

УДК 624.042

НОВЫЕ ЗАДАЧИ ДИНАМИКИ СООРУЖЕНИЙ ПРИ ДИАГНОСТИКЕ И МОНИТОРИНГЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ

КУЛЯБКО В.В. ^{1*}, *д.т.н, проф.*,
ЧАБАН В.П. ², *к.т.н.*
КОВТУН-ГОРБАЧОВА Т.А. ³, *к.т.н.*

^{1*} Кафедра металлических и деревянных конструкций, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24а, 49600, г. Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 46-01-69, e-mail: kulyabko-vv@mail.ru; ORCID ID: 0000-0003-0044-4704

² ЧП НПП «Днепропетровский научно-исследовательский институт строительного производства», пр. Гагарина, 115, оф. 20, 49050, г. Днепропетровск, Украина, тел. +38 (096) 537-47-78, e-mail: Vpchl@ukr.net

³ Кафедра металлических и деревянных конструкций, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24а, 49600, г. Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 46-01-69

Аннотация. *Цель.* Поиск наиболее актуальных задач и способов использования динамических расчетов и динамических характеристик – как способа диагностики и оценки технического состояния строительных объектов. *Методика.* Предлагается использование комплекса теоретических и экспериментальных исследований и работ: применение программных комплексов с использованием метода конечных элементов (МКЭ); составление систем дифференциальных уравнений линейных и нелинейных колебаний статико-динамических моделей сооружений и решение их численными методами; экспериментальные методы измерения уровней колебаний, лабораторное тестирование виброизмерительной аппаратуры. *Результаты.* До недавнего времени результаты динамических испытаний по указаниям нормативов входили в перечень работ по проведению специальных обследований. В существующих нормативах по проектированию и расчетам сооружений динамические характеристики не связаны с диагностикой сооружений. Проведение полного или выборочного обследования с затрудненным доступом к нераскрытым узлам и поверхностям требует огромных затрат сил и средств, измерительно-приборной базы, высококвалифицированных кадров. В этой связи следует развивать возможности такого, например, варианта неразрушающих методов контроля, как натурные вибродинамические испытания – которые позволят по величинам динамических откликов (частоты и формы, амплитуды колебаний) определить наличие возможных повреждений (и даже локализовать их местоположение). Этот способ, в-первых, является количественной оценкой и некоторым образом характеризует качество технического состояния отдельных конструктивных элементов и сооружения в целом. На базе конкретных задач по обследованию промышленных и других сооружений создавались такие варианты динамических паспортов: вибротехнологический; виброэкологический; сейсмодинамический (в т.ч. – в задачах промышленной, городской и транспортной сейсмике) и др. Авторами созданы эффективные методики проведения теоретических исследований линейных и нелинейных колебаний сооружений с различными демфирующими устройствами. *Научная новизна.* Приведенные результаты и методики использования комплексного подхода к диагностике сооружений - с учетом нелинейностей в моделях (а также присоединенных устройств для снижения уровня колебаний) получены и применены впервые. *Практическая значимость.* Данные методики позволяют выполнять вибродинамическую диагностику строительных объектов, что является альтернативным (обычному обследованию) способом. Данная методика применена на ряде сложных строительных объектов.

Ключевые слова: диагностика; строительные конструкции; здания и сооружения; динамический паспорт.

НОВІ ЗАВДАННЯ ДИНАМІКИ СПОРУД ПРИ ДІАГНОСТИЦІ І МОНИТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ КОНСТРУКЦІЙ

КУЛЯБКО В.В. ^{1*}, *д.т.н, проф.*,
ЧАБАН В.П. ², *к.т.н.*
КОВТУН-ГОРБАЧОВА Т.А. ³, *к.т.н.*

^{1*} Кафедра металевих та дерев'яних конструкцій, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, +38 (0562) 46-01-69, e-mail: kulyabko-vv@mail.ru; ORCID ID: 0000-0003-0044-4704

² ЧП НВП «Дніпропетровський науково-дослідницький інститут будівельного виробництва», пр. Гагаріна, 115, оф. 20, 49050, м. Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (096) 537-47-78, e-mail: Vpchl@ukr.net

³ Кафедра металевих та дерев'яних конструкцій, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, +38 (0562) 46-01-69

