

Транспортное и энергетическое машиностроение

УДК 621.873.2/3

DOI: 10.18698/0536-1044-2018-4-19-27

Численное моделирование предельных состояний стреловых самоходных кранов

Я.С. Ватулин, Д.А. Потахов, Е.А. Потахов

Петербургский государственный университет путей сообщения, 190031, Санкт-Петербург, Российская Федерация, Московский пр-кт, д. 9

Numerical Simulation of Limiting States of Self-Propelled Boom Cranes

Y.S. Vatulin, D.A. Potakhov, E.A. Potakhov

St. Petersburg State Transport University, 190031, Saint Petersburg, Russian Federation, Moscow Ave., Bldg. 9

 e-mail: yan-roos@yandex.ru, Schan-di@mail.ru, epotakhov@mail.ru

i Практические исследования стреловых самоходных кранов, находящихся в предельном состоянии, представляют значительные трудности, поэтому целесообразно применять компьютерное моделирование с использованием специализированных функционалов Simulation и Motion программного комплекса САПР SolidWorks и MATLAB. Разработана методика численного моделирования предельных состояний технического объекта на основе вейвлет-анализа колебательных процессов элементов конструкции в условиях ненормированного нагружения. Методика численного моделирования предельных состояний технического объекта состоит из следующей последовательности действий: геометрическое моделирование объекта, определение жесткостных характеристик конструкции, выполнение экспериментов на техническом объекте и виртуальном аналоге, обработка данных колебательного процесса и приведение динамических свойств виртуальной модели в соответствие прототипу путем получения сходимости их колебательных процессов. Для отладки созданной методики проведены исследования на физической модели объекта. Полученные результаты предоставляют возможность проводить дальнейшие численные эксперименты над виртуальной моделью технического объекта.

Ключевые слова: численное моделирование, физическое моделирование, микроконтроллерная платформа Arduino Nano, стреловой самоходный кран

i There are significant difficulties in conducting practical studies of the limiting states of self-propelled boom cranes, therefore it is advisable to use computer simulation with specialist Simulation and Motion functions of the CAD software SolidWorks and MATLAB. A technique is developed for the numerical simulation of limiting states of a technical object on the basis of wavelet analysis of oscillatory processes of structural elements under non-normalized loading. The technique for the numerical simulation of the limiting states of a technical object consists of the following sequential actions: geometric modeling of the object, determining the rigidity properties of the structure, performing experiments on the

technical object and the numerical model, processing the oscillation process data, and bringing dynamic properties of the virtual model in line with the prototype by obtaining convergence of their oscillatory processes. In order to finetune the developed technique, research on the physical prototype was performed. The results obtained provide an opportunity to conduct further numerical experiments on a virtual model of a technical object.

Keywords: numerical simulation, physical simulation, microcontroller Arduino Nano, self-propelled boom crane

Натурные исследования явлений, связанных с доведением до предельного состояния сложных и опасных технических объектов (ТО), в том числе и стреловых самоходных кранов (ССК), крайне затратны и значительно снижают ресурс оборудования, а процесс испытания представляет существенную производственную опасность.

В связи с этим наиболее целесообразным является проведение численного эксперимента, который позволяет получить информацию о режимах нагружения узлов и деталей в процессе моделирования работы машины, исключая указанные недостатки. С этой целью необходимо разработать виртуальную модель ТО, наиболее приближенную по характеристикам и поведению к объекту исследования.

Характер колебаний несущих элементов конструкции под действием внешних нагрузок в значительной степени отражает энергетику процессов, протекающих в ССК [1, 2]. Изменение характера контакта (контактных площадей, направлений, составляющих тензора напряжений, количества взаимодействующих поверхностей) сопряженных компонентов конструкции влечет за собой изменение энергетической картины процессов. Таким образом, текущее состояние исследуемого ТО представляется возможным оценивать с помощью энергетической картины процессов взаимодействия контактирующих элементов конструкции. В этом случае основным критерием адекватности численной модели прототипу будет соответствие вибропортретов.

Цель работы — разработка методики численного моделирования предельных состояний ТО на основе вейвлет-анализа колебательных процессов элементов конструкции в условиях ненормированного нагружения.

Пример численной модели ССК КС-4571 выполнен с использованием специализированных функционалов Simulation и Motion программного комплекса САПР SolidWorks и MATLAB.

Разработка модели проведена в следующей последовательности: геометрическое моделирование ССК, проведение предварительных исследований жесткости конструкции для определения местоположения датчиков перемещений на ТО и его виртуальном аналоге, выполнение экспериментов на реальном и виртуальном ССК, обработка данных колебательного процесса (построение вибропортретов и коэффициентов энтропии энергии модели и ТО) и приведение динамических свойств виртуальной модели в соответствие прототипу путем получения сходимости вибропортретов и коэффициентов энтропии.

