

СССР
МИНИСТЕРСТВО ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ
ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ
ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

На правах рукописи

Х. Г. ХАЛУПОВИЧ

**Исследование спектров случайных
колебаний и динамических напряжений в
конструкциях подвижного состава
железных дорог**

(433. Подвижной состав и тяга поездов)

Автореферат

диссертации, представленной на соискание
ученой степени кандидата технических наук

На правах рукописи

Х. Г. ХАЛУПОВИЧ

3581a
Исследование спектров случайных
колебаний и динамических напряжений в
конструкциях подвижного состава
железных дорог

(433. Подвижной состав и тяга поездов)

Автореферат

диссертации, представленной на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Днепропетровский институт инженеров ж. д. транспорта направляет Вам автореферат кандидатской диссертации инженера Х. Г. Халуповича. Просим Вас и всех заинтересованных лиц Вашего учреждения принять участие в публичной защите диссертации или прислать свой отзыв (в 2-х экземплярах).

Работа выполнена в Рижском филиале Всесоюзного научно-исследовательского института вагоностроения.

Руководитель — член-корреспондент АН УССР, доктор технических наук, профессор В. А. Л а з а р я н.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук Б. П. Л а в р о в,
кандидат технических наук Л. А. М а п а ш к и н,
кандидат технических наук В. Ф. У ш к а л о в.

Ведущее предприятие — Всесоюзный научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ЦНИИ МПС)

Автореферат разослан 23 ноября 1968 года.

Защита диссертации состоится *24 ноября* 1968 года на заседании Ученого совета Днепропетровского института инженеров ж. д. транспорта, гор. Днепропетровск, 10, ул. Университетская, 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Ученый секретарь Совета

Ю. А. Радзиховский

Увеличение скорости движения поездов, повышение комфортабельности, надежности и других характеристик требует совершенствования методов конструирования и испытаний подвижного состава, более глубоких научных исследований в области его динамики и прочности.

Большое значение для решения задачи совершенствования подвижного состава имеет анализ и учет реальных динамических нагрузок и возмущений, действующих на подвижной состав при движении по рельсовому пути, являющихся случайными функциями времени. Это вызывает необходимость применения математической статистики и теории случайных функций, как при расчете параметров конструкций, так и при оценке характеристик испытываемых опытных образцов.

Одной из важнейших характеристик случайного процесса является спектральная плотность, характеризующая распределение средней мощности процесса по частоте. Спектральный анализ дает возможность определить, на каких частотах сосредоточена основная энергия колебаний кузова и рам тележек, какие виды колебаний вносят основной вклад в динамику экипажа и как изменяется картина колебаний с повышением скорости. Решение этого и ряда других вопросов, на которые дают ответ спектры, необходимо для правильной оценки усталостной прочности, плавности хода и для оптимизации конструкции экипажа по заданным параметрам в процессе проектирования и доводки.

В то же время широкое внедрение спектральных методов тормозится отсутствием аппаратуры спектрального анализа, которая бы удовлетворяла всем требованиям, вытекающим из специфических особенностей случайных колебаний железнодорожного экипажа при движении по рельсовому пути. Поэтому прежде всего должна быть решена методическая часть проблемы, включающая разработку аппаратуры спектрального анализа и методики исследования самих спектров, учитывающей особенности железнодорожного экипажа, как динамической системы со многими степенями свободы и многими входами.

В соответствии с изложенным, в данной работе решены следующие задачи: 1) Рассмотрены статистические характеристики и специфические особенности исследуемых процессов и на этой основе разработаны технические требования к системе спектрального анализа. 2) С учетом предъявленных требований рассмотрены различные методы спектрального анализа случайных процессов и существующие аппаратурные решения, на основе чего произведен выбор метода анализа и вида аппаратуры. 3) Разработана аппаратура спектрального анализа и исследованы ее погрешности. 4) Произведен эксперимент по определению спектральной плотности динамических напряжений, прогибов и ускорений, разработана методика исследования спектров и дан анализ полученных результатов.

В I главе рассмотрены некоторые статистические характеристики исследуемых процессов и приближенно определен ожидаемый характер их спектров.

При движении по рельсовому пути в экипаже возникают колебания, вызванные случайно распределенными геометрическими и динамическими неровностями пути, стыками, неровностями поверхности катания колес, процессами самовозбуждения (виляние) и другими факторами. Эти колебания являются случайными процессами.

В результате испытательной поездки мы получаем одну реализацию ограниченной длительности для каждого из исследуемых процессов, а статистические характеристики процесса определяются путем осреднения по времени. Для того, чтобы полученные таким путем статистические характеристики распространить на период эксплуатации испытуемого объекта, очевидно, необходимо, чтобы эти характеристики при движении с постоянной скоростью по однородному пути по прошествии некоторого времени стабилизировались и при дальнейшем увеличении времени измерения давали лишь незначительные отклонения.

Для того, чтобы проверить выполнение этого условия и оценить минимальное время анализа, необходимое для получения стабильного результата, была использована аппаратура амплитудного анализа, дающая возможность получить с высокой точностью одномерную плотность распределения.

Исследуемый сигнал, воспроизводимый с магнитной пленки, модулирует по амплитуде последовательность коротких импульсов, что эквивалентно отсчетам значений сигнала через равные промежутки времени. Модулированные импульсы

вводятся в анализатор, сортирующий их по амплитуде на несколько десятков разрядов и запоминающий, сколько импульсов накопилось в каждом разряде за время анализа.

По полученным экспериментальным законам распределения были рассчитаны дисперсия и моменты 3-го и 4-го порядка. Эксперименты, проведенные для реализаций различной длительности при постоянной скорости на однородном прямолинейном пути, показали, что законы распределения исследуемых процессов близки к нормальным, а среднеквадратическое отклонение экспериментального значения дисперсии, примерно, обратно пропорционально корню квадратному из длительности реализации T . Это соответствует известному выражению для относительного среднеквадратического отклонения ϵ оценки дисперсии эргодического стационарного процесса:

$$\epsilon = \frac{1}{\sqrt{W T}} \quad (1)$$

где W — эффективная ширина спектра процесса.

Эти результаты явились основанием для использования теории спектрального анализа нормальных стационарных случайных процессов с целью приближенной оценки требуемой длительности реализации при спектральном анализе. Эксперименты, произведенные впоследствии с помощью описанного в 3-ей главе спектроанализатора, подтвердили реальность этой оценки.

С целью разработки технических требований к системе спектрального анализа была произведена также приближенная оценка частотного диапазона исследуемых процессов и действующих на экипаж возмущений.