Анотація. Мета. Пошук найбільш актуальних завдань і способів використання динамічних розрахунків і динамічних характеристик - як способу діагностики й оцінки технічного стану будівельних об'єктів. **Методика.** Пропонується використання комплексу теоретичних і експериментальних досліджень і робіт: застосування програмних комплексів з використанням методу кінцевих елементів (МКЕ); складання систем диференціальних рівнянь лінійних і нелінійних коливань статико-динамічних моделей споруд і рішення їх чисельними методами; експериментальні методи виміру рівнів коливань, лабораторне тестування вібровимірювальної апаратури. **Результати.** Донедавна результати динамічних випробувань по вказівках нормативів входили в перелік робіт із проведення спеціальних обстежень. В існуючих нормативах по проектуванню й розрахункам споруд динамічні характеристики не пов'язані з діагностикою споруд. Проведення повного або вибіркового обстеження з утрудненим доступом до нерозкритих вузлів і поверхонь вимагає величезних витрат сил і засобів, вимірювально-приладової бази, висококваліфікованих кадрів. У цьому зв'язку варто розвивати можливість такого, наприклад, варіанта неруйнуючих методів контролю, як натурні вібродинамічне випробування - які дозволять по величинах динамічних відгуків (частоти й форми, амплітуди коливань) визначити наявність можливих ушкоджень (і навіть локалізувати їхнє місце розташування). Цей спосіб, по-перше, є кількісною оцінкою й деяким чином характеризує якість технічного стану окремих конструктивних елементів і споруди в цілому. На базі конкретних завдань по обстеженню промислових і інших споруд створювалися такі варіанти динамічних паспортів: вібротехнологічний; віброекологічний; сейсmodинамічний (у т.ч. - у завданнях промислової, міської й транспортної сейсміки) і ін. Авторами створені ефективні методики проведення теоретичних досліджень лінійних і нелінійних коливань споруд із різними пристроями, що демпфують. **Наукова новизна.** Наведені результати й методики використання комплексного підходу до діагностики споруд - з врахуванням нелінійностей у моделях (а також приєднаних пристроїв для зниження рівня коливань) отримані й застосовані вперше. **Практична значимість.** Дані методики дозволяють виконувати вібродинамічну діагностику будівельних об'єктів, що є альтернативним (звичайному обстеженню) способом. Дана методика застосована на ряді складних будівельних об'єктів.

Ключові слова: автоматична локомотивна сигналізація; завади; критерій виявлення та розрізнення сигналів; узгоджений фільтр

NEW PROBLEMS OF STRUCTURAL DYNAMICS IN THE DIAGNOSIS AND MONITORING OF TECHNICAL STATE OF CONSTRUCTIONS

KULYABKO V.V. ^{1*}, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*
 CHABAN V. P. ², *Cand. Sc. (Tech.)*
 KOVTUN-GORBACHOVA T.A. ³, *Cand. Sc. (Tech.)*

^{1*} Department of Steel and Wood Constructions, State Higher Education Establishment "Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, phone +38 (0562) 46-01-69, e-mail: kulyabko-vv@mail.ru; ORCID ID: 0000-0003-0044-4704

² ChP NPP "Dnepropetrovsk Scientific-Research Institute of construction production", Gagarin avenue, 115, ap. 20, Dnipropetrovsk 49050, Ukraine phone. +38 (096) 537-47-78, e-mail: Vpchl@ukr.net

³ Department of Steel and Wood Constructions, State Higher Education Establishment "Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, phone +38 (0562) 46-01-69

Abstract. Purpose. Search for the most urgent tasks, and how to use dynamic analysis and dynamic performance - as a way to diagnose and evaluate the technical condition of construction sites. **Methodology.** It is proposed to use the complex theoretical and experimental research and work: the use of software systems using the finite element method (FEM); compilation of systems of differential equations of linear and nonlinear oscillations of the static-dynamic models of buildings and their numerical solution methods; experimental methods for measuring vibration level, vibration measurement laboratory testing equipment. **Findings.** Until recently, the results of dynamic tests on the instructions of standards included in the list of works of special surveys. The existing regulations on the design and calculation of dynamic characteristics of structures not connected with diagnostics facilities. A complete sample survey or with difficult access to undiscovered sites and surface requires enormous effort and resources, measurement and instrument base, highly qualified personnel. In this connection, it should develop the capacity of such, for example, variants of non-destructive methods of control as vibrodynamic situ tests - which will allow for the values of the dynamic response (frequency and form, the oscillation amplitude) to determine possible damage (and even locate their location). This method is, firstly, a quantitative assessment and characterizes some quality of the technical state of the individual components and structures in general. On the basis of specific targets for inspection of industrial and other structures set up such options of dynamic passports: vibrotechnologic; vibroekologic; seismodynamic (including - in the problems of industrial, urban transport and seismic), and others. The authors developed effective methods of theoretical studies of linear and nonlinear vibrations of structures with different damping devices. **Originality.** The results and

