеть из этого рисунка, на осциллограммах вертикальные траектории центров колес и различные типы колебаний кузова резко.

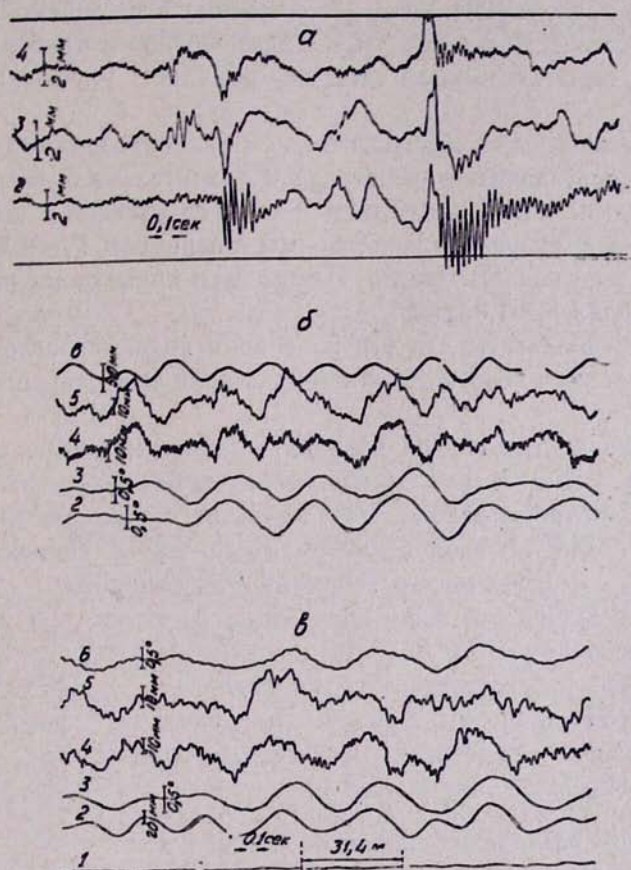


Рис. 3. Осциллограммы колебаний вагона ЭР-2: а—вертикальные траектории центров колес вагона при движении по крестовине со скоростью 12 км/ч; б—колебания при движении по кривой со скоростью 130 км/ч. Каналы: 2—боковая качка; 3—галопирование; 4 и 5—вертикальные траектории центров колес; 6—подпрыгивание; в—колебания при движении по прямой со скоростью 110 км/ч. Каналы: 1—отметчик пути $l=31,4$ м; 2—подпрыгивание; 3 и 6—галопирование; 4 и 5—вертикальные траектории центров колес

отличаются между собой по форме колебаний и спектру. На буксах на сравнительно медленные ($T=0,6-1$ сек) неправильной формы перемещения накладываются высокочастотные колебания. Только в некоторых местах записи просматриваются отдельные, сравнительно правильной формы короткие дуги колебаний с частотами 15—17, 20—25, 50—60, 150—175 гц. Размахи этих колебаний не превышают 5—7 мм. Не исключено наличие более низких и более высоких частот, не пропускаемых частотной характеристикой канала. В отдельных же случаях размахи низкочастотных колебаний букс достигали 45—50 мм (вход электропоезда в кривую $R=700$, м со скоростью 150 км/ч).

Сравнение осциллограмм показало, что записи угловых колебаний кузова вагона—галопирования и боковой качки, выполненные двумя приборами типа ВБП-5, идентичны. Кроме того, сравнение записей колебаний подпрыгивания кузова, выполненных приборами ВБП-3 и ВБП-5, показало, что прибор ВБП-3, помимо линейных перемещений, реагирует до некоторой степени и на угловые. Таким образом, прибор ВБП-5 за счет наличия двухмятниковой системы обладает улучшенными свойствами.

В спектре колебаний подпрыгивания и галопирования кузова высокочастотные составляющие представлены значительно беднее и с меньшими размахами. Часто наблюдаются участки записей с колебаниями почти правильной синусоидальной формы с периодом $T_1=0,6$ сек. В колебаниях боковой качки кузова отмечены дуги правильных колебаний с периодом порядка $T_2=1,02$ сек.

