

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА НАГРУЖЕННОСТИ КОНСТРУКЦИЙ И ДЕТАЛЕЙ МАШИН В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ И НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ

*Белорусский национальный технический университет  
Минский автомобильный завод  
Представительство фирмы НВМ (Германия) в Республике Беларусь  
Минск, Беларусь*

В рамках научно-технического сотрудничества между Белорусским национальным техническим университетом и Минским автомобильным заводом проводятся исследования по созданию методов расчетного прогнозирования нагруженности и ресурса несущих систем автотранспортных средств завода на примере магистрального автопоезда в составе тягача МАЗ-544008 и полуприцепа МАЗ-9758. С целью получения объективной информации для проверки теоретических положений и результатов математического моделирования нагруженности несущих систем автопоезда проведена их системная экспериментальная оценка в составе магистрального автопоезда типа МАЗ-5440+МАЗ-9758, который зарекомендовал себя достаточно высокой надежностью в эксплуатации.

**Общие положения.** Важная часть разработки машин, особенно мобильных транспортных и технологических, - испытания в реальных условиях эксплуатации (на дорогах и испытательных полигонах и стендах). Использование измерительной техники в таких специфических условиях предъявляет к ней ряд нестандартных требований. Так, например, при проведении измерений должно учитываться, что над задачей будут работать различные специалисты: по подготовке транспортного средства, созданию плана и проведению испытаний, анализу и обработке результатов. При этом необходимо быть уверенным, что любое изменение установок параметров измерительного оборудования регистрируется с тем, чтобы впоследствии их можно было полностью воспроизвести. Также необходимо принять в расчет, что очень большие объемы измерительных данных должны быть быстро и просто обработаны сразу по окончании испытаний. Постоянно сокращающиеся сроки создания новых машин, увеличивающиеся технические требования к надежности, безопасности, долговечности и комфортности требуют проведения качественных, точных и быстрых измерений. Авторами за последние годы проведен ряд исследований для решения указанных задач по сокращению сроков испытаний и точности

сроков испытаний и точности расчетно-экспериментального прогнозирования долговечности несущих конструкций автомобильной техники Минского автозавода [1...4].

На Минском автомобильном заводе, например, для проведения тензометрии несущих конструкций автомобилей уже около пяти лет используется автономно работающая универсальная система сбора и обработки экспериментальных данных MGCplus фирмы НВМ (Германия) [5]. Для адаптации применения ее к условиям завода проведен ряд исследовательских работ [6...11].

**Функциональная схема и описание рассматриваемой универсальной системы сбора и обработки экспериментальных данных о нагруженности машин и конструкций** представлены в [5, 8].

**Система сбора и обработки данных** предназначена для максимальной автоматизации всего процесса эксперимента на стадиях подготовки, измерения и записи сигналов датчиков, обработки результатов. Система может выполнять различные функции, основными являются: автоматизация процесса настройки, автоматическое или полуавтоматическое управление испытательным оборудованием во время эксперимента, в том числе и системой нагружения (генераторы кривых), выбор или задание режимов работы, регистрация и вывод логических цифровых сигналов по напряжению, управление релейными контактами в различных режимах работы стендового и другого испытательного оборудования; одновременный, синхронный сбор данных по всем измерительным каналам с аналого цифровым преобразованием без мультиплексирования, цифровая фильтрация и масштабирование аналоговых сигналов по нескольким десяткам измерительных каналов до трех различных частот опроса (группировка каналов по группам), возможность динамической смены частот опроса сохранение данных на встроенном сменном носителе информации или на носителе персонального компьютера сохранение пиковых значений во внутренней памяти; энергонезависимая память настроек визуализация данных в реальном масштабе времени (библиотека объектов визуализации); анализ данных, математическая обработка результатов испытаний непосредственно после эксперимента, аппаратная аварийная сигнализация и аварийная блокировка.

**Математическая обработка данных** производится на компьютере в два основных этапа:

- с помощью программного обеспечения CATMAN, которое имеет возможности экспорта и импорта данных в ASCII, бинарном формате, Excel и др. Одним из хороших функций программного обеспечения CATMAN является то, что позволяет использовать различные типы датчиков, в том числе и не с линейными функциями, задавая либо какой-либо закон либо позволяя калибровать датчик по 32 точкам;

- с помощью программного обеспечения РЕСУСМАШ (RESURSMASH) производится схематизация исходного процесса нагружения, построение нагрузочных блоков и оценка усталостного ресурса исследуемого предположительно опасного по усталости элемента конструкции.