methods of use of an integrated approach to the diagnosis of structures - taking into account the non-linearities in the model (as well as the connected devices to reduce fluctuations) were obtained and used for the first time. **Practical value.** These methods allow you to perform diagnostics vibrodynamic construction projects, which is an alternative (conventional survey) method. This methodology is applied in a number of complex building projects.

Keywords: diagnostics; building construction; building and construction; dynamic passport

Введение

Состояние строительных конструкций промышленных зданий и сооружений, в частности, в Украине оставляет желать лучшего – с позиции наличия дефектов, накопления повреждений, выработки срока службы, морального износа.

Для недопущения отказов строительных конструкций и появления аварийных ситуаций законодательной базой Украины предусмотрено проведение комплекса работ по осмотрам, обследованиям (на стадиях первичного, детального и специального), диагностике и мониторингу. Выполнение этих работ предусмотрено нормативом [1].

Однако, на сегодняшний день норматив [1] (а также все сопутствующие ему документы) отменен - т.е. может использоваться лишь как справочный материал. При этом новые нормативы (национальные стандарты) так и не были введены в действие. Поэтому, вопросы обследования и диагностики (в т.ч. – и проверочные расчеты на динамические нагрузки, а также проведение вибродинамических испытаний при специальных обследованиях) нормативно не урегулированы.

Причем заметим, что в Украине уже введены в действие некоторые гармонизированные европейские стандарты проектирования. Поэтому, очевидно, стоит готовиться к введению европейских подходов по оценке и использованию динамических характеристик сооружений (например, [5]).

Цель

Известно, что прямая задача теории сооружений – расчеты на различные воздействия, в т.ч. динамические (ветер, землетрясения, работа транспорта, машин и оборудования с динамическими нагрузками). В данной работе авторами в качестве **цели** сделана попытка поиска наиболее актуальных задач и способов использования динамических расчетов и динамических характеристик – как способа диагностики и оценки технического состояния строительных объектов.

Методика

Предлагается использование комплекса теоретических и экспериментальных исследований и работ:

- применение программных комплексов с использованием метода конечных элементов (МКЭ);

- составление систем дифференциальных уравнений линейных и нелинейных колебаний статико-динамических моделей сооружений и решение их численными методами;

- экспериментальные методы измерения уровней колебаний, лабораторное тестирование виброизмерительной аппаратуры.

Результаты

До недавнего времени результаты динамических испытаний по указаниям нормативов [1] входили в перечень работ по проведению специальных обследований.

К сожалению, на сегодняшний день нормативная база по диагностике и мониторингу строительных объектов не соответствует современным требованиям. Нормативные документы [1] отменены (как уже указывалось выше). А в существующих нормативах по проектированию и расчетам сооружений (например, [2-3]) динамические характеристики не связаны с диагностикой сооружений.

Поэтому легко себе представить трудности специалистов, проводящих обследование крупного сооружения (с большими пролетами или высотами). Например, проведение полного или выборочного обследования с затрудненным доступом к нераскрытым узлам и поверхностям требует огромных затрат сил и средств, измерительно-приборной базы, высококвалифицированных кадров.

В этой связи следует развивать возможности такого, например, варианта неразрушающих методов контроля, как натурные вибродинамические испытания – которые позволят по величинам динамических откликов (частоты и формы, амплитуды колебаний) определить наличие возможных повреждений (и даже локализовать их местоположение) – см. например, данные [6]. Этот способ, во-первых, является **количественной оценкой** и некоторым образом характеризует качество технического состояния отдельных конструктивных элементов и сооружения в целом.