Спектра вертикальных перемещений колес, как источника

Неровность пути длиной l при скорости V дает импульс

длительностью $\tau_0 = \frac{l}{V}$ эффективный спектр которого

занимает диапазон частот от 0 до $\frac{1}{\tau_0}$ гц. Как показано в

трудах М. Ф. Вериги, Н. Н. Кудрявцева и М. И. Кулагина, геометрические и динамические неровности, образующиеся при изготовлении рельсов, строительстве и эксплуатации пути, имеют длину от нескольких сантиметров до нескольких

метров и глубину от десятых долей до 2—3 мм. Эти неровности, случайно распределенные вдоль пути, образуют непрерывный спектр, занимающий диапазон от 0 до сотен гц.

Периодические изломы траектории колес на стыках могут быть представлены в виде последовательности импульсов, параметры которых промодулированы случайными процессами. Как показано Д. Миддлтоном и Б. Р. Левиным, спектр такого сигнала состоит из непрерывной и дискретной (линейчатой) составляющих. Последняя состоит из бесконечного ряда гармоник, кратных частоте следования стыков. Непрерывный спектр и огибающая линейчатого спектра повторяют форму спектра одиночного импульса.

Если аппроксимировать перемещение колеса на стыке двумя симметричными ветвями кубической параболы и принять, что образованные таким путем импульсы имеют постоянную длительность, а их амплитуды принимают случайные независимые значения, то получим спектр, определяемый выражением

$$S(\omega) = \frac{2}{T} |F(\omega)|^2 \left[\sigma^2 \cdot \frac{2\pi}{T} a^2 \sum_{r=-\infty}^{\infty} \delta(\omega - \frac{2\pi r}{T}) \right] \quad (2)$$

где
$$F(\omega) = 1,5\tau \left[\left(\frac{\omega\tau}{2} \right)^2 - \sin^2 \frac{\omega\tau}{2} \right] / \left(\frac{\omega\tau}{2} \right)^4 \quad (3)$$

Здесь $S(\omega)$ — энергический спектр (спектральная плотность); T — период повторения импульсов; $F(\omega)$ — амплитудный спектр одиночного нормированного импульса; σ — среднеквадратичное отклонение амплитуды импульсов, характеризующее их разброс около среднего значения, равного a ; 2τ — длительность стыкового импульса; ω — круговая частота; δ — дельта-функция; $r = 0, 1, 2$

Этот спектр построен на рис. 1 при длине зоны стыка 1,6 м, длине рельсового звена 25 м и скорости 100 км/час ($T = 0,9$ сек). Значения a и σ взяты для наиболее часто встречающейся 1 группы неровностей по классификации Н. Н. Кудрявцева: $a = 13$ мм и $\sigma = 5,1$ мм. Ширина спектра, примерно, равна 50 гц и растет пропорционально скорости. Следует, однако, иметь ввиду, что удар на стыке, не учитываемый предложенной аппроксимацией, является гораздо более широкополосным процессом.

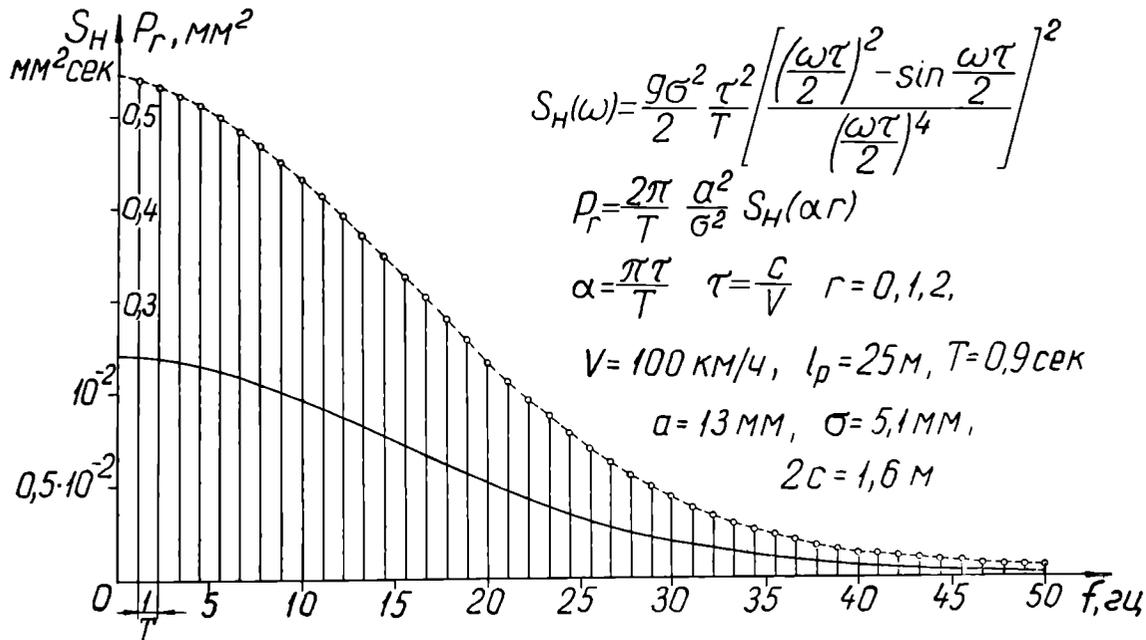


Рис. 1 Спектр последовательности стыковых импульсов

Наличие сравнительно высокочастотных колебательных систем в конструкциях подвижного состава и дискретных составляющих в спектре возмущений позволяет ожидать, что выходные спектры будут носить характер резких всплесков на фоне непрерывного спектра. Ширина всплесков частотных характеристик, вызванных, например, подпрыгиванием или галопированием кузова и рамы тележки, составляет десятки доли гц.

Во 2 главе, посвященной выбору метода и аппаратуры спектрального анализа, разработаны общие технические требования к системе спектрального анализа, с учетом которых произведена оценка различных методов определения спектральной плотности случайных процессов и существующих аппаратных решений. Технические требования разработаны, исходя из рассмотренных выше свойств анализируемых сигналов с применением выводов теории спектрального анализа стационарных случайных процессов.

В результате спектрального анализа одной реализации случайного процесса мы получаем приближенную оценку спектральной плотности, которая является случайной величиной. Для того, чтобы эта оценка была эффективной, помимо осреднения по времени, необходимо произвести осреднение по множеству реализаций, а при наличии одной лишь реализации — ввести осреднение по частоте.