*Техника применения комплекса для проведения экспериментальных исследований* описана в [7...11].

*Общая структура испытаний* для целей ресурсного проектирования несущих конструкций автомобилей может быть *представлена следующими стадиями:*

- оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций с использованием метода конечных элементов и методов динамического анализа механических систем; выявление опасных по усталости элементов с учетом флуктуации полей напряжений в них;

- дорожные испытания для регистрации и анализа эксплуатационной нагруженности; по результатам производится комплексный анализ НДС для уточнения соответствия расчетных и экспериментальных значений напряжений, после чего производится соответствующее уточнение расчетных моделей и результатов экспериментов;

- стендовые испытания для регистрации, анализа и управления нагруженностью машин (например, автомобилей), конструкций, локальных моделей и образцов материалов;

- полигонные (трековые): сравнительные испытания посредством переезда через препятствия (расположенные в линию с одновременным наездом обоими колесами или диагонально с поочередным наездом колесами каждой оси); выполнение различных маневров (переставка; восьмерка; загрузка; разгрузка и т.д.).

*Объект испытаний.* Исследованиям, также подвергался автопоезд в составе автомобильного трехосного полуприцепа МАЗ-9758 (шасси УЗМ9758020000003) и тягача МАЗ-544008 (шасси УЗМ544008У0000033).

**1. Дорожные испытания для регистрации и анализа эксплуатационной нагруженности.**

*Методика дорожных испытаний.* Напряжённое состояние рам, осей, опор и других несущих конструкций оценивалось методами электротензометрирования с наклеиванием в точках, предположительно опасных с точки зрения прочности и долговечности тензорезисторов (рисунки 1 и 2). Для определения опасных зон использовались данные расчетов методом конечных элементов (в данной работе результаты не приведены). Для оценки нагруженности датчики наклеивались на: раме тягача – 26 шт. (№1-26 – рис. 1); раме полуприцепа – 33 шт. (№27-43, 46-49, 52, 53, 56-65 – рис. 2); оси полуприцепа – 3 шт. (№ 44,50 и 54 – рис. 2); опоре подвески (полурессоре) прицепа – 3шт. (№45,51 и 55 – рис. 2).

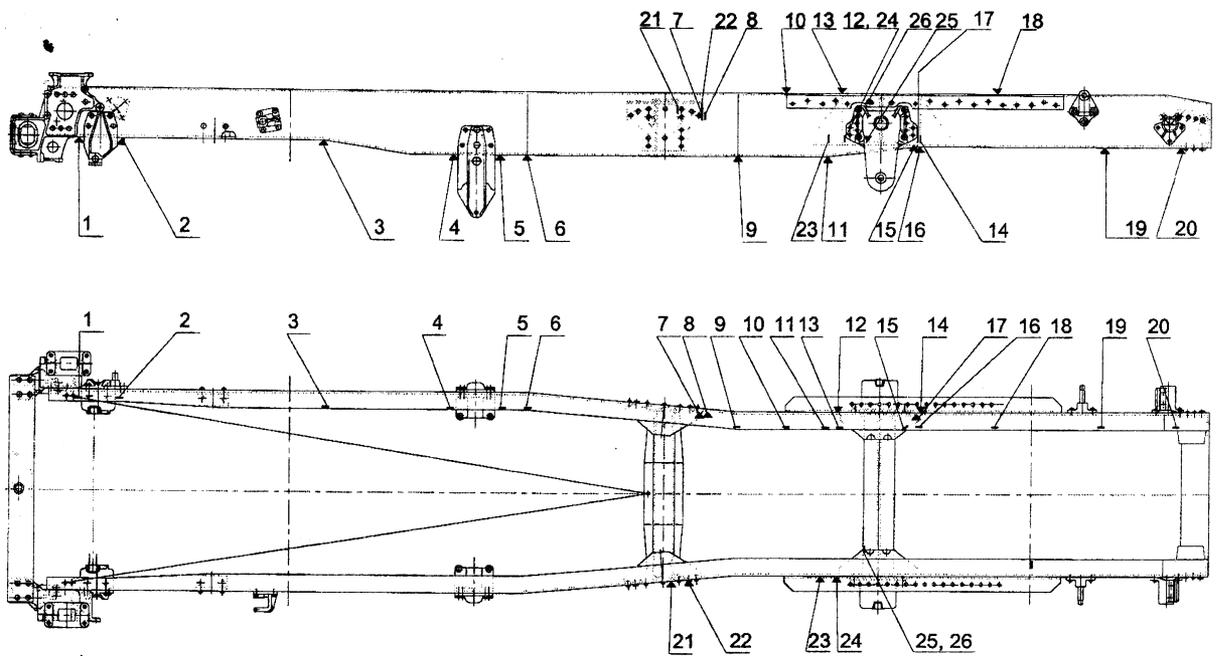


Рис. 1. Схема расположения тензодатчиков на раме тягача (№№ 1-26)