Авторы занимаются пропагандой и практикой таких испытаний уже более 20 лет. На базе конкретных задач по обследованию промышленных и других сооружений создавались такие варианты динамических паспортов: вибротехнологический; виброэкологический; сейсmodинамический (в т.ч. – в задачах промышленной, городской и транспортной сейсмике) и др. Эти работы нашли воплощение в литературе [6], в т.ч. – в нормативах [4] и патентах.

За последние 40 лет авторами были созданы эффективные методики проведения теоретических исследований линейных и нелинейных колебаний сооружений с различными демпфирующими устройствами [7-9]. Например, на наш взгляд, являются пилотными конструкциями (с методиками их расчета): узел соединения гибких оттяжек с жесткими элементами (40435 – патент Украины на полезную модель); способ гашения основного тона изгибных колебаний жесткой ошиновки (40431); гаситель изгибных колебаний (40434); струнный демпфер для гашения изгибных колебаний при ветровом резонансе трубы (40099); аэродинамический способ гашения изгибных колебаний при ветровом резонансе трубы (40094).

Научная новизна и практическая значимость

Приведенные результаты и методики использования комплексного подхода к диагностике сооружений - с учетом 4-х типов нелинейностей в моделях (а также присоединенных устройств для снижения уровня колебаний) получены и применены впервые. Данные методики позволяют выполнять вибродинамическую диагностику строительных объектов, что является альтернативным (обычному обследованию) способом.

Данная методика применена на ряде сложных строительных объектов.

Выводы

Авторы (на основании собственного многолетнего опыта работы в научной и инженерной областях) считают, что на сегодняшний день наиболее существенными задачами являются следующие направления (находящиеся на стыке сугубо научных и сугубо инженерных задач), которые необходимо внедрять в образовательный процесс, нормативы и инженерную практику:

1. Вибродинамическое обследование; комплексные испытания и паспортизация; мониторинг состояния строительных объектов и территорий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. НПАОП 45.2-1.01-98. Правила обстеження, оцінки технічного стану і паспортизації виробничих будівель і споруд. №423/2863-426/2866. – К.: Держкомітет будівництва, архітектури та житлової політики України, 1999. – 36 с.

НПАОР 45.2-1.01-98. Pravila obstege, ocinki tekhnichnogo stanu s pasportyzaciy vrobnychykh budivel ta sporud [Rules survey assessing the technical condition and certification of industrial buildings and structures]. №423/2863-426/2866. Kiev, State Committee of Construction, Architecture and Residential Policy of Ukraine, 1999. 36 h.

2. Поиск рациональных форм и параметров сооружений на предпроектной стадии - формообразование с позиции влияния динамических характеристик на показатели прочности (в т.ч. – показатели выносливости), жесткости, комфорта, безопасности.

3. Разработка дополнительных алгоритмов и методик альтернативных блоков и версий вычислительных программных комплексов (ПК) с целью усовершенствования способов моделирования конструкций и сред на основе нелинейных динамических расчетов во временной области.

4. Выполнение нелинейных прямых динамических расчетов объектов (зданий и сооружений), воспринимающих различные динамические нагрузки: ветер, землетрясения, работа транспорта, машин и оборудования с динамическими нагрузками – с учетом взаимодействия нагрузки и объекта.

5. Разработка принципиально новых (на основании патентного поиска) конструкций с расчетным обоснованием нелинейных виброзащитных схем и инженерных решений сооружений, снижающих уровни колебаний.

6. Создание инженерных Пособий по конструированию и расчетам, а также Инструкций по эксплуатации и контролю эффективности дополнительных демпфирующих устройств.

7. Разработка программ проведения динамических (полномасштабных натурных или лабораторных) испытаний. Создание проектов лабораторных стендов и устройств (расчеты их рациональных схем и параметров). Создание виртуальных лабораторий и тренажеров, учебников для инженерных курсов и работников служб надзора и чрезвычайных ситуаций.

8. Разработка аналитических обзоров, инженерных Пособий и Рекомендаций по динамическим расчетам, конструированию, проведению динамических испытаний, паспортизации и динамическому мониторингу сооружений и зонингу территорий для решения задач Норм, Кодов, работ ТС ISO и над иными видами инженерного творчества (например - статьи, монографии, нормативы, работы по совместным грантам).