Можно предполагать, что эти колебания являются автоколебаниями кузова, механизм возбуждения которых пока еще достаточно не раскрыт.

Траектории центра колеса являются типичным стационарным случайным процессом, а осциллограммы—его реализацией.

Для определения основных статистических характеристик исследуемых процессов каждая реализация квантовалась по времени с шагом $\Delta t = 0,03$ сек в соответствии с теоремой Котельникова.

Замеры текущих значений случайных функций $y(t)$ производились на цифровальщике УЦС-1 [4] с шагом Δt . Вычисление основных статистических характеристик производилось на ЦВМ БЭСМ-3М, при этом первоначально выполнялось центрирование процесса, в результате которого определялись значения центрированных случайных функций Z_i . На основе вычисленных значений Z_i находилось экспериментальное распределение плотности вероятностей изменения значений $Z_i(t)$ при различных скоростях движения.

В качестве подходящего закона распределения величин при небольших скоростях движения принимался нормальный закон; последующий анализ производился в рамках корреляционной теории стационарных случайных функций [2, 10].

Автокорреляционные функции $k(\tau)$ (рис. 4) являются знакосохраняющимися затухающими функциями. С увеличением τ в составе $k(\tau)$ проявляется регулярная составляющая. С ростом скорости движения

амплитуда растёт, что вызывает отклонение экспериментальных распределений от нормального закона.

Влияние этой составляющей оценивалось с помощью коэффициента регулярности q :

$$q = \sqrt{\frac{2D_p}{D - D_p}}, \quad (1)$$

где D_p — дисперсия регулярной составляющей;

$D = k(0)$ — дисперсия случайного процесса.

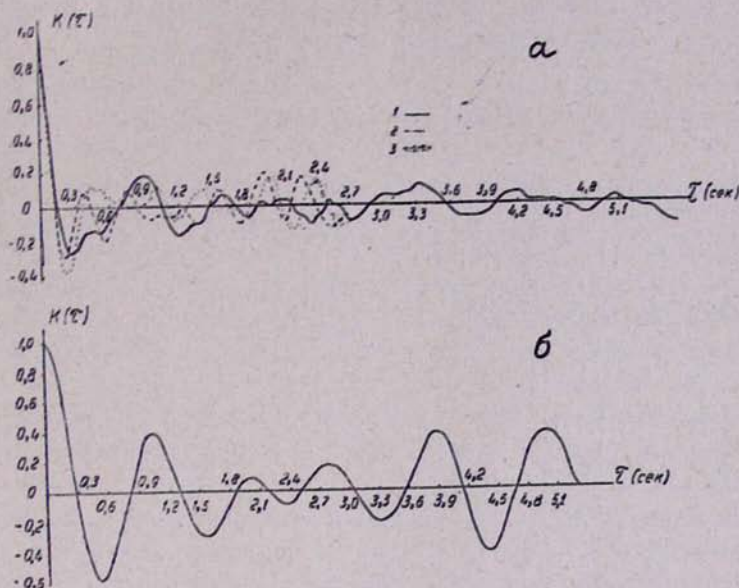


Рис. 4. Автокорреляционные функции траектории центров колес: а—вагона электропоезда при движении по кривой со скоростью 130 км/ч для различных букс (1, 2 и 3); б—трамвайного вагона при движении по пути на шпальнобетонном основании со скоростью 20 км/ч

Величины q , подсчитанные для $k(\tau)$ по результатам испытаний трамвайных вагонов, оказались меньше 0,7 для скоростей движения до 40 км/ч, а для более высоких скоростей $q > 0,7$.

При интегрировании функций $k(\tau)$ было обнаружено наличие дисперсии постоянной составляющей D_n , обусловленной изменением жесткости пути по длине рельсового звена.

