



УДК 004.358

**Я. С. Ватулин, С. К. Коровин, М. С. Коровина,
С. В. Орлов, Д. А. Потахов, Е. А. Потахов**

БЕЗОПАСНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МОБИЛЬНЫХ ПОДЪЁМНИКОВ С РАБОЧИМИ ПЛАТФОРМАМИ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ НАТУРНЫХ И ВИРТУАЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Дата поступления: 03.03.2016

Решение о публикации: 12.05.2016

Цель: Обосновать применение методики виртуального моделирования нарушений работоспособного состояния мобильных подъёмников с рабочими платформами (МППП) с целью обеспечения их безопасной эксплуатации. **Методы:** Совместное использование микроэлектромеханических систем (МЭМС – MEMS), прикладных модулей SolidWorks Simulation, SolidWorks Motion и матричной математической системы MATLAB. **Результаты:** Предложена методика моделирования нарушений работоспособного состояния МППП. Сравнение результатов виртуального моделирования некоторых дефектов на подъёмнике ВС-22-МС и натуральных экспериментов с применением MEMS-акселерометров показало, что их расхождение не превышает 7,1–9,2%. **Практическая значимость:** Благодаря виртуальному моделированию сокращается стоимость и упрощаются исследования причин возникновения дефектов МППП. Предлагаемая методика позволяет определить некоторые дефекты конструкции.

Мобильный подъёмник, рабочая платформа, МЭМС-акселерометр, прикладной модуль, SolidWorks Simulation, SolidWorks Motion, матричная математическая система MATLAB, статический анализ, модальный анализ, вейвлет-преобразование.

Yan S. Vatulin, Cand. Eng., assistant professor, department chair, yan-roos@yandex.ru; ***Sergey K. Korovin**, Cand. Eng., assistant professor, big-bernar@yandex.ru; **Mariya S. Korovina**, assistant lecturer, pgups2013@yandex.ru; **Sergey V. Orlov**, Cand. Eng., assistant professor, orlov@spbmuseum.ru; **Denis A. Potakhov**, student, schan-di@mail.ru; **Yegor A. Potakhov**, student, schan-di@mail.ru, (Petersburg State Transport University) SAFE OPERATION OF MOBILE ELEVATING WORK PLATFORMS ON THE BASIS OF RESULTS OF FULL-SCALE AND VIRTUAL EXPERIMENTS

Objective: To justify application of the method of virtual modelling of mobile elevating work platforms' operational condition disturbance to ensure their safe operation. **Methods:** Joint application of microelectromechanical systems (MEMS), SolidWorks Simulation and SolidWorks Motion application modules, and MATLAB matrix mathematical system. **Results:** A method for simulation of operational condition disturbances of mobile elevating work platforms is proposed. A comparison of results of virtual simulation of some defects on VS-22-MS elevating platform and full-scale experiments in which MEMS accelerometers were used indicated that the discrepancies do not exceed 7.1 to 9.2 per cent. **Practical importance:** Virtual simulation allows to cut expenses and simplify study into causes of defects of mobile elevating work platforms. The proposed method allows to identify some constructive defects.

Mobile elevator, work platform, MEMS accelerometers, application module, SolidWorks Simulation, SolidWorks Motion, MATLAB matrix mathematical system, static analysis, modal analysis, wavelet decomposition.

Выявление дефектов мобильных подъёмников с рабочими платформами (МПП), согласно ГОСТ 53037-2013, связано с контролем большого количества параметров [3, 4]. В некоторых руководящих документах по грузоподъёмным машинам приведены наиболее вероятные повреждения металлоконструкций и предельные допустимые значения повреждений или дефектов изготовления (Приложение 15 РД 10-112-2-09) [14, с. 63], предельные отклонения параметров подъёмников (вышек) [15, с. 21]. К сожалению, большинство таких документов либо отменены [15], либо имеют статус организационно-ограниченного применения [14]. При техническом обслуживании и ремонте эксплуатируемых в организациях МПП обычно пользуются инструкциями по эксплуатации, в которых перечень контролируемых параметров МПП ограничен [5, 16, 17]. Одним из путей повышения достоверности оценок состояния МПП, расширения перечня параметров и их уточнения в условиях эксплуатации является применение сравнительных результатов натуральных и модельных экспериментов. В предлагаемой работе оценивалась сходимость натуральных экспериментов с использованием микроэлектромеханических систем (МЭМС) и результатов моделирования на основе совместного применения прикладных модулей SolidWorks Simulation, SolidWorks Motion и матричной математической системы MATLAB [6, 10, 13]. В качестве МПП рассматривался автомобильный гидравлический подъёмник с шарнирно-сочленённой стрелой ВС-22-МС, а контролируемые параметрами являлись компоненты вектора линейного перемещения, полученные в результате двойного интегрирования данных с МЭМС акселерометров и с виртуальных датчиков линейных перемещений в прикладных модулях SolidWorks [1, 2].

Методика применения МЭМС-акселерометра

При проведении экспериментальных исследований использовалась МЭМС LSM303 DLHC. Акселерометр в МЭМС LSM303DLHC имеет четыре диапазона измерений линейных ускорений g с разными значениями минимального ускорения в младшем значащем бите (mg/LSB): $\pm 2g$ ($1mg/LSB$); $\pm 4g$ ($2mg/LSB$); $\pm 8g$ ($4mg/LSB$); $\pm 16g$ ($12mg/LSB$). Кроме того, в режиме низкого энергопотребления пропускная способность (полоса частот) равна $1/2$ частоты выходных данных при времени включения 1 мс, а в режиме нормального энергопотребления (гарантированного высокого разрешения) – $1/9$ частоты выходных данных при времени включения, равном 7 частотам выходных данных, мс. Ток потребления в режиме сна 1 μA , в режиме нормального энергопотребления – 110 μA (частота выходных данных 50 Гц, напряжение питания $2,16$ – $3,6$ В). Ток потребления возрастает с увеличением частоты выходных данных [17]. Регистры МЭМС LSM303DLHC позволяли изменять режим энергопотребления при разной частоте выходных данных и настройку конфигурации высокочастотного фильтра, использовать два независимых прерывания и четыре диапазона ускорения, четыре режима буфера FIFO, два конфигурационных регистра для источника прерываний по высокому или низкому уровню ускорений по каждой координате, а также устанавливать величину порогов, максимальную и минимальную распознаваемую длительность события прерывания, включение однократного или двойного порога с настройкой интервала времени между ними, времени падения ускорения по соответствующей оси координат [18].

