

УДК 621.873.3:629.119
ББК 39.922.233-041:39.311-044

А. А. Хахов

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
НАГРУЖЕННОСТИ АВТОМОБИЛЬНЫХ КРАНОВ
КИНЕМАТИЧЕСКИМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ ДОРОГИ**

A. A. Hahov

**EXPERIMENTAL ANALYSIS
OF MOBILE CRANES LOADING
BY KINEMATIC ROAD INFLUENCES**

Показаны основные принципы построения математических моделей автомобильных стреловых самоходных кранов в транспортном состоянии. Описан алгоритм динамического анализа автомобильных стреловых самоходных кранов с телескопическими стрелами методом конечных элементов. Представлены матричные дифференциальные уравнения вынужденных колебаний конструкций кранов. Приведен пример построения расчетно-динамической модели автомобильного крана КС-35715. Рассмотрен один из способов описания возмущающего воздействия дороги. Описан метод акселерометрирования расчетных узлов металлоконструкций автомобильных кранов. Изложен принцип работы интегрального акселерометра и экспериментальной установки, предназначенной для определения линейных ускорений исследуемых узлов металлоконструкций автомобильных кранов. Приведены результаты эксперимента.

Ключевые слова: автомобильный кран, эксперимент, кинематическое воздействие, метод конечных элементов, математическая модель, акселерометр, металлические конструкции, микропрофиль дороги.

The basic principles of designing of mathematical models of mobile jib cranes in a transport condition are shown. The algorithm of the dynamic analysis mobile jib cranes with telescopic jibs using a method of finite elements is described. The matrix differential equations of the compelled fluctuations of designs of cranes are submitted. The example of construction of dynamic model of the mobile crane КС-35715 is given. One of the ways of the description of revolting influence of a road is considered. The method of the acceleromentering of settlement units of metallic constructions of mobile cranes is described. The principle of integrated accelerometer and experimental installation work intended for definition linear acceleration of the researched units of metallic constructions of mobile cranes is presented. The results of the experiment are stated.

Key words: mobile crane, experiment, kinematic impact, method of finite elements, mathematical model, accelerometer, metal constructions, road microprofile.

Автомобильные краны эксплуатируются в самых разнообразных дорожных условиях, все многообразие воздействий которых оценить комплексно чрезвычайно сложно, особенно если принять во внимание, что в зависимости от сезона и специфики региона однотипные дороги могут иметь различные характеристики. Поэтому при создании и эксплуатации колесной техники оценку проводят не по комплексному воздействию, а по отдельным его составляющим. Основными из них являются: сопротивление движению, сцепление движителя с опорной поверхностью, профиль дорожной поверхности (сечение рельефа дороги в направлении движения автомобильного крана). Профиль дороги делится на три составляющие – макропрофиль, микропрофиль и шероховатость, что обусловлено различным воздействием на колесную машину. Шероховатости (длина волны менее 10 см) сглаживаются шинами и не вызывают ощутимых колебаний, но влияют на работу шины (сцепление, шум и т. д.). Макропрофиль, состоящий из длинных плавных неровностей (длина волны 100 м и более), практически не вызывает колебаний автомобильного крана, но заметно влияет на ее тягово-динамические показатели. Микропрофиль состоит из неровностей (длина волны от 10 см до 100 м), оказывающих определяющее влияние на многие эксплуатационные свойства автомобильных кранов (надежность, устойчивость, плавность хода, быстроходность). Именно микропрофиль дороги определяет нагруженность металлоконструкций автомобильных кранов в транспортном состоянии [1].

При проектировании автокранов на предприятиях расчет крановых металлоконструкций выполняется в соответствии с требованиями РД НИИКраностроения-08-07 «Методические рекомендации. Краны стреловые самоходные. Металлические конструкции. Нормы расчета». К сожалению, РД НИИКраностроения-08-07 не предусматривает расчет автокранов в транспортном состоянии. Тем не менее автокран является грузоподъемной машиной, предназначенной для выполнения подъемно-транспортных работ на рассредоточенных объектах, и большая часть усталостных трещин в металлоконструкциях автокранов появляется в результате передвижения кранов по бездорожью. В развитие норм расчета металлических конструкций автомобильных кранов кафедрой «Подъемно-транспортные машины» Астраханского государственного технического университета проводятся исследования движения автомобильных кранов в транспортном состоянии. Объект исследования – автомобильный кран КС-35715 производства ОАО «Автокран», г. Иваново (рис. 1).