Физическое моделирование ТО. Для отладки методики проведения исследования проведено предварительное физическое моделирование ТО. При таком подходе в лабораторных условиях определяется наибольшее количество значимых факторов, оказывающих влияние на исследуемый ТО, что позволяет в дальнейшем сократить время исследования ССК [3, 4].

Под физическим моделированием понимают метод экспериментального изучения различных физических явлений, основанный на их физическом подобии. Основой физического моделирования является теория подобия.

Физическое подобие двух систем означает равенство всех их однотипных критериев подобия [3, 5]. При физическом моделировании однородных упругих систем (конструкций), механические свойства которых определяются модулем упругости (модулем Юнга) E и безразмерным коэффициентом Пуассона ν , критериями подобия являются

$$\nu = \left| \frac{e_1}{e_2} \right|; \quad \frac{rgl}{E}; \quad \frac{F}{El^2},$$

где e_1 — относительная поперечная деформация; e_2 — относительная продольная деформация; r — плотность материала конструкции; g — ускорение силы тяжести; l — линейный размер; F — внешняя сила [5, 6].

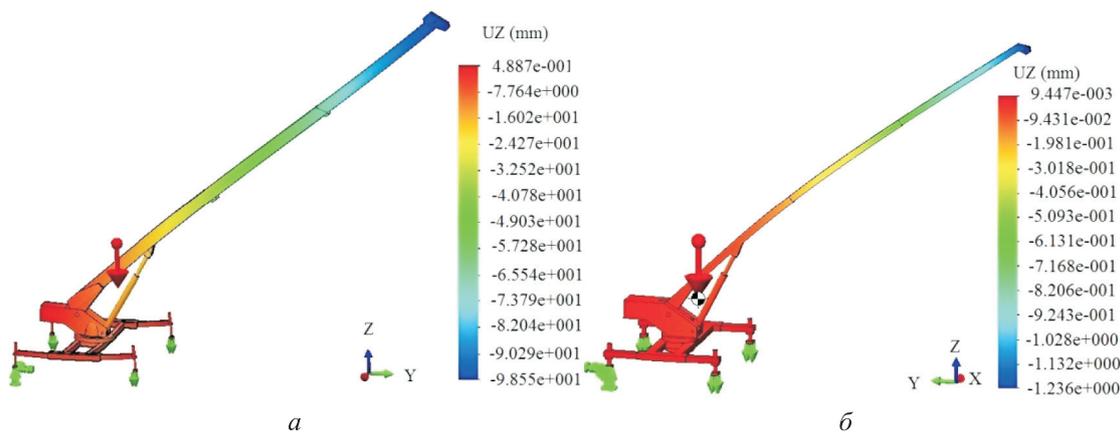


Рис. 1. Эпюры перемещений по оси Z, мм, численной (а) и масштабной (б) моделей ССК

В связи с тем что физическое моделирование осуществляется при ускорении свободного падения $g_m = g_n = g$ (здесь и далее индексы «м» и «н» обозначают принадлежность к физической модели и натуре соответственно), получить равенство всех однотипных критериев при разных линейных размерах практически невозможно. Так как основной нагрузкой являются внешние силы, а не весовая нагрузка конструкции, допустимо пренебречь вторым критерием подобия [5, 6].

Характер деформации (перемещения) несущих элементов ССК и его физической модели устанавливался с помощью специализированного функционала Simulation SolidWorks в процессе прочностного статического анализа виртуальных моделей под действием собственного веса (рис. 1). Поэтому сначала в среде SolidWorks было выполнено геометрическое моделирование ТО. В основу виртуальных моделей положено конструктивное устройство стрелового крана КС-4571, механизмы которого условно учтены сосредоточенными массами, а элементы несущей металлоконструкции, не оказывающие существенного влияния на исследуемый объект, редуцированы.

Далее на основе геометрической САД-модели масштабной копии ССК (масштаб 1:50 относительно линейных размеров), представленной в виде STL-файла, методом послойного синтеза из пластика типа PLA была создана физическая модель ССК (рис. 2).

В качестве материала опорных площадок для физической модели использована полипропиленовая фибра, механические свойства которой (коэффициент Пуассона и модуль Юнга) согласно теории подобия [3, 7] идентичны коэффициенту поперечной деформации и модулю

продольной упругости опорного грунта типа суглинок (табл. 1).