Таким образом, случайную функцию $Z_l(t)$ следует рассматривать как результирующий процесс, состоящий из суммы случайной, регулярной и постоянной составляющих:

$$Z_l(t) = Z_{cl}(t) + Z_p(t) + Z_n. \quad (2)$$

Регулярная составляющая процесса распределена по закону арк-косинуса. Распределение постоянной и случайной составляющих является нормальным, так как при малой скорости движения влияние $Z_p(t)$ мало.

Закон распределения результирующего процесса является результатом композиции нормального распределения и распределения арксинуса и становится бимодальным. Так как бимодальность результирующего распределения указывает на наличие в процессе нескольких независимых центров рассеяния, получим, что

$$K(\tau) = K_{\text{сз}}(\tau) + K_p(\tau) + D_n. \quad (3)$$

По корреляционным функциям вычислялись функции нормированных спектральных плотностей $q(\omega)$ (рис. 5).

Некоторые свойства случайных процессов $Z_i(t)$ описываются моментами функций спектральных плотностей:

$$m_K = \int_0^{\infty} \omega^K G(\omega) d\omega, \quad (4)$$

где K — порядок момента.

Моменты спектра m_K связаны с понятием „ширины спектра“ ε :

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4}}. \quad (5)$$

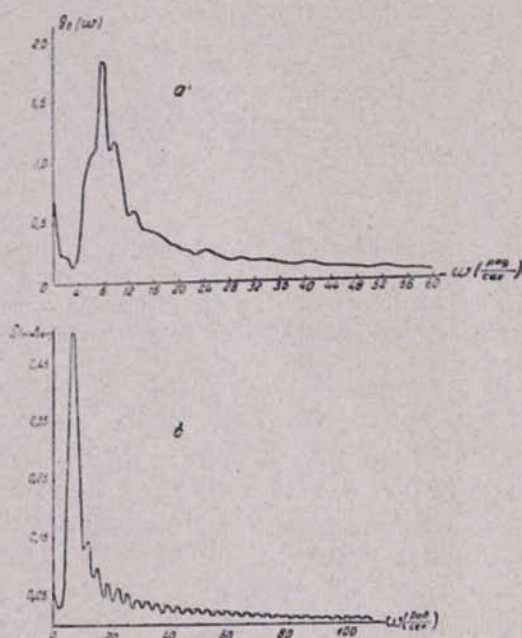


Рис. 5. Функции спектральной плотности траектории центров колес: а—вагона электропоезда при движении со скоростью 90 км/ч; б—трамвайного вагона при движении со скоростью 40 км/ч

Если спектр процесса достаточно широк, то $\varepsilon > 0,4$. При скоростях движения 5—10 км/ч $\varepsilon > 0,4$, динамические возмущения от-

утствуют и доминируют геометрические неровности пути. Спектр процесса при этом напоминает спектр белого шума. При скоростях движения $10-30 \text{ км/ч}$ $v \leq 0,4$ и случайные процессы $Z_i(t)$ — узкополосные. При скоростях движения свыше 30 км/ч процесс вновь становится широкополосным.

По мере увеличения скорости движения отчетливо проявляется эффект затягивания частот (см. рис. 5,а) [3], являющийся следствием нелинейности основания пути и внешне характерный тем, что линия максимума функции спектральной плотности поднимается из углубления [12]. Наличие этого эффекта свидетельствует о том, что путь является совокупностью осцилляторов с нестабильными частотами, которые, взаимодействуя между собой, затягиваются к несущей частоте, образуя один основной осциллятор.

Статистическому анализу подверглись также и вертикальные колебания подпрыгивания кузова вагона. Как и в случае колебаний центра колеса, вертикальные колебания кузова являются случайным процессом, состоящим из суммы случайной, регулярной и постоянной составляющих, результирующее распределение является композицией нормального закона и закона распределения арккосинуса. Дисперсия постоянной составляющей не зависит от скорости движения, а зависит только от нагрузки на ось, характеризуя колебания относительно статического прогиба. Это объясняется тем, что в центральном подвешивании (между тележкой и кузовом вагона) имеются резинометаллические рессоры с нелинейными характеристиками. Коэффициент регулярности, вычисленный для различных скоростей движения, зависит от конструкции пути. Принцип аддитивности, использованный при анализе автокорреляционных функций, позволил выделить в процессе регулярную составляющую с частотой колебаний, равной собственной.