МЭМС LSM303DLHC может измерять постоянные ускорения, запоминать выходное

значение сенсора (ось направлена к центру Земли) и выходное значение сенсора после поворота оси на 180° (ось направлена в небо). В результате к акселерометру будет приложено ускорение, равное $\pm 1g$. Реальную чувствительность акселерометра МЭМС LSM303DLHC можно получить, вычтя большее значение из меньшего и разделив полученную разность пополам. Это значение почти не зависит от температуры и времени. Уровень смещения нуля описывает отклонение выдаваемого

сигнала от идеального в условиях отсутствия ускорения МЭМС LSM303DLHC. В стабильном состоянии на горизонтальной поверхности акселерометр измеряет $0g$ по оси X, $0g$ по оси Y и $1g$ по оси Z.

Автогидроподъемник ВС-22-МС (рис. 1) предназначен для подъема рабочих с инструментом и приспособлениями для строительномонтажных или ремонтных работ. В соответствии с рекомендациями [15] расчётные положения подъемника представлены на рис. 2.

а



б

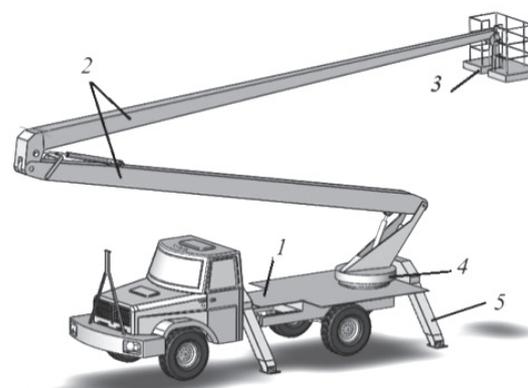


Рис. 1. Автогидроподъемник ВС-22-МС:
а) общий вид; б) схема; 1 – автомобиль; 2 – шарнирно сочленённая стрела; 3 – люлька; 4 – рама; 5 – выдвижная опора

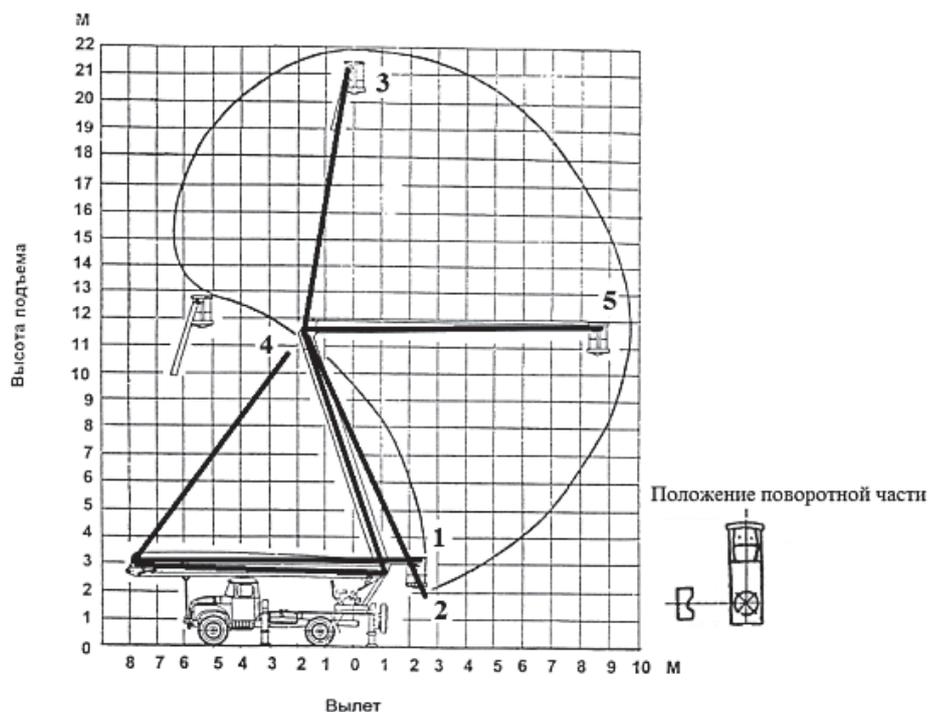


Рис. 2. Расчётные положения подъемника

Все дальнейшие исследования производили для положения 5.

На первом этапе исследований определяли сходимость результатов статического анализа и данных с МЭМС-акселерометров после их двойного интегрирования. В качестве оцениваемого параметра рассматривали прогибы отдельных составных частей шарнирно сочленённой стрелы под действием собственного веса. Напряженно-деформированное состояние шарнирно сочленённой стрелы приведено на рис. 3. Каждая последующая точка являлась опорной относительно предыдущей: самая удаленная точка 1; точка 2 – опорная относительно 1; точка 3 – опорная относительно 2; точка 4 – опорная относительно 3 (табл. 1).

Реконструкция пространственного портрета шарнирно сочленённой стрелы

По результатам измерения, полученным с помощью трёхкомпонентных акселерометров,

реконструировали пространственный портрет шарнирно сочленённой стрелы. Портрет представляет собой визуализацию НДС конструкции, сформированную на основе показаний датчиков, зафиксированных в её критических точках. Портрет позволяет оценить параметры упругих деформаций во всем диапазоне эксплуатационных режимов и внешних механических воздействий: любое изменение геометрических параметров или прочностных свойств вызывает изменение мод колебаний конструкции и как следствие – изменение портрета. Таким образом, можно прогнозировать эксплуатационные и прочностные свойства шарнирно сочленённой стрелы.

Чтобы составить достоверный портрет шарнирно сочленённой стрелы, необходимо установить акселерометры в местах, наиболее подверженных разрушению. Расположение этих мест не всегда очевидно без предварительных расчетов.