Для получения информации о кинематическом взаимодействии сопряженных элементов в процессе нагружения применялся специализированный функционал Motion среды SolidWorks [8, 9]. Характерной особенностью указанного функционала является представление кинематических групп в виде жестких взаимодействующих элементов. Данное обстоятельство не позволяет достичь достаточной степени адекватности поведения виртуальной модели, поскольку в системе не учитывается собственная изгибная деформация элементов стрелы при нагружении.

В связи с этим разработан особый элемент — фиктивный шарнир, представляющий собой шарнир Гука, оснащенный пружинами и демпферами, свойства которых позволяют моделировать изгибную жесткость конструктивного элемента. Данное устройство внедряется

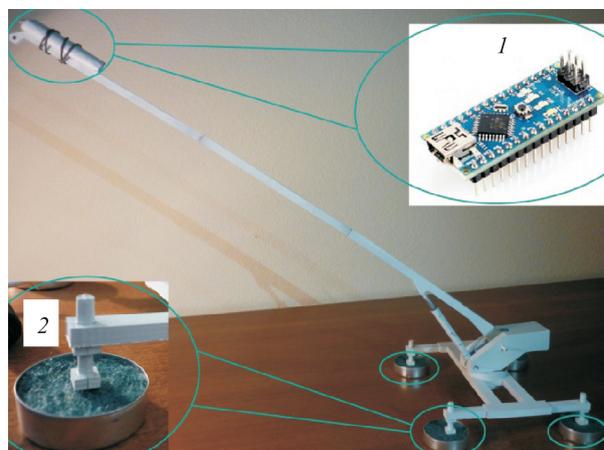


Рис. 2. Физическая модель ССК:
1 — микроконтроллерная платформа Arduino Nano;
2 — грунтовая опорная площадка

Таблица 1

Показатели упругих свойств и критерии подобия опорного грунта и его физической модели

| Показатель | Полипропиленовая фибра | Грунт типа суглинок |
|----------------------------|---|-----------------------|
| Коэффициент Пуассона ν | 0,35...0,39 | 0,30...0,40 |
| Модуль Юнга E , МПа | 3 500 | 50...80 |
| Внешняя сила F , Н | $F_H/50$ | F_H |
| Линейный размер l^* , м | $l_H/50$ | l_H |
| $\frac{F}{El^2}$ | $\frac{F_H/50}{3500(l_H/50)^2} = \frac{F_H}{70l_H^2}$ | $\frac{F_H}{70l_H^2}$ |

* Глубина массива грунта, на которой напряжения от воздействия ССК примерно равны нулю.

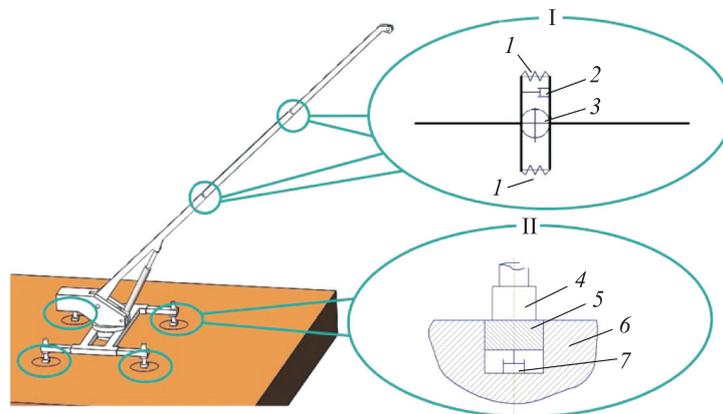


Рис. 3. Схемы численного моделирования ССК в среде Motion:

I — схема фиктивного шарнира (1 — пружина; 2 — демпфер; 3 — фиктивный шарнир);
 II — схема просадки опор (4 — выносная опора; 5 — податливая втулка; 6 — грунт; 7 — демпфер)

в сечения конструкции, соответствующие экстремальным точкам линии моды колебаний этого элемента (рис. 3).

Физико-механические свойства опорной поверхности воссозданы податливым элементом — втулкой, оснащенной демпфером, характеристики которого моделируют осадку выносной опоры (см. рис. 3). Реализация и настройка фиктивного шарнира и механизма просадки опор описаны в работах [10, 11].

Проведение экспериментов. На физической модели и ее виртуальном аналоге в среде Motion выполнены эксперименты по моделированию трех предельных состояний ССК для трех расчетных схем (табл. 2).

В численном эксперименте значения линейных перемещений характерных точек модели определялись с помощью виртуальных датчиков перемещений; измерения проводились относительно трех осей.