Рис. 1. Автомобильный кран КС-35715

Автомобильный кран является континуальной системой с непрерывно распределенными параметрами масс и жесткостей и бесконечным числом степеней свободы. Дискретизация конструкции позволяет построить модель исходной системы путем приведения ее к совокупности отдельных элементов с дискретно-континуальными параметрами масс и жесткостей, связанных между собой в точках – узлах. Перемещения узлов принимаются за обобщенные координаты системы и характеризуют перемещения системы в целом. Полученная таким образом модель имеет конечное число степеней свободы. Основная цель динамического анализа заключается в определении характера изменения во времени перемещений системы под действием заданной переменной нагрузки. В расчетной практике задача сводится к анализу временных функций изменения состояния выбранных элементов системы. Математическое моделирование динамических процессов в системе позволяет определить взаимосвязанность колебаний в крановой системе с вертикальными колебаниями поддрессоренной массы на упругих элементах подвески и шинах.

На рис. 2 изображена скелетная схема расчетно-динамической конечно-элементной модели автомобильного крана КС-35715 грузоподъемностью 15 т в транспортном состоянии. Количество узлов модели $u = 180$, количество конечных элементов $n = 274$, число степеней свободы $7 \times u = 1260$.

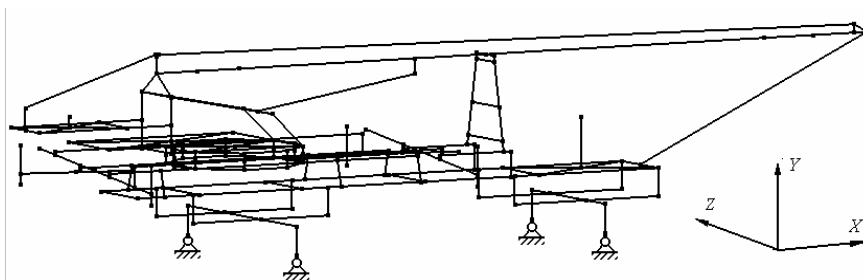


Рис. 2. Конечно-элементная расчетно-динамическая модель автомобильного крана КС-35715

Для верификации результатов предложенной методологии расчета на натурном кране КС-35715 было проведено экспериментальное исследование влияния неровностей дорожного полотна на металлоконструкции. Автомобильный кран перемещался прямолинейно с различными линейными скоростями по участку дороги с заранее известными неровностями профиля (рис. 3–5). Во время движения крана регистрировались линейные ускорения нескольких точек расчетных элементов металлоконструкций крана.



Рис. 3. Экспериментальное исследование автомобильного крана КС-35715 (кран перемещается по искусственным дорожным неровностям, расположенным в шахматном порядке)