При этом оценка спектральной плотности $S_1(\omega)$ определяется по формуле

$$S_1(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-T}^T K_1(\tau) D(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (4)$$

где T — длительность реализации, а $K_1(\tau)$ — оценка корреляционной функции исследуемого процесса $x(t)$, равная

$$K_1(\tau) = \frac{1}{T-|\tau|} \int_0^{T-|\tau|} x(t)x(t-|\tau|) dt \quad (5)$$

Можно показать, что введение весовой функции $D(\tau)$ равнозначно осреднению истинной функции спектральной плотности в полосе пропускания некоторого эквивалентного фильтра с частотной характеристикой $Q^1(\omega, \omega_1)$, зависящей от вида функции $D(\tau)$. Получаемую при этом разрешающую способность по частоте можно оценить эффективной шириной

полосы пропускания эквивалентного фильтра W , равной

$$W \cong \frac{\left[\int_{-\infty}^{\infty} Q(\omega) d\omega \right]^2}{2\pi \int_{-\infty}^{\infty} Q^2(\omega) d\omega} \quad (6)$$

где $Q(\omega)$ является Фурье — преобразованием весовой функции $D(\tau)$ и связано с $Q^i(\omega, \omega_i)$ выражением

$$Q^i(\omega, \omega_i) = 0,5 [Q(\omega - \omega_i) + Q(\omega + \omega_i)] \quad (7)$$

Относительное среднеквадратическое отклонение оценки $S_1(\omega)$ определяется выражением (1), в котором величина W определена по формуле (6). Отсюда следует, что при ограниченной длительности реализации T требование высокой разрешающей способности (т. е. малой W) и статистической достоверности результата анализа являются противоречивыми. Этим обусловлено стремление к максимальному увеличению времени T , которое, однако, ограничено условиями испытаний несколькими сотнями секунд. Это вызвано тем, что для приближения к условиям стационарности испытания желательно проводить на прямолинейном и однородном по строению участке пути. Поэтому система спектрального анализа должна быть достаточно гибкой, чтобы обеспечить возможность компромиссного выбора разрешающей способности.

Оценим требуемую длительность реализации. Поскольку ширина всплеска частотной характеристики, соответствующего колебаниям подпрыгивания или галопирования кузова, составляет десятые доли гц, то для того, чтобы обозначить этот всплеск несколькими точками, они должны быть взяты с интервалом не менее 0,1 гц. В общем случае разрешающая способность выбирается такой, чтобы изменения $S(\omega)$ в эффективной полосе W были достаточно малыми. Тогда, приняв $\epsilon = 20\%$, получим $T = 250$ сек.

Разрешающая способность порядка 0,1 гц, необходимая на частотах до 1,5—2 гц, может быть понижена при переходе к более высоким частотам, поскольку частотные характеристики исследуемых колебательных систем, как правило, также расширяются. Поэтому широкое распространение получил

спектральный анализ с постоянной относительной разрешающей способностью

$$C = \frac{\Delta f}{f} = const$$

В то же время спектроанализатор должен иметь возможность оперативной регулировки разрешающей способности в пределах 1,5—15%, чтобы обеспечить оптимальные условия анализа различных спектров при разной длительности анализируемых реализаций.

Что касается допустимой аппаратурной погрешности, то, учитывая неизбежную статистическую погрешность порядка 10—20%, можно считать допустимой погрешность 3—5% от измеряемой величины спектральной плотности. При этом динамический диапазон измеряемой величины должен быть не менее 100.

Требования к частотному диапазону спектроанализатора обусловлены спектральным составом исследуемых процессов. Нижняя частота диапазона должна быть меньше собственных частот экипажа и выбрана с запасом, равной 0,2 гц. Верхнюю частоту для анализа большинства процессов достаточно принять равной 200 гц. При выборе метода спектрального анализа очень важно учесть, что многие процессы имеют динамический частотный диапазон

$$D = \frac{f_{max}}{f_{min}}$$

порядка 100.

В свете изложенных требований произведена оценка известных методов спектрального анализа случайных процессов. При определении спектральной плотности по корреляционной функции весовая функция $D(\tau)$ в формуле (4) равна 1 при $|\tau| < \tau_1 \ll T$ и $D(\tau) = 0$ при $|\tau| > \tau_1$, а разрешающая способность примерно равна $\frac{1}{\tau_1}$. При разрешающей способности 0,1 гц и верхней частоте диапазона F_0 , которая определяется из условия $S(f > F_0) \approx 0$ равной 50 гц, требуемое количество точек корреляционной функции

$$A_k \approx \frac{\tau_1}{\Delta \tau} = \frac{2F_0}{\Delta f} = 1000$$

Здесь $\Delta\tau$ = шаг аргумента корреляционной функции, определяемый из условия

$$\Delta\tau \leq \frac{1}{2F_0}$$

Из известных корреляторов одни не обеспечивают требуемого количества точек, например, ЭАСП-С, у которого $A_k \leq 80$, другие не рассчитаны на требуемый диапазон изменения τ_1 и $\Delta\tau$, как, например, НК-200 и КА-1. Кроме того, получение столь большого количества точек требует много времени, а последующий переход к спектральной плотности вносит дополнительную погрешность.

Использование универсальных ЭЦВМ затрудняется в связи с большим объемом вводимой информации. Поскольку частота квантования вдвое превышает верхнюю частоту процесса F_0 , количество чисел N , представляющих анализируемую реализацию длительностью T , равно $N = 2F_0T$. При $T = 250$ сек и $F_0 = 50$ гц получим $N = 25000$, что в несколько раз превышает объем оперативных запоминающих устройств большинства ЭЦВМ. Ввод и обработка по частям увеличивает расход машинного времени.

Это обстоятельство затрудняет массовый спектральный анализ с помощью ЭЦВМ и заставляет обратиться к спектроанализаторам, использующим принцип измерения средней мощности процесса, пропущенного через узкополосный фильтр. Роль частотной характеристики эквивалентного фильтра $Q^1(\omega, \omega_1)$ здесь выполняет квадрат модуля частотной характеристики реального фильтра.