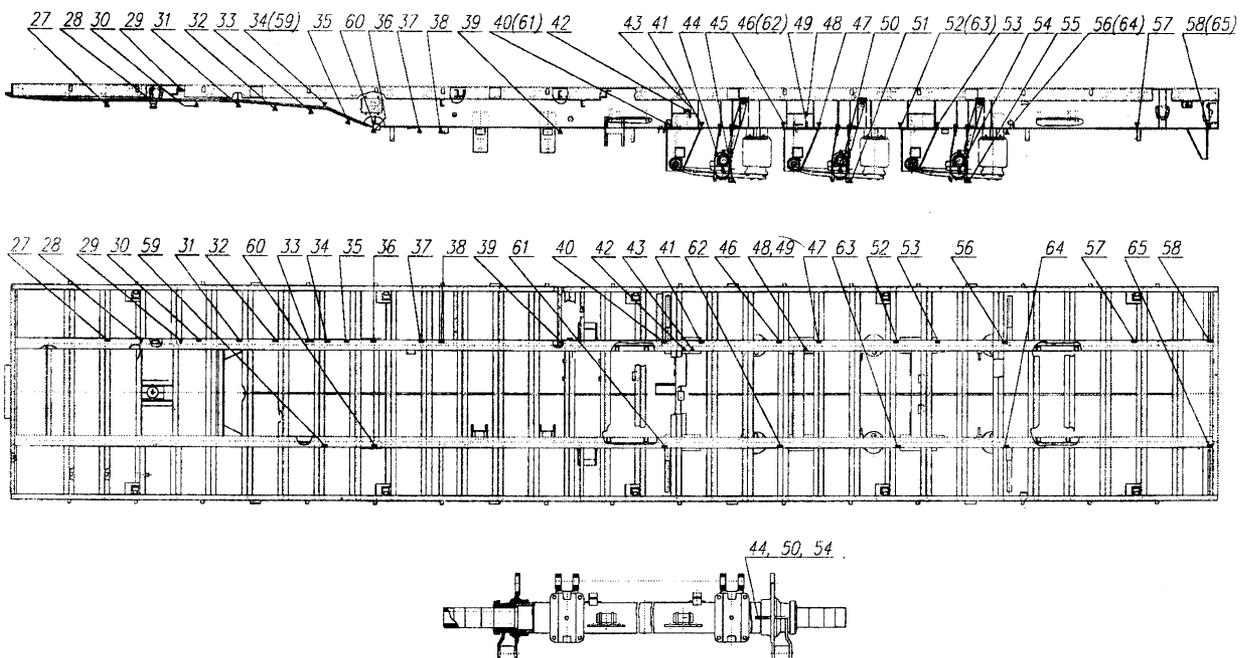


Рис. 2. Схема расположения тензодатчиков на раме (№№ 27-43, 46-49, 52, 53, 56-65), опорах подвески (№№ 45, 51 и 55) и оси (датчики №№ 44, 50, 54) полуприцепа

Напряженное состояние рамы определялось на следующих типах дорог и режимах движения в груженом и снаряженном состоянии, а также с поперечной штангой и без нее:

«разбитый асфальт» - движение по неудовлетворительному асфальтовому покрытию, скорость движения  $V=40, 50, 60$  км/ч; «ровный асфальт» – движение по усовершенствованному асфальтовому покрытию МКАД, скорость движения  $V=50, 70, 90$  км/ч; «переставка» - движение согласно требований РД 37.001.005-86 со скоростями движения  $V=40, 50, 60$  км/ч; «переезд препятствия треугольной формы» высотой 100мм: единичное препятствие под левой стороной; единичное препятствие под правой стороной; два препятствия в линию, перпендикулярно продольной оси автопоезда; два препятствия по диагонали, в продольной проекции расстояние между препятствиями соответствует базе тягача.