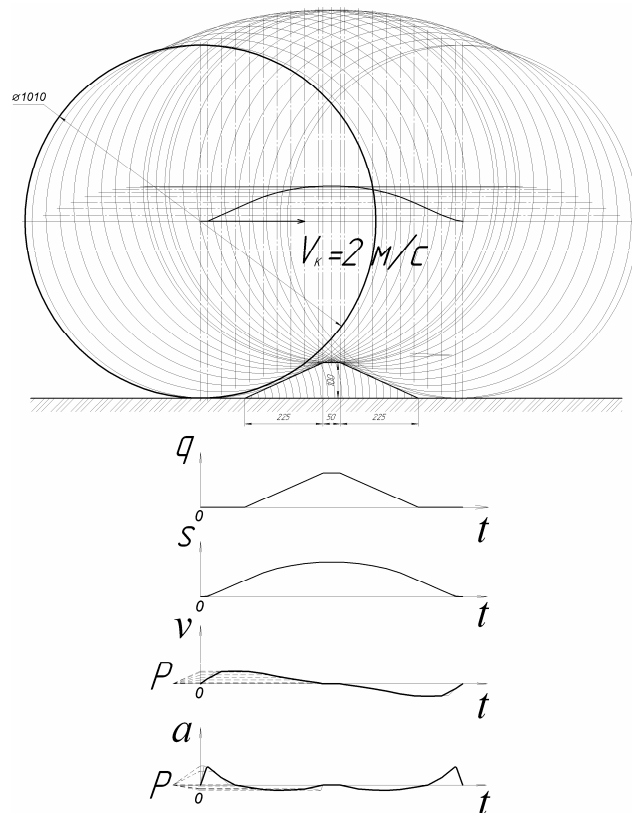


Рис. 4. Закон движения оси колеса

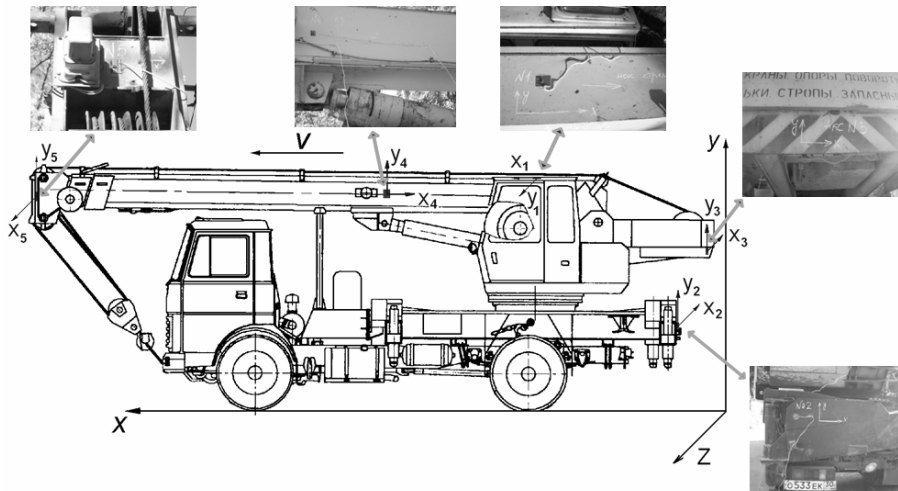


Рис. 5. Схема размещения акселерометров на автокране КС-35715

Переносная измерительная система включает в свой состав портативный компьютер типа Notebook, внешний модуль на шину USB E14-440, к которому подключаются средства измерения. Модуль E14-440 – современное универсальное программно-аппаратное устройство для использования со стандартной последовательной шиной USB, предназначен для построения многоканальных измерительных систем ввода, вывода и обработки аналоговой и цифровой информации в составе персональных IBM-совместимых компьютеров. Электрические аналоговые сигналы со средств измерения подаются на аналоговые входы модуля E14-440, обрабатываются, и через шину USB цифровые сигналы поступают в портативный компьютер типа Notebook. Регистрация сигналов осуществляется с помощью поставляемой с модулем программы многоканального самописца-регистратора PowerGraph. Для измерения линейных ускорений узлов металлоконструкций автомобильных стреловых самоходных кранов в транспортном состоянии используются 2-осевые интегральные акселерометры типа ADXL250AQC (рис. 6), выпускаемые компанией Analog Devices, Inc.

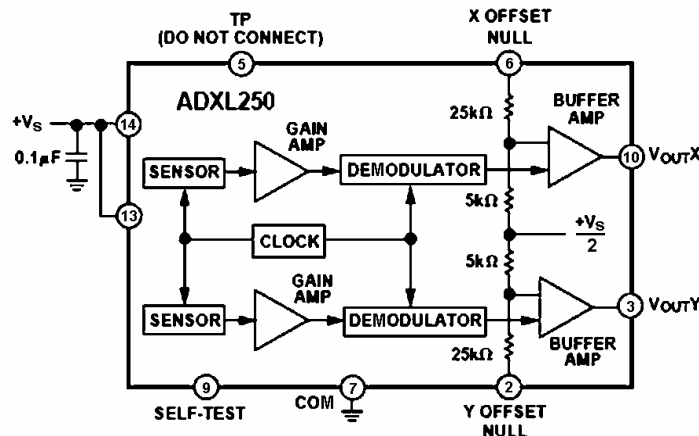


Рис. 6. Схема электрическая принципиальная интегрального акселерометра типа ADXL250AQC