Спектроанализатор состоит из источника сигнала, перестраиваемого узкополосного фильтра (или набора фильтров), квадратора, обеспечивающего переход от амплитуды к мощности, и интегратора, осредняющего мощность сигнала на выходе фильтра в течение всей длительности анализируемой реализации T . При анализе с постоянной относительной полосой пропускания S количество точек A_c , необходимое для того, чтобы пройти динамический частотный диапазон D ,

$$\text{равно } A_c = \frac{\lg \left[\frac{D-0,5C}{1-0,5C} \right]}{\lg \left[\frac{1+0,5C}{1-0,5C} \right]} \quad (8)$$

Для диапазона 0,4 — 50 гц, необходимого при анализе динамических напряжений, при $S = 5\%$ получим $A_c = 100$ точек,

что на порядок меньше требуемого количества точек корреляционной функции ($A_k = 1000$) Это связано с тем, что величина A_k определяется максимальной требуемой разрешающей способностью 0,1 гц, необходимой для анализа низкочастотной части диапазона, а при анализе с помощью фильтра $\Delta f = 0,1$ гц только при $f = 2$ гц, а с повышением частоты пропорционально возрастает. Если возникает необходимость более подробного анализа какой-либо области в диапазоне высоких частот, то для нее S можно уменьшить. Таким образом, гибкость рассматриваемого метода позволяет существенно экономить время анализа.

Основная трудность этого метода состоит в реализации фильтра с требуемыми характеристиками в диапазоне инфранизких частот. Частотный диапазон анализаторов, применяемых в акустике, например, С5-3 и АСЧХ, начинается с 10—20 гц. Они работают с постоянной полосой пропускания и не имеют квадратора и интегратора. Инфранизкочастотные анализаторы типа СИЧ и АНЧ-26-1-65 имеют недостаточную разрешающую способность и неудовлетворительную форму частотной характеристики. Поэтому наиболее эффективным решением является реализация фильтра в виде электронной модели на операционных усилителях аналоговых ЭВМ с применением многократного ввода сигнала, воспроизводимого с магнитной пленки. Дополнительным преимуществом такого решения является возможность ускорения анализа и расширения частотного диапазона анализатора благодаря транспонированию скорости пленки. Очевидно также, что стоимость изготовления и эксплуатации такого устройства не сравнима с ЭЦВМ.

3-я глава посвящена вопросам построения широкодиапазонного спектроанализатора на базе аналоговой ЭВМ. Первый вариант такого анализатора, на котором проведена экспериментальная работа, описанная в 4 главе, был создан на базе моделирующей установки типа МПТ-9-3М. Для ввода сигнала использован высококачественный магнитофон типа МЭЗ-62. Он же используется для перезаписи исследуемых процессов с широкой 9-дорожечной пленки, применяемой для первичной записи при испытаниях, на узкую, используемую для многократного ввода сигнала в спектроанализатор. Магнитная запись производится с частотно-импульсной модуляцией (ЧИМ), обеспечивающей низкий уровень помех — менее 1%.

Основным элементом спектроанализатора является перестраиваемый узкополосный фильтр, блок-схема которого пред-

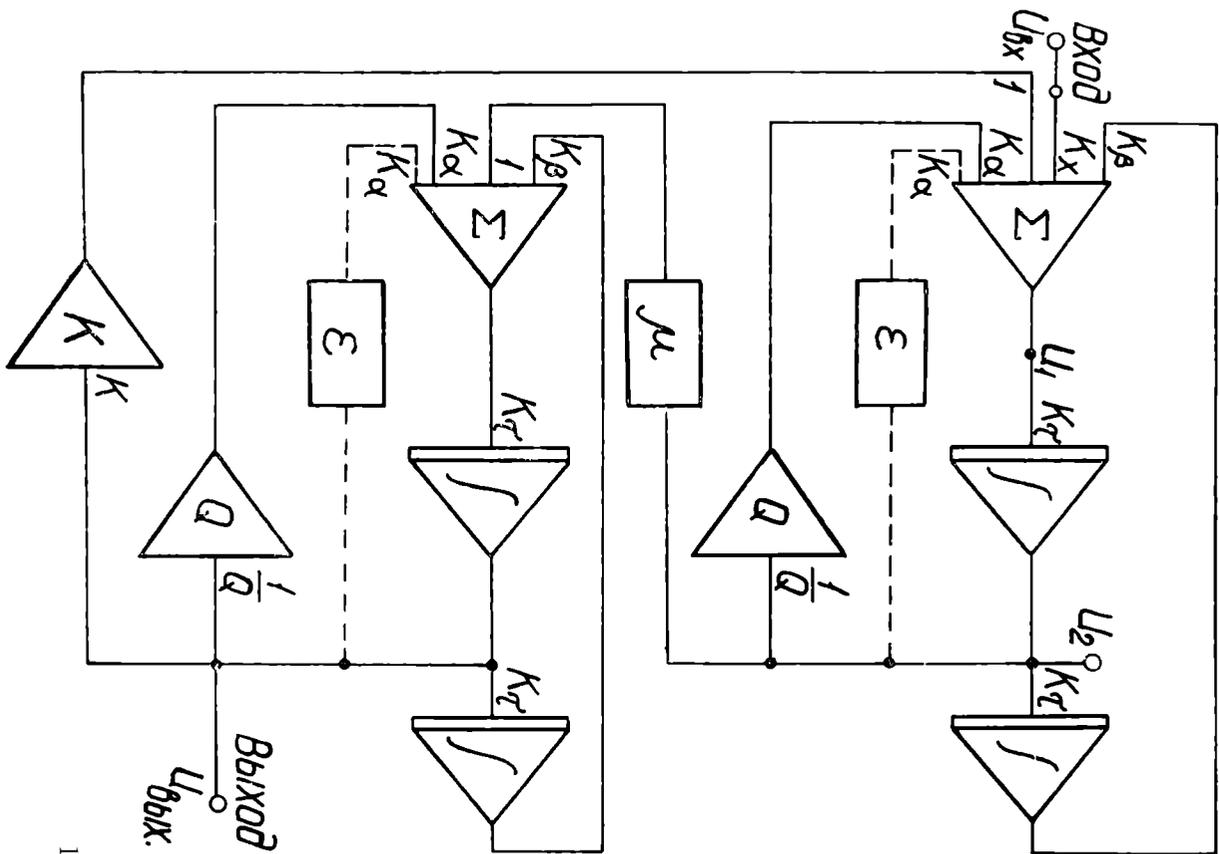


Рис. 2. Блок-схема фильтра спектроанализатора.