Таблица 2

Условия проведения экспериментов над физической моделью ССК

| Режим нагружения | Расчетная схема | | |
|--|-----------------|---------------|---------------|
| | 1 | 2 | 3 |
| Раскачка груза (косая чалка), угол отклонения от вертикали 15° | $l = 409$ мм; | $l = 124$ мм; | $l = 480$ мм; |
| Инерционные явления при вращении платформы | $L = 435$ мм; | $L = 435$ мм; | $L = 435$ мм; |
| Обрыв каната | $m = 2,4$ г | $m = 40,0$ г | $m = 0,6$ г |

Примечание. l — вылет; L — длина стрелы; m — масса груза.

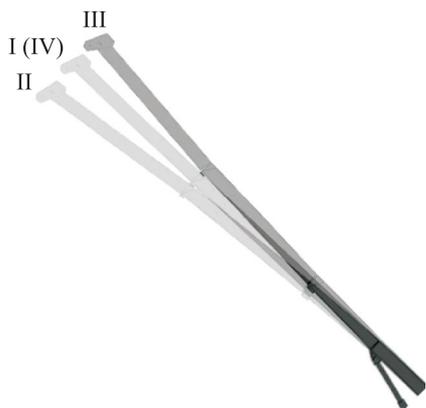


Рис. 4. Фазы колебаний стрелы виртуальной модели в результате резкого снятия нагрузки: I — начальное положение; II — положение под нагрузкой; III — положение в результате запрокидывания при обрыве каната; IV — установившееся положение после затухания колебаний (соответствует начальному положению)

В качестве датчика для физической модели использован модуль GY-521 (модуль трехосевого гироскопа и акселерометра, выполненный на базе микросхемы MPU-6050), подключенный к платформе Arduino Nano. В специализированной интегрированной среде устройства был создан программный код, осуществляющий процесс беспроводной трансляции значений линейных перемещений, полученных двойным интегрированием показаний акселерометра.

Микропроцессорная платформа Arduino выбрана благодаря следующим достоинствам: низкая стоимость, кроссплатформенность, простая и удобная среда программирования, расширяемое открытое аппаратное обеспечение, расширяемое программное обеспечение с открытым исходным кодом, позволяющим оперативно вносить изменения в свою структуру [12–14].

В качестве примера представлены результаты эксперимента обрыва каната для второй

расчетной схемы: на рис. 4 — фазы колебаний стрелы виртуальной модели, на рис. 5 — соответствие линейных перемещений оголовка стрелы физической модели и ее виртуального аналога.

Обработка результатов. Полученные файлы линейных перемещений оголовка стрелы физической и виртуальной моделей обрабатывались в системе математического моделирования MATLAB. Результат исследования в пакете прикладных программ MATLAB представлен энергетической картиной процессов (плотностью распределения сигналов колебаний, кепстральным анализом процессов, вейвлет-представлениями сигнала).

Метод выявления энергетической картины заключается в расчете значений функции распределения плотности перемещений методом непараметрического сглаживания по исходной выборке и определении спектрограммы исходного сигнала-функции по критерию Кайзера с последующим непрерывным вейвлет-преобразованием и вейвлетным разложением.

В качестве примера на рис. 6 приведено сравнение вибропортретов колебательного процесса, а в табл. 3 — коэффициентов энтропии сигнала физической и виртуальной моделей в случае обрыва каната для второго расчетного случая (см. табл. 2).

По показателям плотности распределения сигналов можно определить направление повторяемости перемещений (рис. 6, а). Кепстральный анализ служит математической основой нелинейных методов выделения сигналов. Полосы в кепстральном представлении (рис. 6, б) соответствуют резонансным, наиболее энергонасыщенным частотам колебаний конструкции, т. е. тем частотам, на которых