2. ДБН В.1.2-2:2006. Нагрузки и воздействия. - К.: Минстрой Украины, 2006. – 60 с.

DBN B.1.2-2:2006. Nagruzki i vozdeystviya [Loads and impacts]. Kiev, Ministry of Construction of Ukraine, 2006. 60 P.

3. ДБН В.1.1-12:2014. Будівництво у сейсмічних районах України. – К.: Мінрегіонбуд України, 2014. – 110 с.

DBN B.1.1-12:2014. Budivnytstvo v seismichnykh rajonakh Ukrainy [Construction in seismic regions of Ukraine]. Kiev, Ministry of Regional Construction of Ukraine, 2014. 110 P.

4. СОУ ЕЕ 00.000:2006. Загальні технічні вимоги до проектування та експлуатації конструкцій жорсткої

ошиновки у відкритих розподільчих установках напругою від 110 до 750кВ. – К.: Міністерство палива та енергетики України, 2009. – 25 с.

SOU EE 00.000:2006. Zagalni tehnicni vymogy do projektuvannya ta ekspluatatsiy konstrukciy jorskoї oshinovki u vidkrytykh rozpodilchikh ustanovkakh naprugoyu vid 110 do 750 kV [General technical requirements for the design and operation of structures rigid stub in open distribution facilities voltage from 110 to 750 kW]. Kiev, Ministry of Fuel and Energy of Ukraine, 2009. 25 p.

5. Mechanical vibration and shock. Vibration of fixed structures : ISO 4866:2010 (ISO 4866:1990/Amd.1:1994. Mechanical vibration and shock – Vibration of buildings) // Guidelines for the measurements of vibration and evaluation of their effects on structures. – 48 p.

Mechanical vibration and shock. Vibration of fixed structures : ISO 4866:2010 (ISO 4866:1990/Amd.1:1994. Mechanical vibration and shock – Vibration of buildings) // Guidelines for the measurements of vibration and evaluation of their effects on structures. 48 p.

6. Казакевич М.И., Кулябко В.В. Введение в виброэкологию. – Днепропетровск: ПГАСиА, 1996. - 199 с.

Kazakevitch M.I., Kulyabko V.V. Vvedenie v vibroekologiyu [Introduction to vibroekology]. Dnepropetrovsk, PSACEA Publ., 1996. 199 p.

7. V.V. Kulyabko, D.S. Yaroshenko. Interaction of type constructions with Tuned Mass Dampers and the damping devices having nonlinear elastic and dissipative characteristics / Proc. of the 4th Intern. Conf. “Nonlinear Dynamics – 2013”,

June 19-22, 2013, Sevastopol. ХПИ, ИМ НАНУ (Ukraine), McGill University (Montreal, Canada): Вид-во «Точка», 2013. – pp. 99-104.

V.V. Kulyabko, D.S. Yaroshenko. Interaction of type constructions with Tuned Mass Dampers and the damping devices having nonlinear elastic and dissipative characteristics / Proc. of the 4th Intern. Conf. “Nonlinear Dynamics – 2013”, June 19-22, 2013, Sevastopol. McGill University (Montreal, Canada). «Точка» Publ., 2013. pp. 99-104.

8. Кулябко В.В. Динамика сооружений – прошлое, настоящее и будущее / LAP LAMBERT Academic Publishing (Germany), 2014. - 164 с.

Kulyabko V.V. Dynamika soorugeniy – proshloe, nastoyashee i budushee [The dynamics of structures - past, present and future]. / LAP LAMBERT Academic Publishing (Germany), 2014. 164 p.

9. Кулябко В.В., Ярошенко Д.С. Об эффективности способов гашения колебаний сооружений / Зб. наук. праць Полтавський націон. технічний університет ім. Ю.Кондратюка. – Вип. 2 (32), т. 2. – Полтава: ПолтНТУ, 2012. – С. 204-212.

Kulyabko V.V., Yaroshenko D.S. Ob effektivnosti sposobov gasheniya kolebaniy soorugeniy [The effectiveness of methods of vibration damping structures] / Zbirnyk naukovykh prac of Poltavskiy nacion. nekhnichnyy universitet im. U. Kondratuka [Collection of scientific papers]Poltava National University named after U. Kondratuk], 2012, issue 2 (32), pp. 204-212.

Статья поступила в редколлегию 11.08.2015