ставлена на рис. 2. Фильтр представляет собой электронную модель системы из двух идентичных связанных колебательных контуров. Каждый контур образован последовательным соединением сумматора и двух интеграторов, образующих замкнутую цепь. Помимо этого, в каждом контуре имеются две цепи обратной связи с выхода первого интегратора на вход сумматора — цепь компенсации ϵ и цепь Q . С помощью цепи ϵ контур доводится до порога самовозбуждения при отключенной цепи Q , после чего с помощью цепи Q вводится точно установленное затухание $\frac{1}{Q}$ определяющее полосу про-

пускания, приближенно равную
$$\Delta f \approx \frac{f_1}{Q}$$

где f_1 — частота настройки контура в гц.

Оба контура связаны между собой двумя цепями. Цепь μ служит для передачи энергии из первого контура во второй, а цепь обратной связи K имитирует реакцию второго контура на первый. Модуль частотной характеристики фильтра при критической связи между контурами ($K\mu Q^2 = 1$) равен

$$|H(\omega)| = \mu Q^2 [4 + Q^4 (\frac{\omega}{\omega_1} - \frac{\omega_1}{\omega})^2]^{-\frac{1}{2}} \quad (9)$$

Частота настройки $\omega_1 = \frac{1}{\tau_0}$ где τ_0 — постоянная времени интеграторов. Наличие двух контуров обеспечивает достаточно крутой спад частотной характеристики, а введение критической связи делает вершину ее более плоской, приближая форму частотной характеристики к прямоугольной.

Регулировка ω_1 , Q , μ и K производится с помощью типовых трехступенчатых декадных делителей. Такие же делители и усилители, включенные на входе и выходе фильтра, а также между квадратором и интегратором, обеспечивают работу всех звеньев анализатора с нормальным уровнем сигнала при изменении входного уровня от 100 мв до 100 в. Частотный диапазон анализатора (0,2—200 гц) разбит на три декады, переключение которых осуществляется с помощью емкостей интеграторов.

Полоса пропускания анализатора на уровне 0,5 по мощности согласно (9) равна

$$\Delta f = \sqrt{2} \frac{f_c}{Q} \quad (10)$$

Изменение Q в пределах от 10 до 100 обеспечивает возможность регулировки относительной полосы пропускания от 1,4% до 14%. Эффективная полоса W равна

$$W = 2,11 \frac{f_c}{Q} \quad (11)$$

В процессе анализа две соседние частоты настройки фильтра f_n и f_{n+1} выбираются так, чтобы соседние полосы W_n и W_{n+1} соприкасались, не перекрываясь. Тогда

$$\frac{f_{n+1}}{f_n} \approx \frac{Q+1}{Q-1} \quad (12)$$

В спектроанализаторе предусмотрен режим раздельной работы контуров. Это дает возможность ввести одновременно два сигнала, выделить из них колебания определенной частоты и сравнить их фазы, что во многих случаях дает возможность определить, каким видом колебаний экипажа вызван тот или иной всплеск спектральной плотности. С этой целью предусмотрена также возможность получения суммы и разности двух процессов с требуемыми масштабными коэффициентами на входе фильтра.

Аппаратурная погрешность спектроанализатора определяется точностью и стабильностью частоты настройки, полосы пропускания, коэффициента передачи, а также дрейфом нуля операционных усилителей. Применение высокоточных и стабильных сопротивлений и конденсаторов, используемых в аналоговой вычислительной технике, обеспечивает установку частоты настройки и коэффициента передачи с точностью $\pm 0,5\%$. Основную погрешность вносят частотные искажения операционных блоков, которые при определенных условиях могут существенно изменить полосу пропускания.

Предложенный метод компенсации путем введения раздельных цепей компенсации ϵ и регулировки добротности Q в каждом контуре позволяет значительно снизить эту погрешность. Как показал теоретический анализ, величину компенсирующего затухания ϵ_0 можно сделать практически независимой от частоты настройки в пределах каждого поддиапа-

зона. С этой целью в схему введена дополнительная коррекция постоянной времени входной цепи β сумматора, а также входной цепи одного из интеграторов путем включения небольших емкостей параллельно входному сопротивлению. При правильной коррекции погрешность установки Q не превышает $0,05Q\%$, следовательно, эта погрешность сказывается лишь при максимальных Q . Введение цепи компенсации ϵ и компенсирующих емкостей снижает требуемую полосу пропускания операционных усилителей на 2—3 порядка, что позволяет использовать большинство серийных аналоговых ЭВМ.

В 4-ой главе рассмотрен эксперимент по определению спектров различных процессов в моторных вагонах электропоездов ЭР-9П и ЭР-11 и разработана методика анализа полученных спектрограмм. Основная цель этого анализа заключается в том, чтобы определить, какими формами колебаний обусловлены наиболее значительные по энергии всплески спектральной плотности. Такая «расшифровка» полученных спектров является необходимым условием их использования в комплексе с другими данными для оценки испытуемой конструкции и выработки рекомендаций по ее улучшению.

В диссертации рассмотрены спектры следующих процессов:

по электропоезду ЭР-9П

датчик 144 — напряжение в кронштейне наддрессорного бруса, опирающемся на пружинный комплект центрального подвешивания,

датчик 53 — напряжение в продольной балке,
по электропоезду ЭР-11

датчик 11 — напряжение в продольной балке, возле фланца крепления рамы двигателей,

датчик 34 — напряжение в продольной балке в сечении опоры скользуна,

датчик В — напряжение, вызванное вертикальным изгибом продольной балки,

датчик Г — напряжение, вызванное горизонтальным изгибом продольной балки,

датчик П1 — вертикальное перемещение рамы тележки относительно буксы (датчик на той же продольной балке, что и П1, 34, В, Г),

датчик П3 — то же для другого конца продольной балки,

датчик П5 — вертикальное перемещение кузова относительно рамы тележки (на той же, первой тележке и на той же стороне, что П1 и П3),

датчик П6 — то же, на противоположной стороне второй тележки,

датчик П7 — поперечный относ рамы тележки относительно кузова (датчик на второй тележке, на стороне П5),

датчик У-5 — вертикальное ускорение кузова на полу вагона над пятником,

датчик У-6 — горизонтальное поперечное ускорение кузова там же.

Испытания обоих поездов проведены на участке Отрожка—Дрязги Юго-Восточной железной дороги протяженностью 81 км с однотипным строением пути: щебеночный балласт, деревянные шпалы (1630—1840 на км), рельсы Р50 длиной 25 м. Записи длительностью, в основном, около 200 сек произведены с помощью 9-канальных установок магнитной записи М-5. Перечисленные процессы были записаны в диапазоне скоростей 60—140 км/ч при шаге изменения скорости, примерно, равном 10 км/ч.