Одним из способов определения мест установки акселерометров является модели-

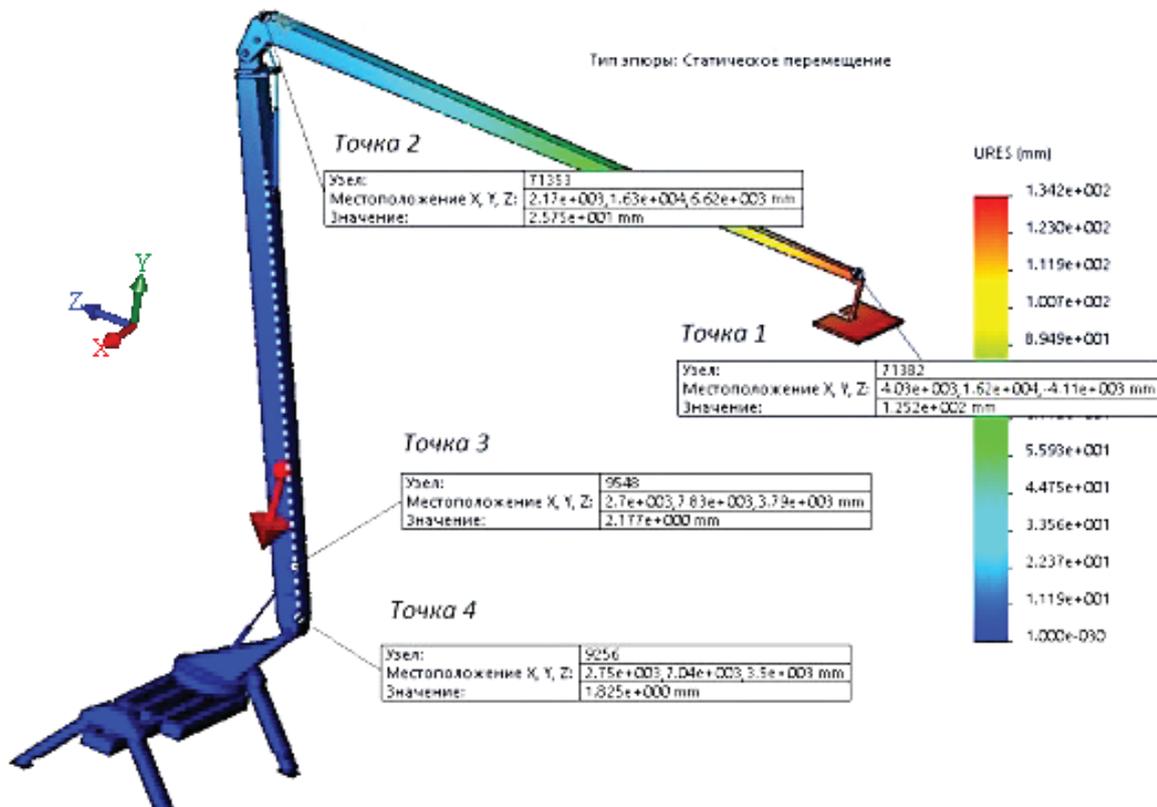


Рис. 3. Напряженно-деформированное состояние шарнирно сочленённой стрелы

ТАБЛИЦА 1. Результаты исследований

| № точки | Перемещения, мм | |
|---------|-----------------|-------|
| | Моделирование | МЭМС |
| 1 | 125,2 | 125,4 |
| 2 | 25,6 | 25,5 |
| 3 | 2,2 | 2,4 |
| 4 | 1,8 | 1,6 |

рование поведения исследуемой конструкции под воздействием внешних нагрузок с помощью расчетного модуля Simulation в программной среде SolidWorks. SolidWorks Simulation использовалась для получения данных напряженно-деформированного состояния составных частей шарнирно сочленённой стрелы.

Модальный анализ шарнирно сочленённой стрелы

В процессе моделирования собственные частоты и формы колебаний определяли на основании модального анализа, выполненного в SolidWorks Motion. SolidWorks Motion применяли, чтобы получить значения кинематических параметров взаимодействия составных частей шарнирно сочленённой стрелы между собой. Частотный анализ выполняли для определения собственных частот колебаний. Как известно, каждая частота собственных колебаний имеет определенную форму, или моду, колебаний. При модальном анализе использовался метод блочной итерации подпространств [9]:

$$K\vec{N} - \lambda B\vec{N} = 0,$$

где K – матрица жёсткости конструкции; \vec{N} – собственный вектор; λ – собственное значение; $B = M$ – матрица массы в случае динамического анализа; в остальных случаях $B = Ks$ (Ks – матрица напряжения-жёсткости, создаваемая линеаризацией соответствующего нелинейно-

го оператора при решении задачи устойчивости).

Метод блочной итерации подпространства заключался в синхронных итерациях вектора в подпространстве заданного измерения. Каждый вектор, для которого завершён процесс сходимости итераций, удаляли из рабочего подпространства и на его место добавляли новый начальный вектор. Ортогональность векторов обеспечивалась на каждом шаге итераций. Применяли следующий критерий сходимости:

$$\left| \frac{\lambda_i^{k+1} - \lambda_i^k}{\lambda_i^k} \right| < tol,$$

где i, k – число форм и число шагов итераций, соответственно; tol – допуск, заданный в поле «Допуск».

Результаты модального анализа и анализа устойчивости [8] определяли с заданной точностью по формуле [9]:

$$\mu = \frac{\|\vec{N}_i - \lambda_i K^{-1} B \vec{N}_i\|}{\|\vec{N}_i\|}.$$

При медленном процессе сходимости применяли процедуру сдвига:

$$K_\sigma \vec{N} - \lambda B \vec{N} = 0,$$

где $K_\sigma = K - \sigma M$ (σ – значение сдвига).

По результатам модального анализа, выполненного в SolidWorks Motion, произвели предварительную настройку программ-

руемого фильтра МЭМС LSM303DLHC [17]. Известно, что основная энергия колебаний распространяется на низких частотах. Однако при исследовании МППП трудно предварительно определить полосу фильтрующих частот без предварительных исследований. Поскольку фильтр «отбирает» только определенный участок из всего диапазона частот, он может «срезать» некоторые значимые возмущения. Высокочастотный фильтр сохраняет более высокие частоты выходных данных акселерометра за счёт ослабления более низких частот. Начальная частота выходного сигнала, ниже которой начинается ослабление, является частотой среза. Частоту среза высокочастотного фильтра (по уровню -3dB) определяли по формуле [19]

$$f_{\text{cutoff}} = \frac{0,318 \cdot \text{ODRx}}{H_{\text{pc}} \cdot 2},$$

где ODRx – частота выходных данных в текущей настройке акселерометра МЭМС; H_{pc} – коэффициент, используемый для расчета частоты среза высокочастотного фильтра (по уровню -3dB).

H_{pc} принимал значения 512, 1024, 2048, 4096. Уровень -3dB соответствует частоте среза, где волновой сигнал ослабляется до половины исходной мощности. Мощность волнового сигнала вычисляли как его амплитуду в квадрате, а частота среза определяла ослабление волнового сигнала до половины исходной мощности. Амплитуда ускорения акселерометра на частоте среза по уровню -3dB ослаблялась до 70,7% от значения, полученного в обход фильтра, а мощность – до половины.

Значения f_{cutoff} определяли для следующих частот выходных данных: 1; 10; 25; 50; 100; 200; 400; 1620; 1344 и 5376 Гц.

Расчетные случаи, соответствующие порядковым номерам мод колебаний, приведены в табл. 2. Графические результаты анализа второй формы колебаний шарнирно сочлененной стрелы при переходе из положения 1 в положение 2 и обратно даны на рис. 4, а эпюра ускорений, представляющая интенсивность и направление колебательных процессов, – на рис. 5.

Модальный анализ выполняли, чтобы определить численные значения деформаций по координатам X , Y , Z . В результате установлены коэффициенты массового участия (модальные массы) для каждой собственной частоты. В табл. 3 представлены коэффициенты массового участия (модальные массы) в глобальных направлениях X , Y и Z , нормализованных относительно общей массы.