Весь кристалл акселерометра занят главным образом схемами формирования сигнала, которые окружают миниатюрный датчик ускорения, расположенный в его центре. Датчик (Sensor) представляет собой дифференциальную конденсаторную структуру с воздушным диэлектриком, обкладки которого вырезаны (вытравлены) из плоского куска поликремниевой пленки. Неподвижные обкладки этого конденсатора представляют собой простые консольные стержни, расположенные на небольшой высоте от поверхности кристалла в воздухе на поликремниевых стол-

биках-анкерах, приваренных к кристаллу на молекулярном уровне. Инерционная масса датчика ускорения при изменении скорости перемещения кристалла смещается относительно остальной части кристалла. В результате этого относительного перемещения соответствующие расстояния становятся неодинаковыми, и емкости между подвижной обкладкой и каждой из неподвижных обкладок изменяются.

Противофазные сигналы прямоугольной формы частотой 1 МГц одинаковой амплитуды подаются от генератора (Clock) соответственно на внешние обкладки дифференциальной конденсаторной структуры. Емкости между неподвижными и подвижной обкладками при отсутствии ускорения одинаковы, поэтому на подвижную обкладку передаются сигналы одинаковой амплитуды. Разностный сигнал, поступающий на вход повторителя, равен нулю. При ускорении датчика разностный сигнал не равен нулю, причем его амплитуда зависит от величины смещения подвижной обкладки, а фаза определяется знаком ускорения. Фазочувствительный демодулятор (Demodulator) преобразует этот сигнал в низкочастотный (полосой от 0 до 1 000 Гц), характеризующий величину и знак ускорения. Это напряжение поступает на предусилитель, с выхода которого сигнал идет на внешний вывод интегральной микросхемы. Используемый акселерометр рассчитан на максимальное ускорение по обеим осям ± 50 g. Чувствительность акселерометра 38 мВ/g.

Каждый акселерометр устанавливается на отдельную одностороннюю печатную плату, которая крепится к исследуемым узлам металлоконструкций клеем. Радиус зоны установки акселерометров относительно портативного компьютера и модуля E14-440 около 10 м. Питание интегрального акселерометра осуществляется от автономного источника постоянного напряжения $V_s = 5$ В. Подключение датчиков выполняется по схеме, изображенной на рис. 7.

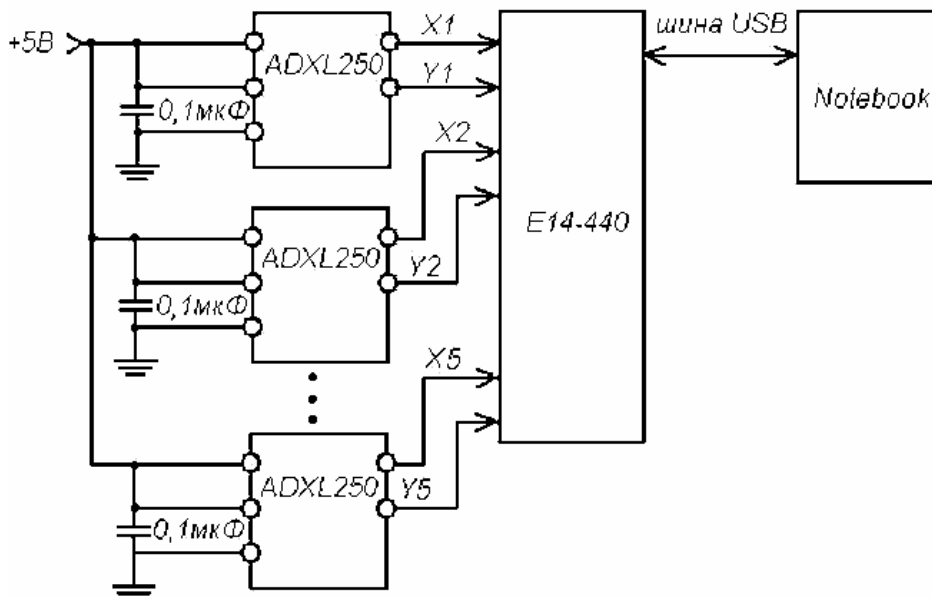


Рис. 7. Схема электрическая функциональная переносной измерительной системы для измерения линейных ускорений

Описанная измерительная система является портативной. Питание компьютера типа Notebook осуществляется от встроенного аккумулятора. Модуль E14-440 питается через шину USB от компьютера. На рис. 8–12 представлены результаты эксперимента при движении автокрана со скоростью 2 м/с по искусственным дорожным неровностям, расположенным в шахматном порядке.