Для того, чтобы определить, какими видами колебаний вызваны спектральные всплески, важно знать соотношение фаз между прогибами пружин центрального, а также буксового подвешивания (датчики П1—П6). Наличие двух высокоизбирательных контуров в спектроанализаторе позволяет выделить из этих процессов колебания с интересующей нас частотой, даже если доля их в общей энергии процесса невелика. Фазы и амплитуды выделенных колебаний сравниваются с помощью двухлучевого осциллографа.

Поскольку эти колебания являются случайными, этот метод эффективен при явном преобладании на данной частоте какого-либо одного вида колебаний, так как в этом случае наблюдаемые колебания синфазны или противофазны при почти равных амплитудах. В других случаях лучше сравнить амплитуды или среднюю мощность суммы и разности рассматриваемых процессов, приведенных к одному масштабу. Сумму и разность можно подвергнуть спектральному анализу в широком диапазоне частот или только на нескольких определенных частотах. Такой анализ, произведенный на частотах спектральных всплесков, позволил в большинстве случаев определить, какими колебаниями они вызваны, и выявить некоторые собственные частоты.

Важную информацию дает исследование эволюции спектров в диапазоне скоростей. Анализ ряда спектров, расположенных в порядке возрастания скорости, уподобляется процессу измерения частотной характеристики, поскольку спектр

возмущений содержит дискретные составляющие, частота которых возрастает пропорционально скорости. Это — частота стыков f_{CT} , оборотов колес f_{μ} , оборотов якоря тягового двигателя f_{α} и частота шпал f_{ω} , с которой связан волнообразный износ рельсов. При длине рельсового звена $l_p = 25$ м, диаметре колес $D_{\mu} = 1050$ мм, передаточном числе редуктора $k = 3,41$ и числе шпал на км $m = 1630-1840$ получим следующие основные частоты (первые гармоники):

$$f_{CT} = 0,0111V, \quad f_{\mu} = 0,084V, \quad f_{\alpha} = 0,286V, \quad f_{\omega} = (13,153-2,511)V$$

где скорость выражается в км/ч.

На рис. 3 представлены спектры напряжения в надрессорном бруске тележки ЭР-9П, расположенные в порядке возрастания скорости. В диапазоне 80—120 км/ч видно, как вторая гармоника частоты стыков проходит полюсу галопирования кузова 2—2,5 гц. На резонансной скорости (для галопирования) 100 км/ч колебания галопирования становятся, примерно, одинаковыми по энергии с колебаниями подпрыгивания, возбуждаемыми на этой скорости только непрерывной частью спектра возмущений. При дальнейшем увеличении скорости $2f_{CT}$ выходит из полосы галопирования, а f_{CT} входит в полосу колебаний подпрыгивания (1,3—1,7 гц), которые сразу становятся доминирующими, что вызывает резкое увеличение стандарта напряжения в надрессорном бруске (рис. 3)

Заметное влияние на спектры оказывает наличие нескольких входов, возбуждаемых со сдвигом по времени, определяемым скоростью движения, базой вагона b и тележки a . Можно показать, что если вертикальное перемещение колес на стыках представить в виде ряда Фурье, то в выражениях для n -ой гармоники суммарной силы F_n , передающейся на надрессорное строение экипажа и вызывающей подпрыгивание, и суммарного момента L_n , вызывающего галопирование, наличие нескольких сдвинутых входов учитывается коэффициентами

$$K_{Fn} = \cos \frac{n\pi a}{l_p} \cos \frac{n\pi b}{l_p}, \quad K_{Ln} = \cos \frac{n\pi a}{l_p} \sin \frac{n\pi b}{l_p} \quad (13)$$

При заданных a , b и l_p коэффициенты K_{Fn} и K_{Ln} зависят только от номера гармоники n . Отсюда, в частности, следует, что при $l_p = 25$ м и $n = 2$ создаются благоприятные условия для возбуждения колебаний галопирования кузова ($K_{L2} =$

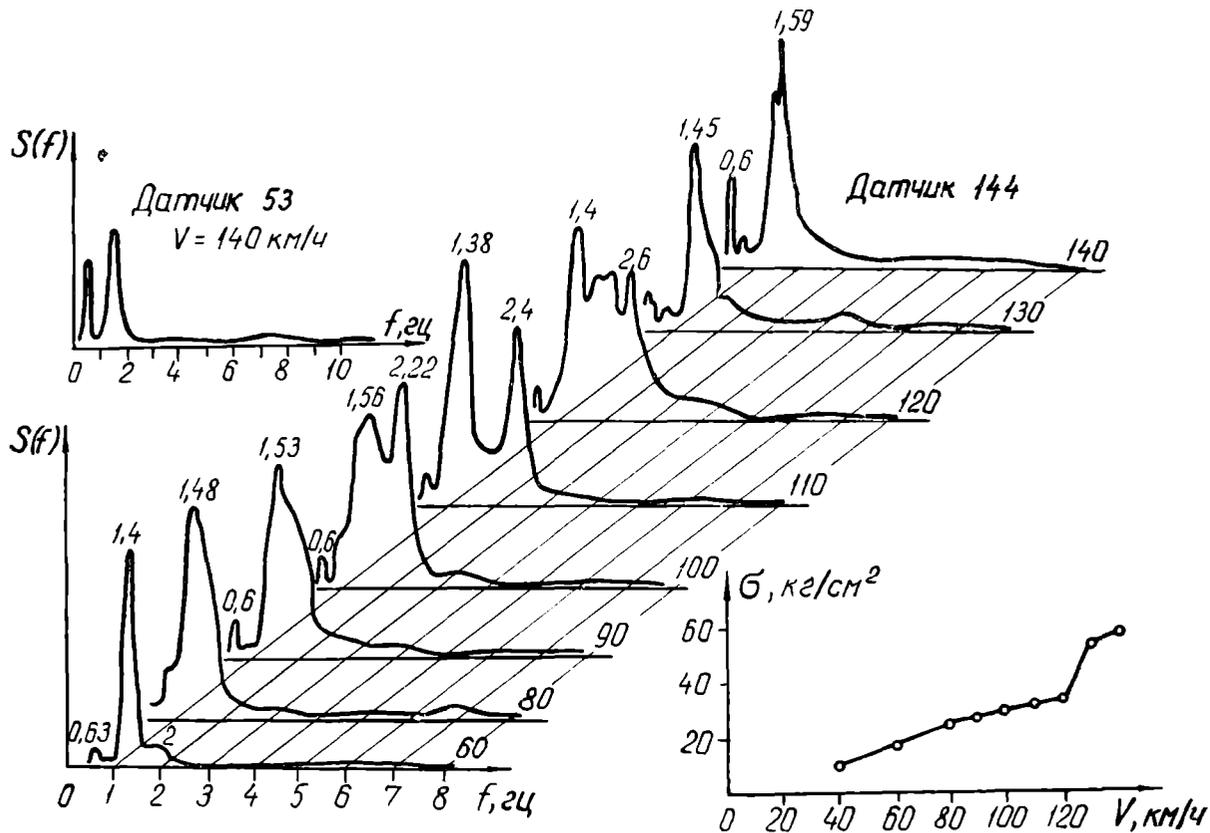


Рис. 3. Спектры напряжений в надрессорном бруске тележки электропоезда ЭР-9П.