Определение коэффициентов массового участия

Коэффициенты массового участия позволяют оценить значимость моды. Эти коэффициенты представляют процент массы системы, задействованной в конкретной моде. Чем ближе к единице коэффициент, соответствующий некоторому направлению, тем большая доля массы системы участвует в колебании в соответствии с некоторой формой в этом направлении. Он предоставляет меру энергии колебаний, заключенной в каждой моде.

ТАБЛИЦА 2. Расчетные случаи для порядковых номеров мод колебаний

| Расчетный случай | Частотный (Рад/с) | Частотный (Гц) | Период (с) |
|------------------|-------------------|----------------|------------|
| 1 | 5,09 | 0,81 | 1,23 |
| 2 | 7,58 | 1,20 | 0,83 |
| 3 | 8,16 | 1,30 | 0,77 |
| 4 | 14,38 | 2,29 | 0,44 |
| 5 | 19,48 | 3,10 | 0,32 |

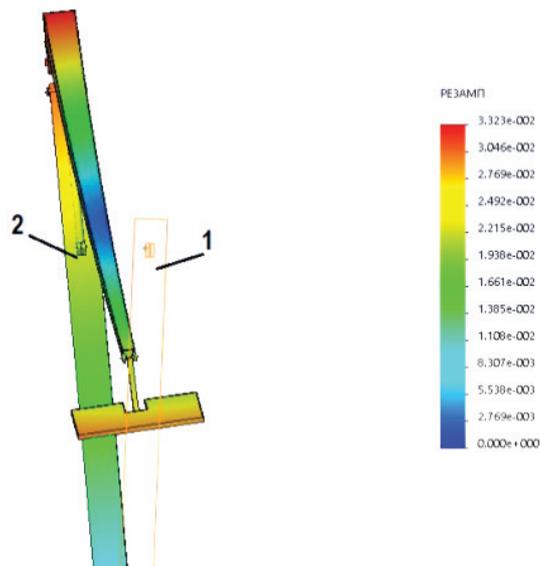


Рис. 4. Вторая форма колебаний (переход элемента конструкции из положения 1 в положение 2 и обратно)

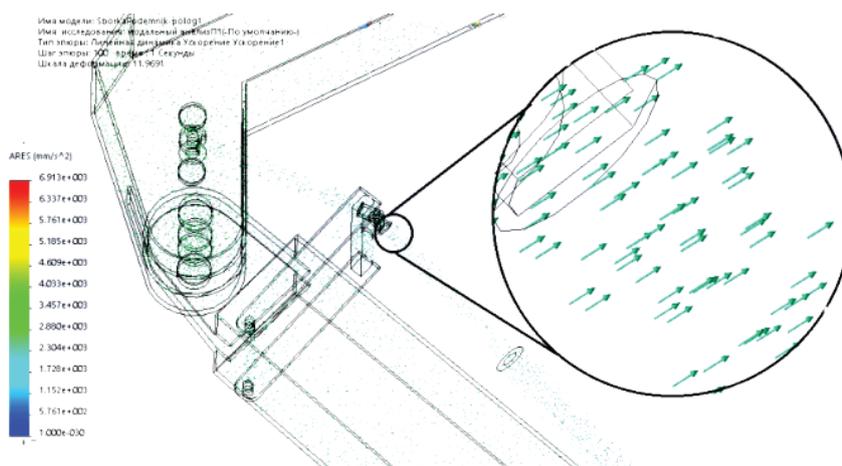


Рис. 5. Эпюра ускорений, представляющая интенсивность и направление колебательных процессов

ТАБЛИЦА 3. Коэффициенты массового участия

| Расчетный случай | Частота (Гц) | Направление X | Направление Y | Направление Z |
|------------------|--------------|----------------------|-----------------------|----------------------|
| 1 | 0,81082 | 0,19175 | 4,131e-007 | 0,025411 |
| 2 | 1,2063 | 0,080204 | 0,00063012 | 0,0030397 |
| 3 | 1,2985 | 0,00059726 | 0,032928 | 0,10141 |
| 4 | 2,2883 | 7,7439e-006 | 0,048308 | 0,24301 |
| 5 | 3,101 | 0,09649 | 0,0040028 | 0,2507 |
| | | Сумма по X = 0,36905 | Сумма по Y = 0,085869 | Сумма по Z = 0,62358 |

SolidWorks Motion рассматривает шарнирно сочленённую стрелу в виде группы недеформируемых элементов, результаты кинематического анализа которой в значительной степени отличаются от данных натурального эксперимента. Для уточнения результатов моделирования в расчётную схему вводили фиктивные шарниры с условными пружинами и демпфером, позволяющие создать имитацию деформации звеньев, влияющей на колебательный процесс (рис. 6, 7).

Результаты, полученные в SolidWorks Simulation, позволяют настроить жёсткостные

параметры фиктивных шарниров (рис. 8). Для выявления картины колебаний в схему вводили виртуальные датчики линейных перемещений, которые устанавливаются в точках 1 и 3 относительно точек 2 и 4. По ним определяли перемещение элементов шарнирно сочленённой стрелы и подбирали свойства фиктивного шарнира – коэффициент упругости пружины и постоянную демпфирования – такими, чтобы перемещения (во всех проекциях) и формы колебаний в точке установки датчиков в SolidWorks Simulation и Motion Analysis совпадали.

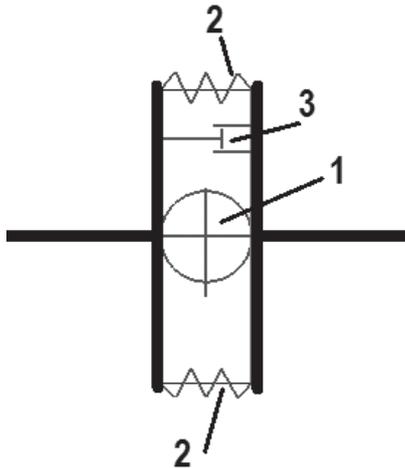


Рис. 6. Схема фиктивного шарнира:
1 – фиктивный шарнир; 2 – пружина;
3 – демпфер

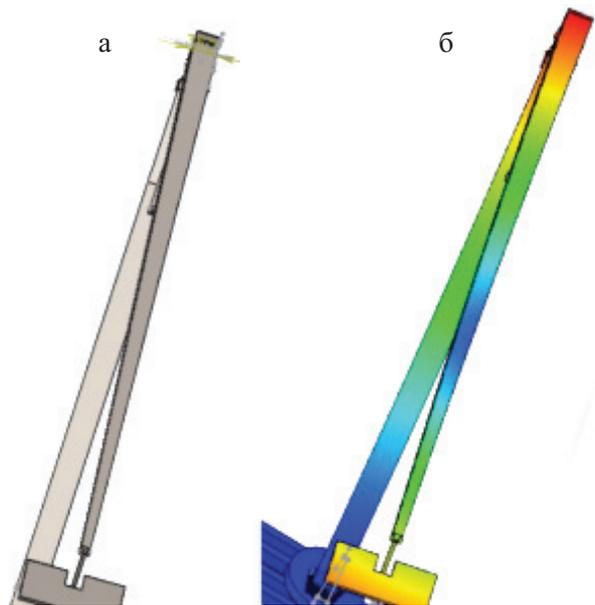


Рис. 7. Результаты модального анализа колена шарнирно сочленённой стрелы с фиктивным шарниром (а) и без него (б)