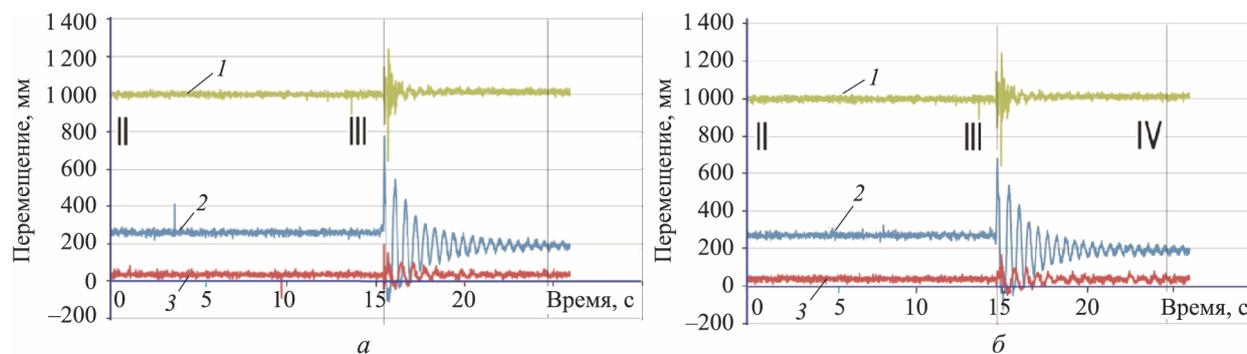


Рис. 5. Линейные перемещения оголовка стрелы виртуальной (а) и физической (б) моделей по осям X (1), Z (2) и Y (3): II–IV — то же, что на рис. 4

наблюдается максимальная энергетическая активность процессов в конструкции. Их выявление крайне значимо, так как эргонасыщенные частоты в наибольшей степени обуславливают текущее состояние и отражают любое изменение энергетической картины.

С помощью вейвлет-преобразования (рис. 6, в) можно получить коэффициенты энтропии сигнала, показывающие распределение энергии по частотам [15–17]. Определение вейвлет-коэффициентов дает возможность посредством фигур Лиссажу достаточно одно-