Основной максимум функций спектральной плотности подпрыгивания трамвайного вагона оказался на той же частоте, что и максимум спектра вертикальных колебаний центра колеса. Таким образом, суммарный процесс колебаний центра колеса и подпрыгиваний кузова когерентен на основной частоте возмущений.

Анализ показал, что колебания кузова и центра колеса являются нестационарно связанными процессами, так как связь между ними осуществляется с помощью нелинейных элементов.

Доминирующее влияние на суммарный колебательный процесс оказывают колебания центра колеса, то есть возмущающие факторы. При этом величина функции взаимной корреляции k_{xy} достигала значения 0,65. В то же время влияние вертикальных колебаний кузова на траекторию центра колеса незначительно и им можно пренебречь.

Основная энергия суммарного процесса зависит от колебательной энергии центра колеса, что свидетельствует о значительных демпфирующих свойствах системы рессорного подвешивания вагона.

В ы в о д ы

1. В условиях значительных перегрузок (до 0,5 g) отмечена удовлетворительная надежность и хорошие прочностные качества сейсмоприемника ВБП-3. Проведенные исследования позволили создать более надежную модификацию прибора ВБП-5—сейсмоприемник ВБПП.

2. Применение сейсмографов ВБП-3 и ВБП-5 для исследования колебаний железнодорожных экипажей оказалось удачным. Впервые получены качественные и достоверные записи абсолютных перемещений центров колес, а также всех форм колебаний кузова. Амплитудно-частотные характеристики приборов позволили охватить весьма широкий диапазон низко- и высокочастотных колебаний.

3. Анализ полученных осциллограмм показал, что траектории центра колеса и колебания подпрыгивания кузова являются реализациями случайного процесса. Результаты статистической обработки позволили определить некоторые характеристики пути, оценить влияние скорости движения, конструкции пути и подвижного состава на процессы взаимодействия колеса и рельса.

Институт физики Земли
АН СССР

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Борисевич Е. С., Забелин М. В., Катюшкин В. Ф. 14-канальный осциллограф ПОБ-1414 (Н-700). Изд. ВИНТИ, 1959.
2. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М., Физматгиз, 1957.
3. Винер Н. Нелинейные задачи в теории случайных процессов. Л., М., 1964.
4. Колесников Ю. А., Соловье В. Н. Установка для цифрования сейсмограмм. Труды ИФЗ АН СССР, № 35 (202), М., 1964.
5. Медель В. Б. Исследование динамических свойств головного вагона электропоезда. Труды МИИТ, вып. 121, М., 1960.
6. Медель В. Б. Боковые колебания электровоза Н-60. Труды МИИТ, вып. 157, М., 1962.
7. Мезен А. (Mauzin A.). Исследование поперечной динамики вагонов. Бюллетень МАЖК, вып. 11. М., изд. «Транспорт», 1966.
8. Рулев Б. Г. и Харин Д. А. Сейсмографы для регистрации больших перемещений. Труды ИФЗ АН СССР, № 16 (183), М., 1961.
9. Симонов Л. И., Харин Д. А. Сейсмограф ВБП-5 для раздельной регистрации линейных и угловых перемещений. Труды ИФЗ АН СССР, № М., 1968.
10. Хальд А. Математическая статистика с техническими приложениями. М., ИЛ, 1956.
11. Харин Д. А., Савоськин А. Н., Гойхман Л. В. Некоторые результаты исследований вертикальных траекторий колеса. Труды МИИТ, вып. 296, М., изд. «Транспорт», 1968.
12. Яковлев В. Ф. Исследование сил взаимодействия колес и рельс с учетом нелинейных односторонних связей и переменных масс. Труды ЛНИЖТ, вып. 233, Л., 1964.