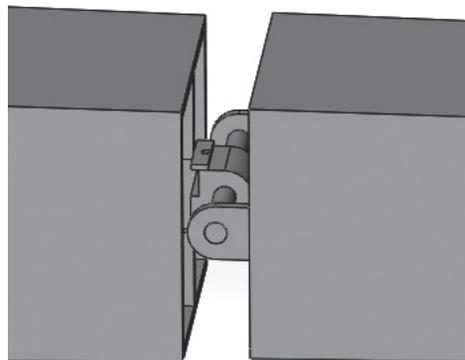


Рис. 8. Общий вид виртуального шарнира

Методика контроля резонансных частот

Методика контроля резонансных частот при заданной форме изгиба поясняется на рис. 9. Пример перемещения точки 1 относительно точки 2 по осям X, Y, Z представлен на рис. 10.

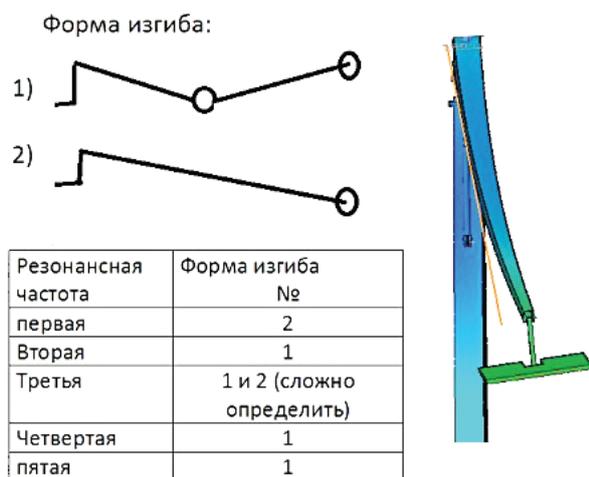


Рис. 9. Методика контроля резонансных частот по осям X, Y, Z

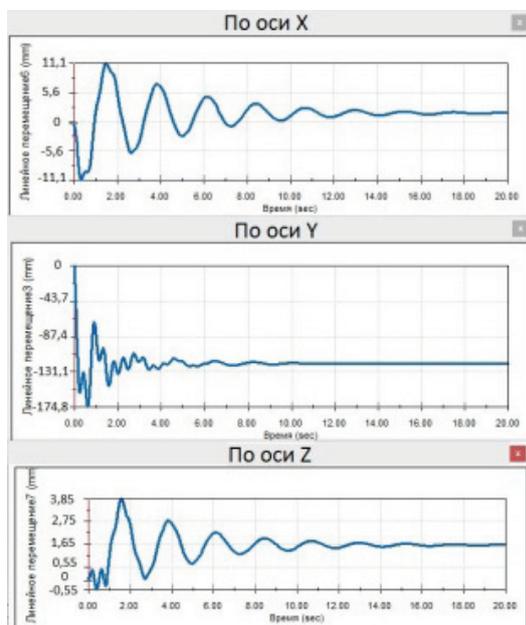


Рис. 10. Перемещение точки 1 относительно точки 2

Таким образом, введенные в конструкцию фиктивные шарниры позволяют моделиро-

вать как взаимодействие элементов шарнирно сочленённой стрелы между собой, так и их деформацию.

На следующем этапе исследований определяли изменение энергетической картины текущего состояния элементов шарнирно сочленённой стрелы по результатам wavelet-анализа в системе математического моделирования MATLAB. Применение wavelet-анализа позволило выделить в компонентах основного сигнала разложение сигнала по базису вейвлетов, пороговое значение шума для каждого уровня разложения, пороговую фильтрацию коэффициентов детализации, реконструкцию сигнала. Локализация и классификация особых точек, вычисление фрактальных характеристик, а также частотно-временной анализ нестационарных сигналов позволили выделить ряд дефектов элементов шарнирно сочленённой стрелы, представленных в эксплуатационных или руководящих документах.

Вейвлет-анализ

Характерный пример результатов вейвлет-анализа в двух- и трёхмерной форме представлен на рис. 11. Очевидно, что в данном примере выделение энергии в направлении оси Y больше, чем в направлениях X и Z. Расчётные вейвлет-коэффициенты для данного примера представлены в табл. 4.

Вейвлет-преобразование позволяет получить коэффициенты энтропии сигнала, которые показывают распределение энергии по частотам. Вейвлет-коэффициенты позволяют с помощью фигур Лиссажу установить их соответствие с явлениями, происходящими в элементах шарнирно сочленённой стрелы.

Результаты моделирования

Результаты моделирования применительно к [14] представлены в табл. 5. Графики в табл. 5 представляют собой приращения