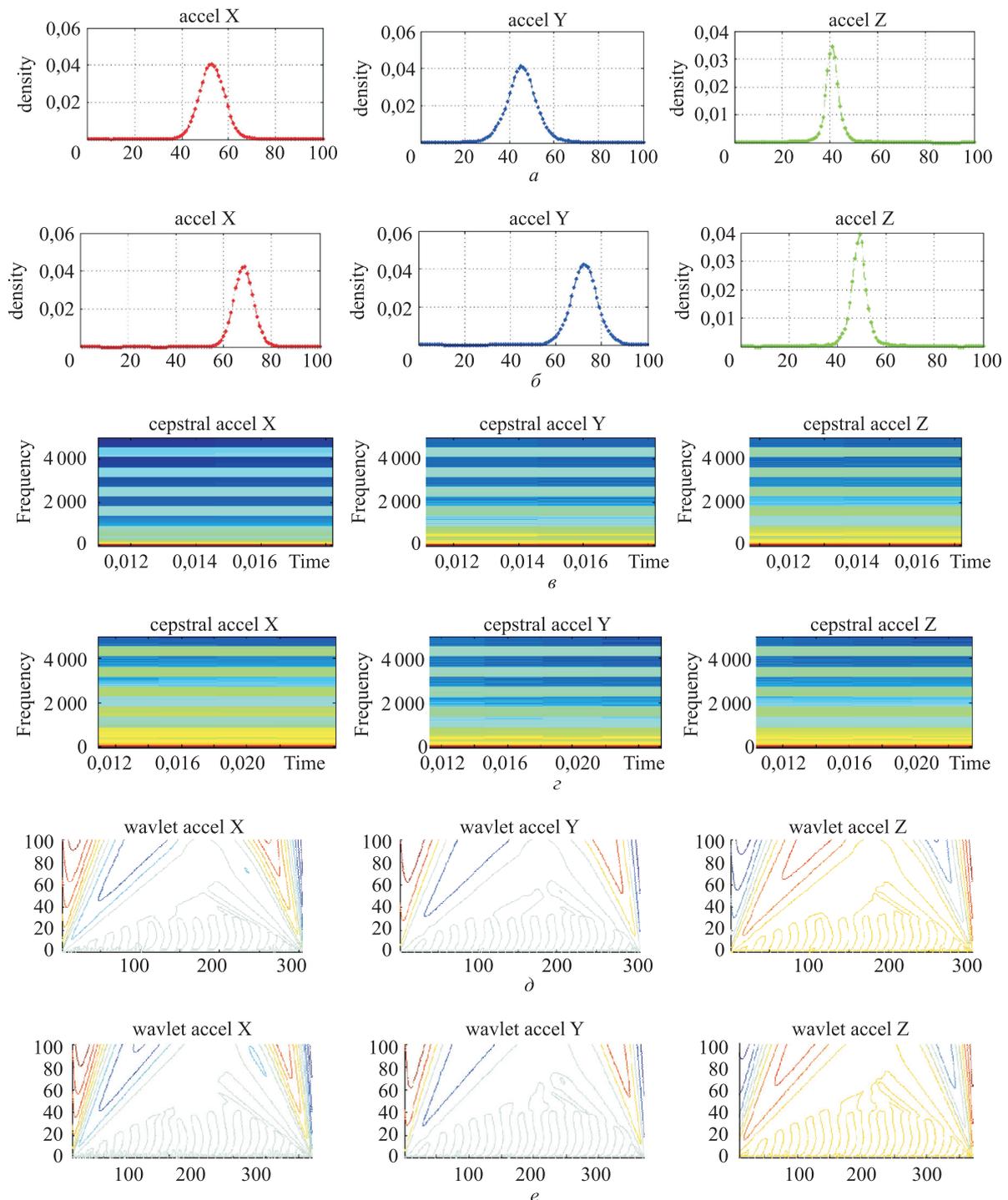


Рис. 6. Сравнение вибропортретов колебательного процесса виртуальной (а, в, д) и физической (б, з, е) моделей в случае обрыва каната:
а, б — плотность распределения сигналов; в, з — кепстральный анализ процессов;
д, е — вейвлет-представление сигналов

Таблица 3

Сравнение коэффициентов энтропии сигнала в случае обрыва каната

| Модель | | | | | | Расхождение | | |
|-------------|---------|---------|------------|---------|---------|--------------|--------------|--------------|
| виртуальная | | | физическая | | | ΔE_e | ΔE_n | ΔE_v |
| E_e | E_n | E_v | E_e | E_n | E_v | | | |
| 97,4547 | 97,4206 | 97,4621 | 97,4828 | 97,4714 | 97,4969 | 0,0281 | 0,0508 | 0,0348 |
| 1,4907 | 1,5161 | 1,4838 | 1,3148 | 1,3191 | 1,3075 | 0,1759 | 0,197 | 0,1763 |
| 0,2669 | 0,2687 | 0,2670 | 0,2966 | 0,2986 | 0,2953 | 0,0297 | 0,0299 | 0,0283 |
| 0,4211 | 0,4246 | 0,4208 | 0,5086 | 0,5108 | 0,5051 | 0,0875 | 0,0862 | 0,0843 |
| 0,1336 | 0,1346 | 0,1334 | 0,1085 | 0,1097 | 0,1082 | 0,0251 | 0,0249 | 0,0252 |
| 0,0224 | 0,0227 | 0,0224 | 0,0339 | 0,0344 | 0,0337 | 0,0115 | 0,0117 | 0,0113 |
| 0,1017 | 0,1030 | 0,1015 | 0,0990 | 0,0997 | 0,0985 | 0,0027 | 0,0033 | 0,003 |
| 0,1090 | 0,1098 | 0,1090 | 0,1558 | 0,1564 | 0,1548 | 0,0468 | 0,0466 | 0,0458 |

значно соотносить их конфигурации с явлениями, происходящими в конструкции.

В целях установления идентичности виртуальной модели прототипу необходимо добиться максимально возможной схожести вибропортретов колебательных процессов физической и виртуальной моделей при каждой расчетной схеме для каждого режима нагружения. Сходимость вибропортретов позволяет утверждать об адекватности виртуальной модели прототипу.

Сходимость вибропортретов достигается варьированием значений зазоров в телескопических сочленениях, жесткости пружин и демпфера фиктивного шарнира, а также модулем упругости направляющих ползунов секций стрелы виртуальной модели ССК.

Выводы

1. Разработана методика численного моделирования предельных состояний ТО на основе вейвлет-анализа результатов вибропортретирования его колебательных процессов в условиях ненормированного нагружения.

2. Созданная методика позволит проводить дальнейшие численные эксперименты над виртуальной моделью ССК, в результате которых

будет получена информация о режимах нагружения узлов и деталей в процессе работы грузоподъемной машины. В качестве измерительной системы для регистрации линейных перемещений, необходимых для получения вибропортрета крана, можно применять систему, использованную для снятия параметров физической модели — модуль GY-521, подключенный к микроконтроллерной платформе типа Arduino, с беспроводной передачей данных на персональный компьютер. При этом для создания адекватной виртуальной модели ССК достаточно регистрировать параметры крана в штатном нагружении без доведения ТО до предельного состояния.

3. Предложенная методика предоставляет возможность на основе анализа энергетики колебательных процессов несущих элементов конструкции исследовать предельные состояния ТО под действием внешнего нагружения без риска для жизни и здоровья персонала и без снижения ресурса эксплуатируемого оборудования.

4. Результаты исследований позволят предотвратить аварийные ситуации и повысить уровень безопасной эксплуатации свободностоящих грузоподъемных средств.

Литература

[1] Daubechies I. *Ten Lectures on Wavelets*. Ижевск, РХД, 2001. 464 с.
 [2] Балицкий Ф.Я., Генкин М.Д., Иванова М.А., Соколова А.Г., Хомяков Е.И. *Современные методы и средства вибрационной диагностики машин и конструкций*. Москва, МЦНТИ, 1990. 114 с.