$= 0,754$) и неблагоприятные — для подпрыгивания ($K_{F2} = 0,144$). Возбуждение интенсивных колебаний галопирования кузова второй гармоникой частоты стыков наблюдается также в спектрах ЭР-11 с той разницей, что относительная доля этих колебаний в общей энергии спектра здесь больше, чем в ЭР-9П. Поскольку для первой гармоники $K_{F1} = 0,6$ и $K_{L1} = 0,723$, можно ожидать, что при 200 км/ч колебания галопирования, возбуждаемые $f_{CT} = 2,22$ гц, станут доминирующими. Об ожидаемой их интенсивности можно приблизительно судить по энергии резонансного всплеска на 2,25 гц при 100 км/ч.

Важное значение в исследовании спектров имеет сопоставление спектров различных процессов, например, напряжений в разных сечениях, вертикальных и поперечных перемещений и ускорений. В качестве примера рассмотрим спектр напряжения в продольной балке (датчик 11) при 130—135 км/ч, представленный на рис. 4. Первый всплеск на частоте 0,7 гц вызван колебаниями боковой качки 1 рода, поскольку сигналы датчиков П5 и П6 на этой частоте противофазны и примерно равны по амплитуде, а всплеск на этой частоте в большей или меньшей степени проявляется в спектрах, как вертикальных, так и поперечных колебаний. Следующий всплеск на частоте 1,45 гц обусловлен колебаниями подпрыгивания кузова, возбуждаемыми основной частотой стыков — сигналы с П5 и П6 идут в фазе с близкими амплитудами, а всплеск на этой частоте имеется только в «вертикальных» спектрах. На частоте 2,25 гц наблюдается всплеск, вызванный галопированием кузова. Он невелик, поскольку оно возбуждается только непрерывной частью спектра возмущений. Характерно совпадение частоты этого всплеска с частотой резонансного всплеска при 100 км/ч, когда вторая гармоника частоты стыков возбуждает интенсивные колебания галопирования. Неожиданный всплеск на 3,25 гц повторяется только на «вертикальных» спектрах. Сигналы с П5 и П6 на этой частоте идут в противофазе и близки по амплитуде. Можно предположить, что этот всплеск вызван колебаниями подергивания, возбуждающими галопирование, что подтверждается расчетными частотными характеристиками перемещений кузова в продольной вертикальной плоскости.

Слабо выраженный всплеск на частоте 4,6 гц повторяется во всех спектрах напряжений в продольной балке, а также в спектрах П1, П3, П5, П6 и сильнее выражен в спектре П7. При этом колебания П1, П3 и П5 синфазны, П6 и П7 также

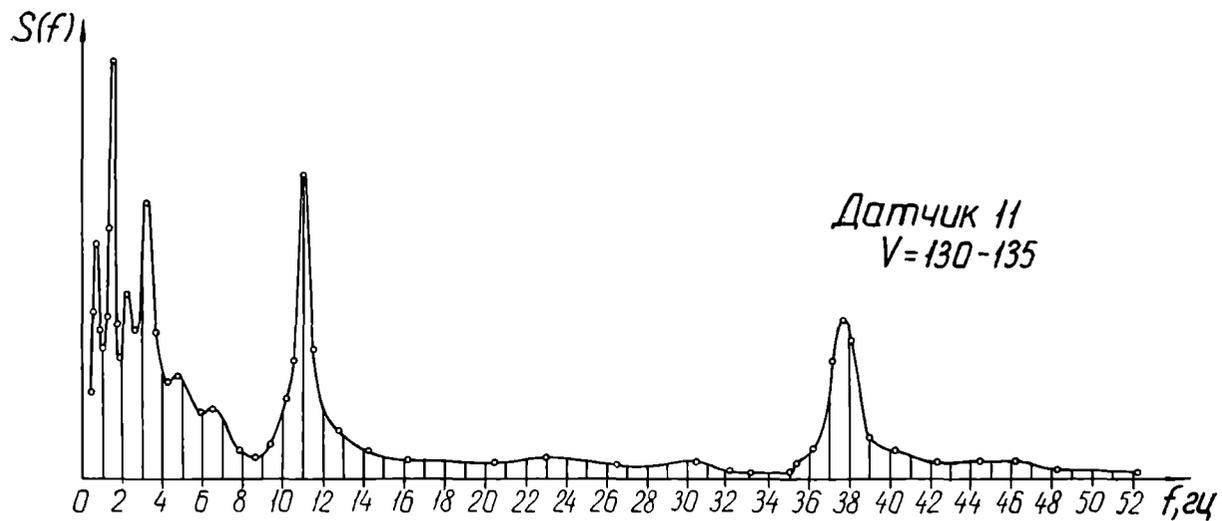


Рис 4 Спектр напряжения в продольной балке тележки электропоезда ЭР-11П

синфазны, но не связаны каким-либо определенным фазовым соотношением с П1, П3 и П5, находящимися на другой тележке. Судя по синфазности П1, П3 и П5, это — подпрыгивание или боковая качка рамы тележки. Аналогичное положение имеет место на частоте 6,7 гц, с той лишь разницей, что этот всплеск наблюдается только на «вертикальных» спектрах, в то время как первый (4,6 гц) сильнее выражен в «поперечных» спектрах. Следовательно, на 4,6 гц мы имеем боковую качку, а на 6,7 гц — подпрыгивание.

Всплеск на 11 гц характеризуется следующими особенностями. Он совпадает с частотой оборотов колес и передвигается вслед за ней с изменением скорости, в П1 и П3 он выражен слабо, в спектрах напряжений в различных сечениях продольной балки он ослабевает по мере приближения к центру, сигналы с П1 и П3 — равные и противофазные, и, наконец, эта частота является доминирующей в напряжениях в раме двигателей, прогибах резиновых пакетов, соединяющих ее с продольными балками, и в вертикальном ускорении двигателей. Все это вместе взятое позволяет считать, что источником этих колебаний является привод.