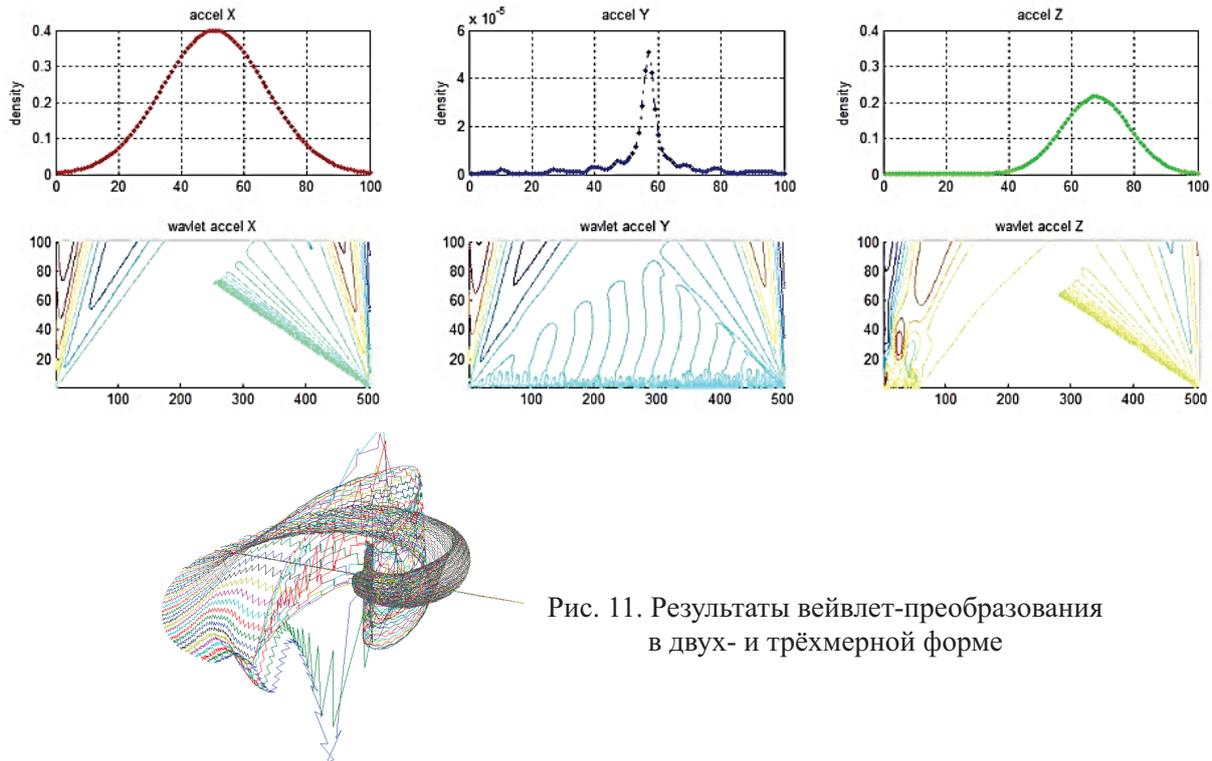


Рис. 11. Результаты вейвлет-преобразования в двух- и трёхмерной форме

ТАБЛИЦА 4. Расчётные вейвлет-коэффициенты

| | | | | | | | | |
|--------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Е _x (соответствует оси X) | 97,85791 | 1,192317 | 0,243878 | 0,341623 | 0,1451 | 0,028038 | 0,077647 | 0,113486 |
| Е _y (соответствует оси Y) | 97,81871 | 1,215328 | 0,248195 | 0,347187 | 0,147454 | 0,028568 | 0,079038 | 0,115519 |
| Е _z (соответствует оси Z) | 97,02764 | 1,58153 | 0,289532 | 0,425184 | 0,313857 | 0,134827 | 0,080477 | 0,14695 |

вейвлет-коэффициентов рассматриваемого дефектного состояния относительно исходного в двух- (третий столбец) и в трёхмерном (четвёртый столбец) изображении. Преимущества трёхмерного представления вибропортрета очевидны.

Заключение

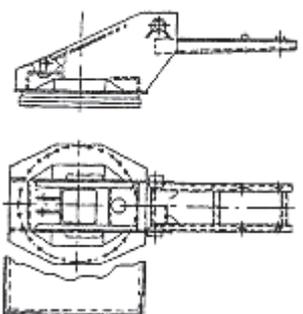
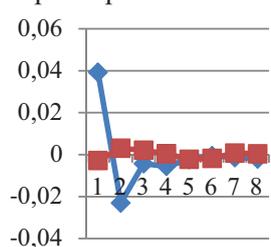
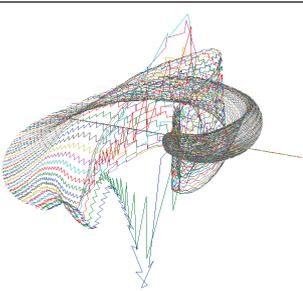
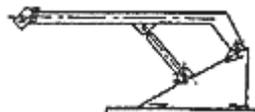
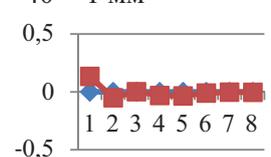
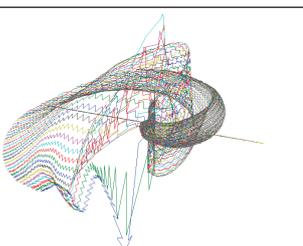
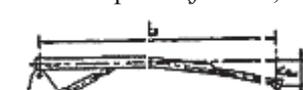
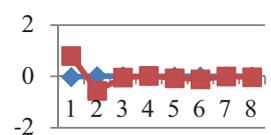
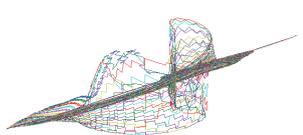
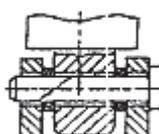
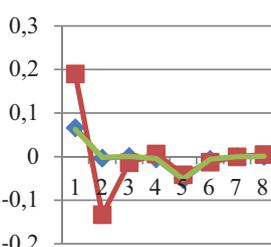
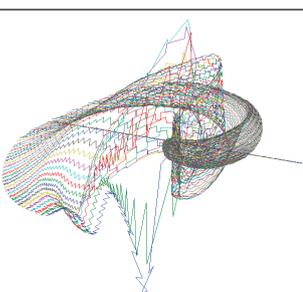
В ходе экспериментов установлено, что расхождение между результатами машинного и натурного экспериментов находится в диапазоне 7,1–9,2%.

Предлагаемая методика позволяет определять следующие дефекты в конструкции: тре-

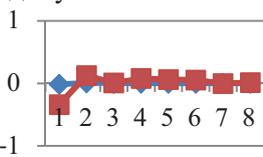
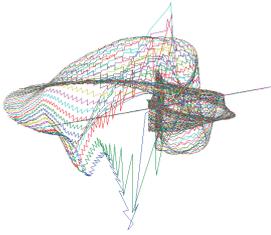
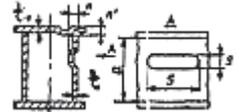
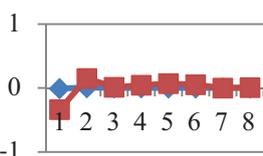
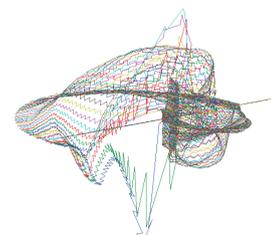
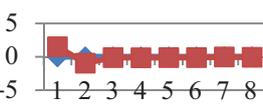
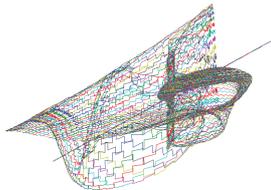
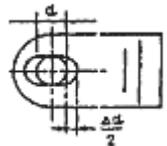
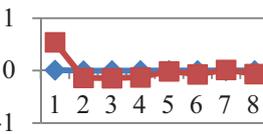
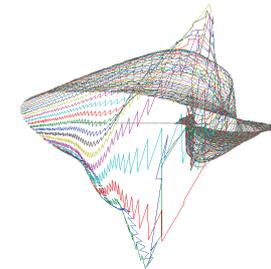
щины в сварных швах и в основном металле поворотной платформы, в сварных соединениях проушин колен и гидроцилиндров, в оси соединения гидроцилиндра с проушиной; выпуклость поясов и стенок сварных балок колен; местные деформации на поясах и стенках колен; скручивание коробчатых балок; выработку отверстий и валов; отклонение от прямолинейности оси колена. Преимущества трёхмерного представления вибропортрета очевидны.