- [3] Санников Р.Х. *Теория подобия и моделирования. Планирование инженерного эксперимента*. Уфа, УГНТУ, 2010. 214 с.
- [4] Кириченко И.Г. Компьютерное и физическое моделирование строительных и дорожных машин. *Вестник Харьковского Национального автомобильно-дорожного университета*, 2014, вып. 65–66. URL: <http://dspace.khadi.kharkov.ua/dspace/handle/123456789/973> (дата обращения 15 ноября 2017).
- [5] Гухман А.А. *Введение в теорию подобия*. Москва, ЛКИ, 2018. 296 с.
- [6] Седов Л.И. *Методы подобия и размерности в механике*. Москва, Наука, 1987. 430 с.
- [7] Цытович Н.А. *Механика грунтов*. Москва, Высшая школа, 1983. 288 с.
- [8] Алямовский А.А. *Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation*. Москва, ДМК Пресс, 2010. 464 с.
- [9] Алямовский А.А., Собачкин Е.В., Одинцов А.И., Харитонович Н.Б., Пономарев А.А. *SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике*. Санкт-Петербург, БХВ-Петербург, 2008. 1040 с.
- [10] Ватулин Я.С., Коровин С.К., Коровина М.С., Орлов С.В., Потахов Д.А., Потахов Е.А. Безопасное применение мобильных подъемников с рабочими платформами на основе результатов натуральных и виртуальных экспериментов. *Известия Петербургского университета путей сообщения*, 2016, вып. 2(47), с. 255–268.
- [11] Ватулин Я.С., Потахов Д.А., Потахов Е.А. Моделирование потери устойчивости свободно стоящих стреловых самоходных кранов. *Техника железных дорог*, 2016, № 4(36), с. 60–67.
- [12] Блум Д. *Изучаем Arduino: инструменты и методы технического волшебства*. Санкт-Петербург, БХВ-Петербург, 2015. 336 с.
- [13] Соммер У. *Программирование микроконтроллерных плат Arduino/Freduino*. Санкт-Петербург, БХВ-Петербург, 2016. 256 с.
- [14] Омельченко Е.Я., Танич В.О., Маклаков А.С., Карякина Е.А. Краткий обзор и перспективы применения микропроцессорной платформы Arduino. *Электротехнические системы и комплексы*, 2013, вып. 21, с. 28–33
- [15] Смоленцев Н.К. *Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB*. Москва, ДМК-Пресс, 2015. 630 с.
- [16] Mallat S. *A Wavelet tour of signal processing*. Москва, Мир, 2005. 671 с.
- [17] Воробьев В.И., Грибунин В.Г. *Теория и практика вейвлет-преобразования*. Санкт-Петербург, Издательство ВУС, 1999. 204 с.

References

- [1] Daubechies I. *Ten Lectures on Wavelets*. Izhevsk, RHD publ., 2001. 464 p.
- [2] Balitskii F.Ia., Genkin M.D., Ivanova M.A., Sokolova A.G., Khomiakov E.I. *Sovremennyye metody i sredstva vibratsionnoi diagnostiki mashin i konstruksii* [Modern methods and means of vibration diagnostics of machines and structures]. Moscow, MTsNTI publ., 1990. 114 p.
- [3] Sannikov R.Kh. *Teoriia podobiia i modelirovaniia. Planirovanie inzhenernogo eksperimenta* [Theory of similarity and modeling. Planning of the engineering experiment]. Ufa, USNTU publ., 2010. 214 p.
- [4] Kirichenko I.G. Komp'yuternoe i fizicheskoe modelirovanie stroitel'nykh i dorozhnykh mashin [Computer and physical simulation of construction and road machines]. *Vestnik Khar'kovskogo Natsional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta* [Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University]. 2014, is. 65–66. Available at: <http://dspace.khadi.kharkov.ua/dspace/handle/123456789/973> (accessed 15 November 2017).
- [5] Gukhman A.A. *Vvedenie v teoriuu podobiia* [Introduction to the theory of similarity]. Moscow, LKI publ., 2018. 296 p.
- [6] Sedov L.I. *Metody podobiia i razmernosti v mekhanike* [Similarity and dimension methods in mechanics]. Moscow, Nauka publ., 1987. 430 p.
- [7] Tsytovich N.A. *Mekhanika gruntov* [Soil mechanics]. Moscow, Vysshiaia shkola publ., 1983. 288 p.