Статическое нагружение производилось путем равномерной загрузки полуприцепа строительными блоками весом 800-900кг. На тягаче производилось измерение статической нагрузки от веса полуприцепа и от веса балластного груза.

В ходе проведения динамических испытаний механические напряжения в элементах несущей системы определялись многоканальным измерительным усилителем MGCPlus фирмы HBM (Германия) [5, 8, 10, 11] (рис. 3).

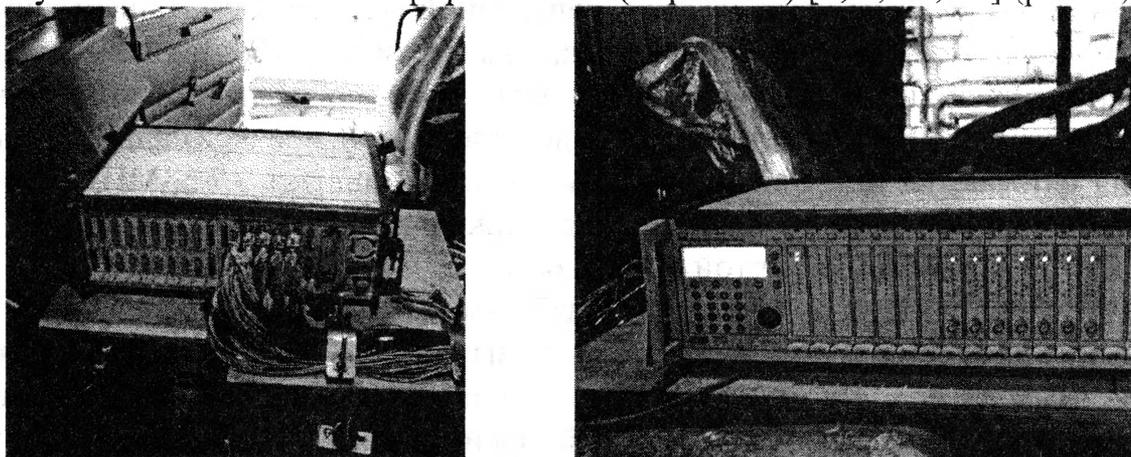


Рис. 3. Установка в кабине тягача многоканального измерительного усилителя MGCPlus

**Результаты дорожных испытаний.** Результаты динамических испытаний приведены в виде цифровых файлов на компакт-дисках, обработаны и представлены в таблицах (в виде максимальных напряжений) и на рисунках, статических – в таблицах (в виде максимальных напряжений). Приведенные в таблицах данные получены путем осреднения по трем-четырем заездам. Для тягача исследования проводились для двух конструктивных вариантов рамы: с поперечной реактивной штангой и без нее.

Пример графического представления результатов экспериментальной оценки нагруженности приведен на рис. 4 и рис. 5 для датчика №13 при

движении автопоезда с грузом по разбитому асфальту со скоростью  $V=60\text{км/ч}$  (по осям ординат -  $\sigma_i$  - текущие напряжения).

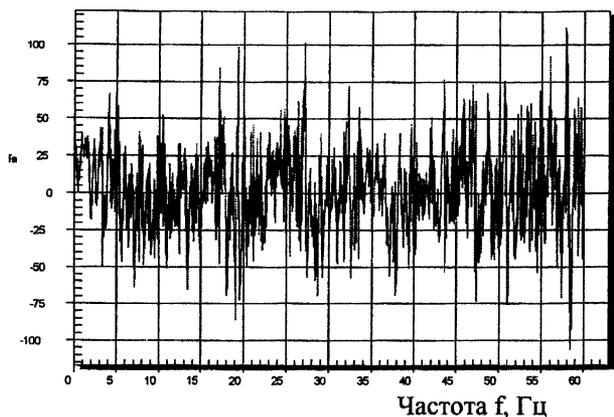


Рис. 4. Исходный процесс на датчике №13 при движении автопоезда по разбитому асфальту со скоростью  $V=60\text{км/ч}$

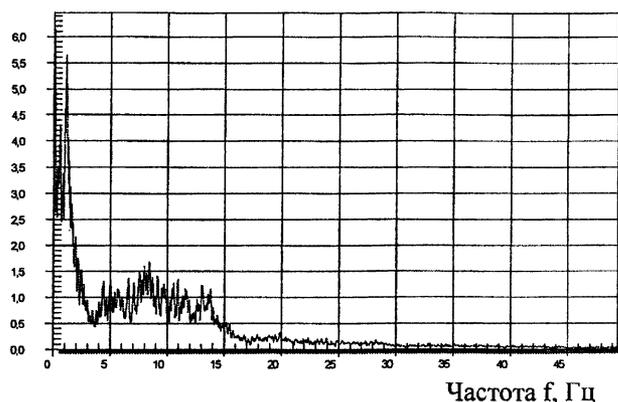


Рис. 5. Сглаженный спектр на датчике №13 при движении автопоезда по разбитому асфальту со скоростью  $V=60\text{км/ч}$