Данная методика проявляет чувствительность и к остальным видам дефектов (уменьшению толщины элемента из-за коррозии, трещинам в сварных швах опорно-ходовой рамы с выносными опорами, изгибу опорно-

ТАБЛИЦА 5. Приращения вейвлет-коэффициентов

| Наименование узла | Описание повреждения или дефекта | Зависимость количества выделяемой энергии в долях от полной (вертикальная ось графика) в каждом из рассмотренных восьми диапазонов частот (горизонтальная ось графика): синий – ось Y, красный – ось Z | Трёхмерное представление вибропортрета в виде приращения вейвлет-коэффициентов: синий – E_y , красный – E_z , зеленый – E_e (E_e – ось X, E_y – ось Y, E_z – ось Z) |
|--|--|--|--|
| 1. Поворотная платформа | | | |
| Продольные и поперечные балки, зоны их соединения, элементы над ОПУ, кронштейны пяты стрелы, кронштейны гидроцилиндра подъема стрелы | Трещины в сварных швах и основном металле (не допускаются)  | Трещина в элементе над ОПУ размером 4×250 мм  |  |
| 2. Стрела | | | |
| Крепление стрелы к платформе (проушины стрелы и гидроцилиндров) | Трещины в сварных соединениях проушин с элементами стрелы (не допускаются)  | Трещина размером $60 \times 40 \times 1$ мм  |  |
| Стрела в рабочем положении | Отклонение от прямолинейности оси стрелы в рабочем положении в плоскости стрелы ($f/L = 0,007$)  | Отклонение 40 мм при допуске 70 мм  |  |
| Крепление гидроцилиндров телекопирования секций | Трещины в оси соединения гидроцилиндра с проушиной (не допускаются)  | Внутренняя трещина $\varnothing 1$ длиной 50 мм в оси $\varnothing 50$ мм  |  |

Окончание табл. 5

| Наименование узла | Описание повреждения или дефекта | Зависимость количества выделяемой энергии в долях от полной (вертикальная ось графика) в каждом из рассмотренных восьми диапазонов частот (горизонтальная ось графика): синий – ось Y, красный – ось Z | Трёхмерное представление вибропортрета в виде приращения вейвлет-коэффициентов: синий – E_p , красный – E_v , зеленый – E_e (E_e – ось X, E_p – ось Y, E_v – ось Z) |
|--|--|--|--|
| 3. Узлы металлоконструкций | | | |
| Листовые конструкции | Выпуклость поясов и стенок стрел сварных балок (для коробчатых стрел $f/a = 0,01$)  | Идентификация $f = 8$ мм при допуске 4 мм  |  |
| | Местные вмятины на поясах и стенках стрел, балок и на других листовых элементах (стойках поворотных платформ, конструкциях рам шасси и др.) глубиной n с размерами $0,25 \leq S/Q \leq 0,75$ ($n/t = 3, n_1/t_1 = 3$)  | Идентификация $n = 20$ мм при допуске $n = 30$ мм  |  |
| | Скручивание коробчатых и двуглавых балок ($f/H \leq 0,005 \times 0,001 L$ при $L \leq 2000$ мм $f/H \leq 0,003 \times 0,001 L$ при $L > 2000$ мм)  | Идентификация $f = 3$ мм при допуске $f = 4,5$ мм  |  |
| Проушины (под пальцы аутригеров, гидроцилиндров, элементов двуногой стойки, пяты стрелы, блоков и др.) | Выработка отверстий ($\Delta d = 2$ мм при $d \leq 50$ мм, $\Delta d = 3$ мм при $50 < d \leq 100$ мм, $\Delta d = 4$ мм при $d > 100$ мм)  | Выработка вала $\varnothing 100$ на 1 мм  |  |

ходовой рамы из плоскости стойки), но она не может их идентифицировать, поэтому необходимо продолжить работы в этом направлении.

Библиографический список

1. Алямовский А. А. Компьютерное моделирование в современной практике / А. А. Алямовский, А. А. Собачкин, Е. В. Одинцов и др. – СПб. : БХВ-Петербург, 2005. – 800 с.
2. Барсуков В. С. Микросистемная спецтехника: интеграция и миниатюризация в одном флаконе / В. С. Барсуков // Спец. техника. – 2003. – № 4.
3. Власов В. Т. Физическая теория процесса «деформация – разрушение» / В. Т. Власов, А. А. Дубов. Ч. I. Физические критерии предельных состояний металла. – М. : ТИССО, 2007. – 517 с.
4. ГОСТ 53037-2013 (ИСО 16368:2010). Мобильные подъемники с рабочими платформами. Расчёты конструкции, требования безопасности, испытания. – М. : Стандартиформ, 2014. – 83 с.
5. Дубов А. А. Метод магнитной памяти металла и приборы контроля : учеб. пособие / А. А. Дубов, Ал. А. Дубов, С. М. Колокольников. – М. : ТИССО, 2008. – 365 с.
6. Кобяков И. Знание векторных характеристик вибрации – ключ к безопасности технических устройств / И. Кобяков, А. Сперанский, А. Хориков и др. // Двигатель. – 2005. – № 2. – С. 8–11.
7. Кобяков И. Б. Трёхкомпонентный виброакселерометр для систем вибрационной диагностики технических систем / И. Б. Кобяков // Контроль. Диагностика. – 2001. – № 10. – С. 17–18.
8. Коровина М. С. Трёхкомпонентные МЭМС-датчики в системах мониторинга технического состояния специального самоходного подвижного состава / М. С. Коровина // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2013. – № 7. – С. 84–91.
9. Лепеш Г. В. Проектирование БМП. Решение инженерных задач на ЭВМ / Г. В. Лепеш. – СПб. : СПбГУСЭ ; ИИЦ «Сервис», 2006. – 172 с.
10. Материалы I междунар. науч.-технич. конф. «Диагностика оборудования и конструкций с использованием магнитной памяти металла» : докл. и тезисы докл. – М. : Энергодиагностика, 1999.
11. Материалы II междунар. науч.-технич. конф. «Диагностика оборудования и конструкций с ис-

пользованием магнитной памяти металла» : докл. и тезисы докладов. – М. : Энергодиагностика, 2001.

12. Материалы III междунар. науч.-технич. конф. «Диагностика оборудования и конструкций с использованием магнитной памяти металла» : докл. и тезисы докладов. – М. : Энергодиагностика, 2003.

13. Материалы IV междунар. науч.-технич. конф. «Диагностика оборудования и конструкций с использованием магнитной памяти металла» : докл. и тезисы докладов. – М. : Энергодиагностика, 2007.