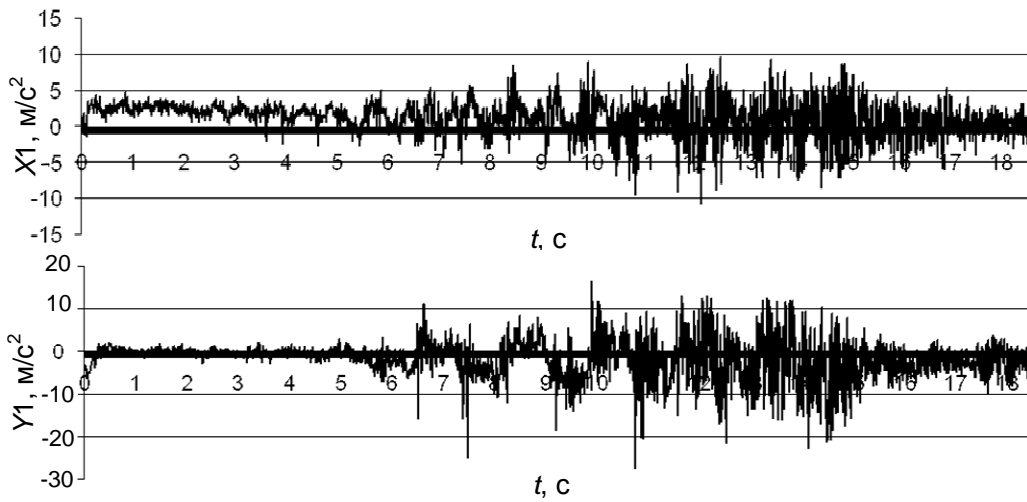


Рис. 8. Ускорения по осям X1 и Y1, снятые с акселерометра № 1 (см. рис. 5)

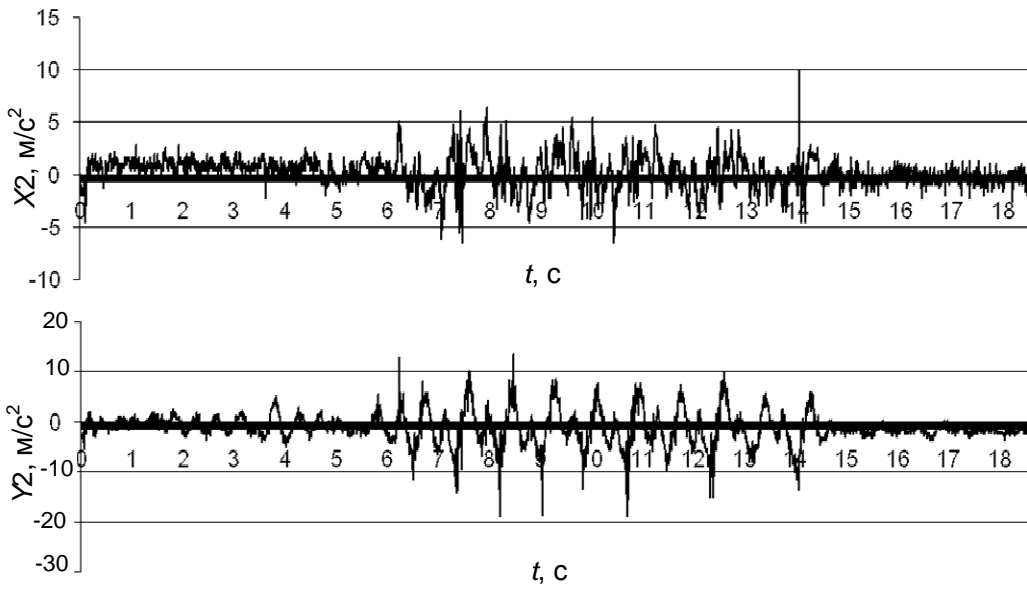


Рис. 9. Ускорения по осям X2 и Y2, снятые с акселерометра № 2 (см. рис. 5)