Анализ экспериментов показал, что максимальные напряжения растяжения и сжатия на раме тягача с поперечной реактивной штангой достигают при движении в режиме "переставка" на датчике №16. Данный режим движения приводит к максимальному закручиванию рамы при динамическом нагружении. При отсоединении поперечной штанги максимальные напряжения снижаются до безопасных величин и составляют 35-53МПа. Снижение напряженного состояния наблюдается также на датчиках 9, 10, 11, 14, 15, 17 и 19, т.е. в районе четвертой поперечины.

При движении в режиме "разбитый асфальт" поперечная реактивная штанга приводит к дополнительному нагружению зоны четвертой поперечины рамы тягача. Так, например, на датчике №16 падение максимальных напряжений достигло 3-4 раз. Данный режим движения в исследуемых точках не выявил сколь либо значимых напряжений на раме полуприцепа. Во всяком случае превышения предела выносливости материала лонжерона рамы полуприцепа не наблюдается.

Режим движения "ровный асфальт" является наиболее благоприятным с точки зрения напряженного состояния и долговечности несущих систем тягача и полуприцепа режимом эксплуатации. На данном режиме движения не наблюдается существенного влияния поперечной реактивной штанги на нагруженность лонжеронов рамы, кроме зоны в районе датчик №16, где наблюдается снижение максимальных напряжений до четырех раз. Данный режим не выявил наличия высоких максимальных напряжений на раме полуприцепа. На данном режиме движения не наблюдается существенного влияния поперечной реактивной штанги на нагруженность лонжеронов рамы,

кроме зоны в районе датчика №16, где наблюдается снижение максимальных напряжений более чем в два раза. Данный режим не выявил наличия высоких максимальных напряжений на раме полуприцепа.

**2. Стендовые испытания для регистрации, анализа и управления нагрузенностью машин (например, автомобиля), конструкций, локальных моделей и образцов материалов.** В качестве примеров приведено фото модернизированного и автоматизированного стенда для испытаний автомобилей с установленным на нем автомобилем-тягачом магистрального автопоезда (рис. 6).