- [8] Aliamovskii A.A. *Inzhenernye raschety v SolidWorks Simulation* [Engineering calculations and Solidworks Simulation]. Moscow, DMK Press, 2010. 464 p.
- [9] Aliamovskii A.A., Sobachkin E.V., Odintsov A.I., Kharitonovich N.B., Ponomarev A.A. *SolidWorks. Komp'yuternoe modelirovanie v inzhenernoi praktike* [SolidWorks. Computer modeling in engineering practice]. Sankt-Petersburg, BKhV-Peterburg publ., 2008. 1040 p.
- [10] Vatulin Ia.S., Korovin S.K., Korovina M.S., Orlov S.V., Potakhov D.A., Potakhov E.A. Bezopasnoe primeneniye mobil'nykh pod'emnikov s rabochimi platformami na osnove rezul'tatov naturnykh i virtual'nykh eksperimentov [Safe operation of mobile elevating work platforms on the basis of results of full-scale and virtual experiments]. *Izvestiia Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniia* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2016, is. 2(47), pp. 255–268.
- [11] Vatulin Ia.S., Potakhov D.A., Potakhov E.A. Modelirovanie poteri ustoiichivosti svobodno stoiashchikh strelovykh samokhodnykh kranov [Modeling buckling of freestanding self-propelled jib cranes]. *Tekhnika zheleznykh dorog* [Railway Equipment]. 2016, no. 4(36), pp. 60–67.
- [12] Blum D. *Izuchaem Arduino: instrumenty i metody tekhnicheskogo volshebstva* [Learning Arduino: tools and techniques of technical magic]. Sankt-Petersburg, BKhV-Peterburg publ., 2015. 336 p.
- [13] Sommer U. *Programmirovaniye mikrokontrollernykh plat Arduino/Freeduino* [Programming microcontroller cards Arduino/Freeduino]. Sankt-Petersburg, BKhV-Peterburg publ., 2016. 256 p.
- [14] Omel'chenko E.Ia., Tanich V.O., Maklakov A.S., Kariakina E.A. Kratkii obzor i perspektivy primeneniia mikroprotssornoi platformy Arduino [Summary and prospects of applications of microprocessor platform Arduino]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes]. 2013, is. 21, pp. 28–33.
- [15] Smolentsev N.K. *Osnovy teorii veivletov. Veivlety v MATLAB* [Fundamentals of the theory of wavelets. Wavelets in MATLAB]. Moscow, DMK-Press, 2015. 630 p.
- [16] Mallat S. *A Wavelet tour of signal processing*. Moscow, Mir publ., 2005. 671 p.
- [17] Vorob'ev V.I., Gribunin V.G. *Teoriia i praktika veivlet-preobrazovaniia* [Theory and practice of wavelet transform]. Sankt-Petersburg, VUS publ., 1999. 204 p.

Статья поступила в редакцию 27.12.2017

Информация об авторах

ВАТУЛИН Ян Семенович (Санкт-Петербург) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Подъемно-транспортные, путевые и строительные машины». Петербургский государственный университет путей сообщения (190031, Санкт-Петербург, Российская Федерация, Московский пр-кт, д. 9, e-mail: yan-roos@yandex.ru).

ПОТАХОВ Денис Александрович (Санкт-Петербург) — аспирант кафедры «Подъемно-транспортные, путевые и строительные машины». Петербургский государственный университет путей сообщения (190031, Санкт-Петербург, Российская Федерация, Московский пр-кт, д. 9, e-mail: Schan-di@mail.ru).

ПОТАХОВ Егор Александрович (Санкт-Петербург) — аспирант кафедры «Подъемно-транспортные, путевые и строительные машины». Петербургский государственный университет путей сообщения (190031, Санкт-Петербург, Российская Федерация, Московский пр-кт, д. 9, e-mail: epotakhov@mail.ru).

Information about the authors

VATULIN Yan Semenovich (Saint Petersburg) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Lifting, Transport, Track and Construction Machines. St. Petersburg State Transport University (190031, Saint Petersburg, Russian Federation, Moscow Ave., Bldg. 9, e-mail: yan-roos@yandex.ru).

POTAKHOV Denis Aleksandrovich (Saint Petersburg) — Postgraduate, Department of Lifting, Transport, Track and Construction Machines. St. Petersburg State Transport University (190031, Saint Petersburg, Russian Federation, Moscow Ave., Bldg. 9, e-mail: Schan-di@mail.ru).

POTAKHOV Egor Aleksandrovich (Saint Petersburg) — Postgraduate, Department of Lifting, Transport, Track and Construction Machines. St. Petersburg State Transport University (190031, Saint Petersburg, Russian Federation, Moscow Ave., Bldg. 9, e-mail: epotakhov@mail.ru).