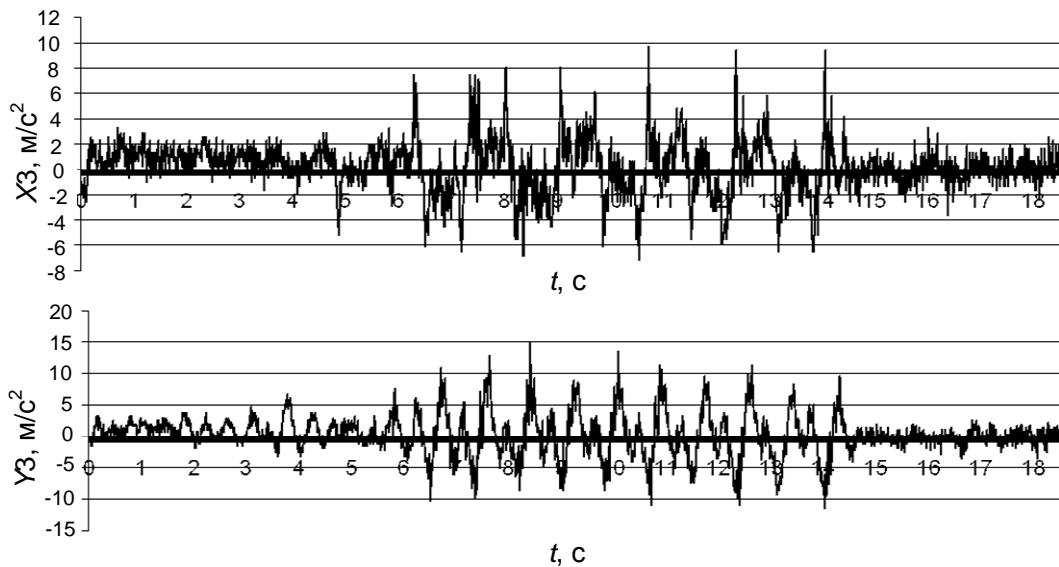


Рис. 10. Ускорения по осям X3 и Y3, снятые с акселерометра № 3 (см. рис. 5)

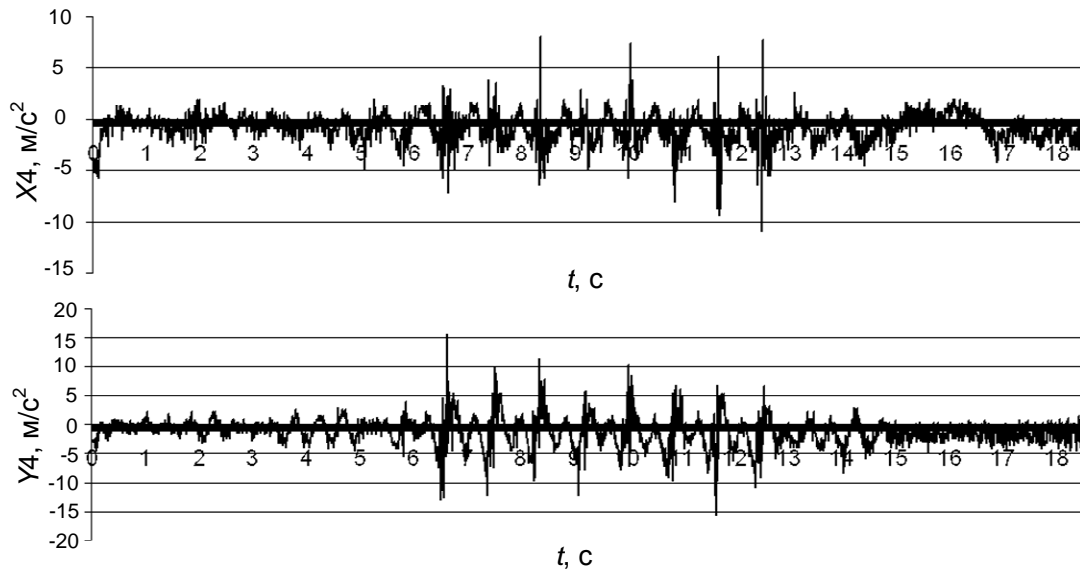


Рис. 11. Ускорения по осям X4 и Y4, снятые с акселерометра № 4 (см. рис. 5)