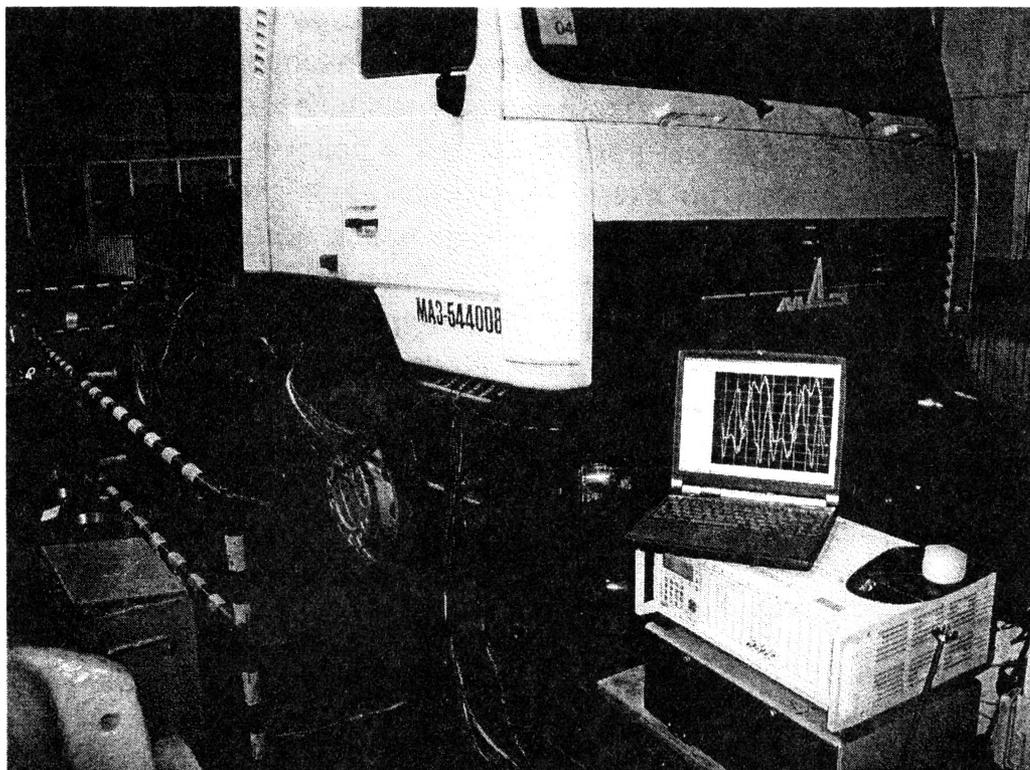


Рис. 6. Модернизированный и автоматизированный стенд-имитатор трека для испытаний автомобилей: сверху – общий вид стенда; внизу - с установленным автомобилем-тягачом магистрального автопоезда

Основные технические возможности системы: управление испытаниями в реальном времени на аппаратном уровне; выбор и динамическая смена режимов нагружения; синхронный сбор данных по всем каналам с любых типов датчиков; высокая точность и скорость опроса каналов и разрядность АЦП; возможность выбора любых алгоритмов управления; количество каналов - более 100; выбор любого типа интерфейса, включая Ethernet TCP/IP - интуитивно понятный интерфейс; визуализация данных в реальном времени; вывод на печать протокола после испытаний; аппаратная аварийная сигнали-

зация и блокировка; универсальность; архитектура - клиент-сервер; поддержка ActiveX.

**Напряженное состояние рам тягача и полуприцепа от действия статической нагрузки.** Максимальные напряжения сжатия на раме тягача при статическом нагружении возникают в зоне установки седельно-сцепного устройства (датчик №13). При статическом нагружении рамы полуприцепа и деталей подвески максимальные напряжения сжатия возникают соответственно на нижней полке лонжерона перед третьей опорой кронштейна подвески (датчик № 63) и на опорах пневмобаллона (датчики №№ 45, 51 и 55).

**Напряженное состояние несущих конструкций тягача и полуприцепа при движении автопоезда в режимах переезда через препятствие.** В качестве примеров, иллюстрирующих результаты экспериментальной оценки нагруженности несущих конструкций магистрального автопоезда приведены: на рис. 7 - исходные процессы при движении в режиме переезда через препятствие, расположенного по схеме "в линию" при скорости движения 20 км/час в зоне изменения высоты стенки лонжерона полуприцепа; на рис. 8 - исходные процессы при движении в режиме "переставка" на третьей балке оси груженого полуприцепа и на третьей полурессоре.

Рис. 7. Исходные процессы при движении в режиме переезда через препятствие, расположенного по схеме "в линию" при скорости движения 20 км/час в зоне изменения высоты стенки лонжерона полуприцепа (датчик 34): верхний график - груженный со штангой; средний график - груженный без штанги; нижний график снаряженный (без груза) со штангой.