14. РД-10-112-2-09. Методические рекомендации по экспертному обследованию грузоподъемных машин. Ч. 2. Краны стреловые общего назначения и краны-манипуляторы грузоподъемные. – М. : Изд-во ООО «НИИкраностроения», 2009. – 120 с.

15. РД-10-112-97. Методические указания по проведению обследования технического состояния подъемников (вышек) с истекшим сроком службы с целью определения возможности их дальнейшей эксплуатации. Ч. 9. Подъемники и автовышки. – М. : ВКТИМонтажстроймеханизация, 1998. – 73 с.

16. Смирнов В. Я. Измерение параметров вибрации : состояние и перспективы / В. Я. Смирнов // Мир измерений. – 2002. – № 9–10. – С. 6–13.

17. LIS3LV02DL MEMS inertial sensor rev. 2 by STMicroelectronics. LIS3LV02DQ MEMS inertial sensor rev. 1.

18. LSM303DLHC STMicroelectronics. – URL : <http://www.st.com>.

19. XAudio2. – URL : <http://charlespetzold.com>.

References

1. Alyamovskiy A. A., Sobachkin A. A., Oditsov Ye. V., Kharitonov A. I. & Ponomarev N. B. *Kompyuternoye modelirovaniye v sovremennoy praktike* [Computer Simulation in Modern Practice]. St. Petersburg, BKhV-Petersburg, 2005. 800 с.
2. Barsukov V. S. *Spetsialnaya tekhnika – Special Equipment*, 2003, no. 4.
3. Vlasov V. T. & Dubov A. A. *Fizicheskaya teoriya protsessy “deformatsiya – razrusheniye”*. Ch. I. *Fizicheskiye kriterii predelnykh sostoyaniy metalla* [Physical Theory of Deformation – Destruction Process. Pt. 1. Physical Criteria of Metal Limit States]. Moscow, TISSO, 2007. 517 p.
4. GOST 53037-2013 (ISO 16368: 2010). *Mobilnyye podyemniki s rabochimi platformami* [Mobile

Elevating Work Platforms]. Moscow, Standartinform, 2014. 83 p.

5. Dubov A.A., Dubov A.I. & Kolokolnikov S.M. Metod magnitnoy pamyati metalla i pribory kontrolya: uchebnoye posobiye [Metal Magnetic Memory Method and Monitors: Course Guide]. Moscow, TISSO, 2008. 365 p.

6. Kobyakov I., Speranskiy A., Khorikov A., Shatokhin A. & Kalinin S. *Dvigatel – Engine*, 2005, no. 2, pp. 8-11.

7. Kobyakov I.B. *Kontrol. Diagnostika – Control. Diagnostics*, 2001, no. 10, pp. 17-18.

8. Korovina M.S. *Izvestiya SPbGETU LETI – Proc. of Saint Petersburg Electrotechnical University LETI*, 2013, no. 7, pp. 84-91.

9. Lepesh G.V. Proyektirovaniye BMP. Resheniye inzhenernykh zadach na EVM. [Armoured Personnel Carrier Design. Computer Solution of Engineering Problems]. St Petersburg, SPbGUSE, IITs Servis, 2006. 172 p.

10. Materialy I mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii “Diagnostika oborudovaniya i konstruksiy s ispolzovaniyem magnitnoy pamyati metalla”: doklady i tezisy dokladov [Materials of the 1st Int. Sci. and Tech. Conf. “Diagnostics of Equipment and Elements with the Use of Metal Magnetic Memory”: Reports and Abstracts]. Moscow, Energo-diagnostics, 1999.

11. Materialy II mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii “Diagnostika oborudovaniya i konstruksiy s ispolzovaniyem magnitnoy pamyati metalla”: doklady i tezisy dokladov [Materials of the 2nd Int. Sci. and Tech. Conf. “Diagnostics of Equipment and Elements with the Use of Metal Magnetic Memory”: Reports and Abstracts]. Moscow, Energo-diagnostics, 2001.

12. Materialy III mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii “Diagnostika oborudovaniya i konstruksiy s ispolzovaniyem magnitnoy pamyati metalla”: doklady i tezisy dokladov [Materials of the

3rd Int. Sci. and Tech. Conf. “Diagnostics of Equipment and Elements with the Use of Metal Magnetic Memory”: Reports and Abstracts]. Moscow, Energo-diagnostics, 2003.

13. Materialy IV mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii “Diagnostika oborudovaniya i konstruksiy s ispolzovaniyem magnitnoy pamyati metalla”: doklady i tezisy dokladov [Materials of the 4th Int. Sci. and Tech. Conf. “Diagnostics of Equipment and Elements with the Use of Metal Magnetic Memory”: Reports and Abstracts]. Moscow, Energo-diagnostics, 2007.

14. RD-10-112-2-09. Metodicheskiye rekomendatsii po ekspertnomu obsledovaniyu gruzopodyemnykh mashin. Ch. 2. Krany strelkovyye obshchego naznacheniya i krany-manipulyatory gruzopodyemnyye [Methodological Recommendations for Expert Inspection of Lifting Machines. Pt. 2. General-Purpose Jib Cranes and Load-Lifting Loader Cranes]. Moscow, Izdatelstvo OOO NII Kranostroyeniya, 2009. 120 p.

15. RD-10-112-97. Metodicheskiye ukazaniya po provedeniyu obsledovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya podyemnikov (vyshek) s istekshim srokom sluzhby s tselyu opredeleniya vozmozhnosti ikh dalneyshey ekspluatatsii. Ch. 9. Podyemniki i avtovyshki [Methodological Directions for Conducting Inspection of Technical Condition of Lifts (Derricks) with Expired Service Term for the Purpose of Determining Possibility of Their Further Operation. Pt. 9. Lifts and Elevated Work Platforms]. Moscow, VKTI montazhstroymekhanizatsiya, 1998. 73 p.

16. Smirnov V.Ya. *Mir izmereniy – Measurement World*, 2002, no. 9-10, pp. 6-13.

17. LIS3LV02DL MEMS inertial sensor rev. 2 by STMicroelectronics. LIS3LV02DQ MEMS inertial sensor rev. 1.

18. LSM303DLHC STMicroelectronics, available at: <http://www.st.com>.

19. XAudio2, available at: <http://charlespetzold.com>.

ВАТУЛИН Ян Семёнович – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, yan-roos@yandex.ru; *КОРОВИН Сергей Константинович – канд. техн. наук, доцент, big-bernar@yandex.ru; КОРОВИНА Мария Сергеевна – ассистент, rgups2013@yandex.ru; ОРЛОВ Сергей Васильевич – канд. техн. наук, доцент, orlov@spbmuseum.ru; ПОТАХОВ Денис Александрович – студент, schan-di@mail.ru; ПОТАХОВ Егор Александрович – студент, schan-di@mail.ru, (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).