Всплеск на 38 гц совпадает с частотой оборотов якорей тяговых двигателей и передвигается вслед за ней с изменением скорости.

Изложенным способом было исследовано более 120 спектров различных процессов в электропоездах ЭР-11 и ЭР-9П, что позволило определить, какими видами колебаний вызваны спектральные всплески, и проследить изменение картины колебаний экипажа во всем диапазоне эксплуатационных скоростей.

Описанная аппаратура и методика анализа внедрена при испытаниях поездов ЭР-9П, ЭР-11, ЭР-22 и ДР-1, проведенных Рижским филиалом ВНИИ вагоностроения. Данные спектрального анализа регулярно используются для оценки характеристик испытываемых поездов и выработки рекомендаций по их улучшению. Как показывают технико-экономические расчеты, экономический эффект от внедрения спектрального анализа в РФ ВНИИВ составляет, примерно, 34,5 тыс. руб. в год.

ВЫВОДЫ

1. Спектр возмущений, действующих на колеса при движении по рельсовому пути с постоянной скоростью, состоит из непрерывной и дискретной составляющих. Непрерывный спектр обусловлен случайно распределенными неровностями пути и случайными изменениями амплитуды и ширины стыковых импульсов. Дискретный спектр обусловлен периодическим повторением стыков, а также неидеальностью колесной пары.

2. Важнейшими особенностями спектров исследуемых процессов являются широкий частотный диапазон — от десятых долей до сотен гц — и наличие узкополосных составляющих, обусловленных свойствами исследуемых динамических систем. Отсюда вытекает требование высокой разрешающей способности системы спектрального анализа — порядка 0,1 гц — и связанная с этим необходимость обработки реализаций длительностью в несколько сотен секунд для получения статистически достоверного результата.

3. Разработан спектроанализатор с перестраиваемым узкополосным фильтром на элементах серийных аналоговых ЭВМ и с устройством магнитной записи для многократного ввода сигнала с транспонированием скорости в 4 раза. Анализатор имеет диапазон 0,2—200 гц (с учетом транспонирования — 0,05—800 гц) при максимальной разрешающей способности 1,4% от частоты настройки и позволяет обработать 250-секундную реализацию за 1 час.

4. Разработан метод компенсации влияния паразитных параметров операционных блоков на полосу пропускания спектроанализатора путем введения дополнительных обратных связей, что позволяет использовать операционные усилители серийных аналоговых ЭВМ.

5. Предложен способ применения спектроанализатора для определения видов колебаний путем анализа фазовых соотношений между различными синхронно воспроизводимыми процессами на любой интересующей частоте при подавлении

остальных и спектрального анализа сумм и разностей этих процессов, взятых попарно.

6. Разработана методика исследования спектрограмм путем сопоставления спектров напряжений в различных сечениях и сравнения их со спектрами прогибов и ускорений, анализа фазовых соотношений между различными процессами, исследования эволюции спектров в диапазоне скоростей и сопоставления их с другими расчетными и экспериментальными данными об исследуемом объекте. Произведенный таким образом анализ спектров различных процессов в моторных вагонах электропоездов ЭР-9П и ЭР-11 позволил определить доминирующие виды колебаний и собственные частоты, выявить резонансные скорости и приближенно прогнозировать возникновение резонансов в неисследованном диапазоне скоростей.

7. Установлено, что спектры напряжений в надрессорном бруске и продольной балке тележки, а также спектры вертикальных перемещений кузова и рам существенно зависят от скорости. Показано, что вторая гармоника частоты стыков при длине рельсового звена 25 м возбуждает в некотором диапазоне скоростей интенсивные колебания галопирования кузова.

8. Большинство рассмотренных спектров напряжений в продольной балке, динамических прогибов пружин центрального и буксового подвешивания, а также часть спектров напряжений в надрессорном бруске являются широкополосными и лишь на отдельных скоростях в спектре явно доминирует одна частота.

**Основное содержание диссертационной работы
опубликовано в следующих статьях и изобретениях:**

1. Халупович Х. Г. Выбор метода и аппаратуры спектрального анализа случайных колебаний. Труды Рижского института инженеров гражданской авиации. Вып. 110. Рига. 1967 г.

2. Халупович Х. Г., Левенсон Г. Ф. Спектральный и корреляционный анализ при динамико-прочностных испытаниях подвижного состава. Сб. «Проектирование и производство машин». Изд. «Звайгзне». Рига. 1965 г.

3. Халупович Х. Г. Исследование спектров динамических напряжений в надрессорном брусе тележки электропоезда ЭР-9П. Труды ВНИИ вагоностроения. Вып. 7. М. 1968 г.

4. Левенсон Г. Ф., Халупович Х. Г. Широкополосный спектральный анализатор инфранизкочастотных процессов на базе аналоговой ЭВМ. Труды ВНИИ вагоностроения. Вып. 6. М. 1968 г.

5. Балтер И. И., Халупович Х. Г. — Способ амплитудного анализа динамических процессов. Авторское свидетельство № 172535 кл. 42 к от 29 VI 1965 года.

6. Балтер И. И., Халупович Х. Г. — Устройство для амплитудного анализа динамических процессов. Авторское свидетельство № 172534 кл. 42 к от 29 VI 1965 г.

7. Балтер И. И., Халупович Х. Г. — Автоматизация статистической обработки результатов динамических испытаний подвижного состава. Сб. «Транспортное машиностроение», НИИИНФОРМТЯЖМАШ, вып. 6. М. 1965 г.

8. Балтер И. И., Халупович Х. Г. — Аппаратура магнитной перезаписи для спектрального анализа динамических напряжений и ускорений в конструкциях вагонов. Сб. «Вопросы транспортного и общего машиностроения». Том 2. Изд. «Звайгзне». Рига. 1968 г.

9. Халупович Х. Г. — награжден золотой медалью ВДНХ СССР за экспонат «Аппаратура для амплитудного анализа случайных процессов». Удостоверение № 632. 1965 г.

Подписано к печати 19. XI 1968 г. ЯТ 24355. Формат
бумаги 60×84^{1/16}. Объем 1,75 печ. л. Заказ № 5382
Тираж 250 экз.

Бесплатное издание.

Отпечатано в 35-й типографии Управления полиграфической промышленности Комитета по печати при Совете Министров Латвийской ССР в г. Огре, ул. Революцияс, 31.