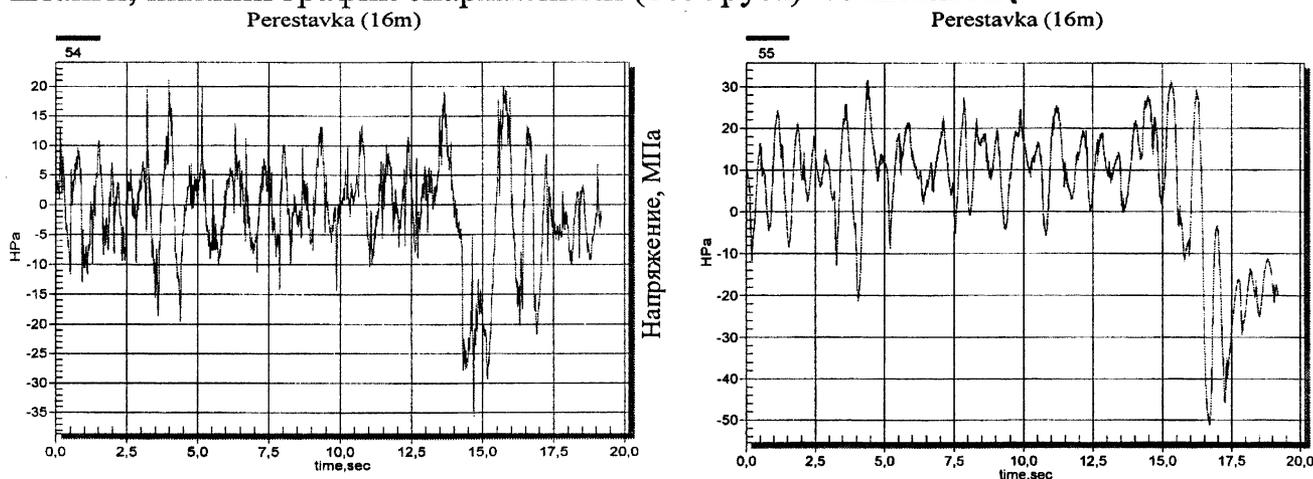


Рис. 8. Исходные процессы при движении в режиме "переставка" на третьей балке оси груженого полуприцепа (датчик 54) и на третьей полурессоре (датчик 55)

На режиме движения "переезд единичных препятствий в линию" также наблюдается закономерность снижения напряженного состояния рамы полуприцепа при отсоединении поперечной реактивной штанги (датчик 16). Данный режим наиболее нагружает опору (полурессору) подвески полуприцепа

(датчики 45, 51 и 55), особенно с увеличением скорости движения. Максимальные напряжения с учетом статической нагрузки достигают для датчика 45, для датчика 51 и для датчика 55 (материал опоры – рессорно-пружинная сталь 50ХГФА имеет следующие средневероятные характеристики: предел прочности  $\sigma_b=1422$ МПа; предел текучести  $\sigma_T=1324$ МПа; предел выносливости нижнего листа опоры в опасном по усталости сечении:  $\sigma_{-1}=275,38$  МПа,  $\sigma_0=413,07$  МПа).

Режим движения "переезд единичных препятствий по диагонали" из всех приведенных режимов является наиболее опасным, т.к. на данном режиме происходит максимальное закручивание рамы тягача. Максимальные напряжения растяжения, зафиксированы на датчике 16 при движении с поперечной реактивной штангой на скорости  $V=60$ км/ч. При отсутствии данной штанги при прочих равных условиях данное напряжение почти в 2,5 раза ниже. На раме полуприцепа максимальные напряжения возникают на нижней полке лонжерона перед креплением кронштейнов пневмоподвески (датчики 40, 46, 52, 61, 62, 63). Однако величина максимальных напряжений в данном случае не превышает 100-141МПа.

**Основные результаты и выводы.** 1. Приведены краткие сведения о применении нового аппаратно-программном комплексе MGCplus, выпускаемом фирмой НВМ (Германия) - автономно работающей универсальной системе сбора и обработки экспериментальных данных, получаемых при проведении длительных и непрерывных испытаний в современном автомобилестроении. Дан анализ измерительных возможностей системы, предложены принципы ее применения для регистрации и анализа экспериментальной информации о нагруженности конструкций при проведении дорожных и стендовых испытаний мобильных транспортных машин. Приводятся принципиальная схема автоматизации испытательного стенда и модернизированный и автоматизированный стенд-имитатор трека для испытаний автомобилей на Минском автомобильном заводе.

2. Экспериментально исследованы статическая и динамическая нагруженность несущих систем автопоезда при различных режимах эксплуатации и дорожных испытаний. Напряженное состояние лонжерона рамы в районе крепления четвертой поперечины (датчики 9, 10, 14, 15, 16, 17 и 19) при движении с задней поперечной реактивной штангой по разбитому асфальту, в режиме "переставка" и переезд единичных неровностей (т.е. режимы движения на которых происходит наибольшее закручивание рамы) значительно повышает напряженное состояние рамы по сравнению с движением автомобиля в аналогичных условиях но без реактивной штанги, например при движении груженого автомобиля со скоростью 50км/ч в режиме "переставка". Одним из вариантов снижения напряженного состояния правого лонжерона рамы за четвертой поперечиной может быть усиление данной зоны путем удлинения усилителя четвертой поперечины до пятой поперечины и увеличение прива-

лочной плоскости кронштейна крепления задней поперечной реактивной штанги. Наиболее благоприятным режимом движения для данного автопоезда является режим движения по "ровному асфальту" на скоростях, допустимых Правилами дорожного движения. Проведенные испытания не выявили значительных максимальных напряжений на раме полуприцепа. Во всяком случае, из всех исследуемых точек величины максимальных напряжений либо не превышают, либо не значительно превышают предел выносливости материала рамы без учета концентраторов напряжений. Из приведенных данных максимальные напряжения были зафиксированы перед креплением трех кронштейнов подвески и в зоне датчика №49.