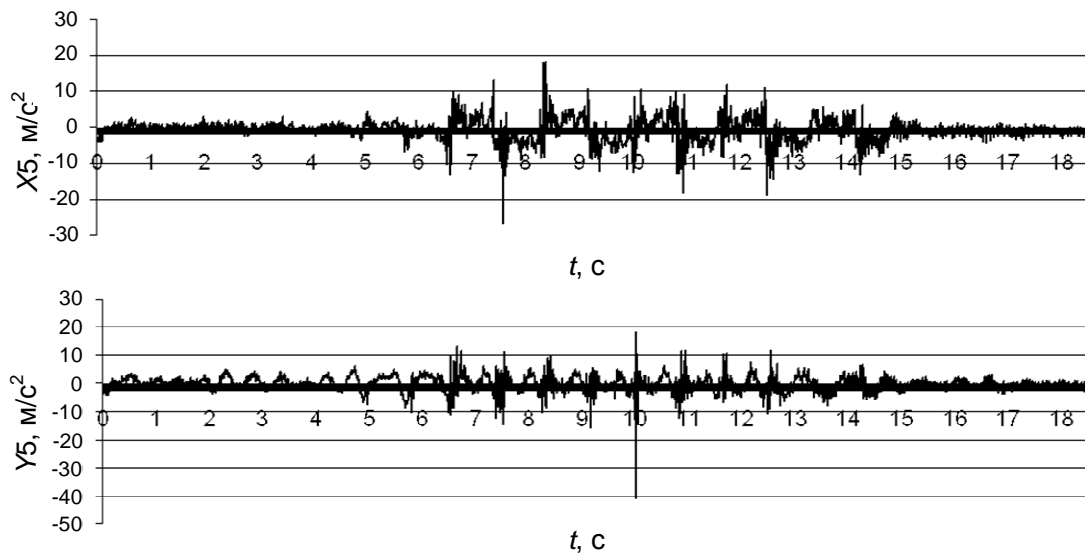


Рис. 12. Ускорения по осям X5 и Y5, снятые с акселерометра № 5 (см. рис. 5)

Рассмотренный экспериментальный метод исследования колебаний (акселерометрирование) подтверждает результаты вычислительного эксперимента с точностью до 20 %. Это делает возможным использование предложенной методологии для расчета металлоконструкций автомобильных кранов в транспортном состоянии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Проектирование полноприводных колесных машин* / Б. А. Афанасьев, Б. Н. Белоусов, Л. Ф. Жеглов, В. Н. Зузов, А. А. Полунгян, А. Б. Фоминых, В. С. Цыбин / под ред. А. А. Полунгяна. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999. – 488 с.
2. *Панасенко Н. Н.* Динамика и сейсмостойкость подъемно-транспортного оборудования атомных станций: дис. ... д-ра техн. наук. – Волгоград, 1992. – 475 с.

REFERENCES

1. Afanas'ev B. A., Belousov B. N., Zheglov L. F., Zuzov V. N., Polungian A. A., Fominykh A. B., Tsybin V. S. *Proektirovanie polnoprivodnykh kolesnykh mashin* [Designing of four-wheel drive machines] / pod red. A. A. Polungiana. Moscow, MG TU im. N. E. Bauman Publ., 1999. 488 p.

2. Panasenko N. N. *Dinamika i seismostoikost' pod"emno-transportnogo oborudovaniia atomnykh stantsii*: Dis. ... d-ra tekhn. nauk [Dynamics and earthquake resistance of lifting-and-shifting machinery of atomic stations. Dr. tech. sci. diss.]. Volgodonsk, VI NGTU, 1992. 475 p.

Статья поступила в редакцию 19.11.2012

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Хахов Алексей Алексеевич – Астраханский государственный технический университет; старший преподаватель кафедры «Подъемно-транспортные машины, производственная логистика и механика машин»; halax@mail.ru.

Нахов Alexey Alekseevich – Astrakhan State Technical University; Senior Lecturer of the Department "Lifting-and-Shifting Machines, Industrial Logistics and Machinery Mechanics"; halax@mail.ru.