3. Полученный ценный систематический экспериментальный материал может быть использован для "тестирования" имитационных статических и динамических моделей вариантов автопоезда при "отладке" их математических моделей, предназначенных для расчетного прогнозирования нагруженности несущих систем и элементов, в т.ч. – опасных по усталости, что является важнейшей структурной составляющей ресурсного проектирования несущих конструкций.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Почтенный Е.К., Капуста П.П., Горбацевич М.И., Слабко И.А. Принципы ускорения стендовых испытаний несущих конструкций мобильных машин// Материалы международной 54-й научно-технической конференции профессоров, преподавателей, научных работников и аспирантов БГПА/ Рец. Скойбеда А.Т., Капуста П.П., Почтенный Е.К. В 10 частях. – Минск, 2000. – Ч. 6. – С. 97. 2. Почтенный Е.К., Капуста П.П., Слабко И.А. Методика ускоренных испытаний при регулярном нагружении и прогнозирование эксплуатационного ресурса несущих конструкций машин// Надежность машин и технических систем// Материалы международной научно-технической конференции. В 2 т. (16 – 17 октября 2001 г., Минск)/ Под общей ред. О.В. Берестнева. – Минск: Институт технической кибернетики НАН Беларуси, 2001. – Т. 1. – С. 141 – 142. 3. Капуста П.П., Слабко И.А. Оценка сопротивления усталости рамы автомобиля по результатам натурных комплексных испытаний// Создание и применение высокоэффективных наукоемких ресурсосберегающих технологий, машин и комплексов: Материалы междунар. науч.-техн. конф.: Могилев, МГТУ, 2001., с. 221 – 222. 4. Капуста П.П., Слабко И.А. Методика комплексного расчетно-экспериментального анализа сопротивления усталости рамных конструкций автомобилей// Сб. Программа международной научно-технической конференции: рефераты докладов. В 2 томах. Том 1 / Под ред. Б.М. Хрусталева. – Мн.: УП "Технопринт", 2001. – С. 91. 5. Информационные материалы Фирмы НВМ (Германия): Универсальный измерительный усилитель MGCplus как автономно работающая система сбора

и обработки данных. 6. Почтенный Е.К., Кадолко Л.И., Горбацевич М.И., Капуста П.П., Минюкович С.М. Ускоренные испытания рамы автомобиля// Автомобильная промышленность. –1998. - № 7. - С. 25-26. 7. Капуста П.П., Слабко И.А., Махнач В.Г. Моделирование, испытания и прогнозирование ресурса осей автотранспортных средств// Современные методы проектирования машин. Расчет, конструирование и технология изготовления. Сборник научных трудов. В 3 томах. Т. 2 / Под общ. ред. П.А. Витязя. – Мн.: УП “Техно-принт”, 2002. – С. 391-397. 8. Капуста П.П., Слабко И.А. Аппаратно-программный комплекс для оценки эксплуатационной нагруженности несущих конструкций// Современные методы проектирования машин. Вып. 2. В 7 томах. - Т. 6. Автоматизация проектирования и информационные технологии. - Мн., 2004. - С. 47-56. 9. Капуста П.П., Вихренко Д.В., Слабко И.А. Моделирование нагруженности и разрушения клепаных рамных автомобильных конструкций// Современные методы проектирования машин. Вып. 2. В 7 томах. - Т. 6. Автоматизация проектирования и информационные технологии. - Мн., 2004. - С. 56-64. 10. Капуста П.П., Слабко И.А., Вихренко Д.В. Методика экспериментального прогнозирования ресурса автомобильных несущих конструкций// Современные методы проектирования машин. Вып. 2. В 7 томах. - Т. 4. Надежность и ресурсное проектирование машин. - Мн., 2004. - С. 85 – 88. 11. Капуста П.П., Слабко И.А., Рубцов А.В. Системная экспериментальная оценка эксплуатационной нагруженности несущих конструкций магистрального автопоезда// Современные методы проектирования машин. Вып. 2. В 7 томах. - Т. 4. Надежность и ресурсное проектирование машин. - Мн., 2004. - С. 88 – 94.

УДК 62.82.001.63

Горошко В.Ф., Леневиц В.П.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОПРИВОДА ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь*

При проектировании станков возникает необходимость в анализе статистики и динамики системы с целью получения требуемых характеристик, обеспечивающих высокое качество оборудования. Выполнить это можно только при наличии математической модели.