

Инновационный подход к разработке систем ударо- и виброзащиты на основе эластомерных энергопоглощающих элементов

Innovative approach to the development of shock and vibration protection systems based on elastomeric energy-absorbing elements



Т. В. Сидоренко,
аспирант,
ведущий инженер-конструктор
✉ Timofey.HCDnko@yandex.ru

T. V. Sidorenko,
postgraduate student,
leading design engineer



Д. К. Щеглов,
к.т.н., доцент
✉ _dk@bk.ru

D. K. Shcheglov,
Associate Professor

*Акционерное общество «Северо-Западный региональный центр Концерна ВКО «Алмаз — Антей» — Обуховский завод»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Балтийский государственный
технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Российская Федерация*

*Joint-Stock Company «North-West Regional Center of Concern VKO Almaz — Antey — Obukhov Plant», Saint Petersburg, Russian Federation
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Baltic State Technical University “VOENMEKH” named after D.F. Ustinov,
Saint Petersburg, Russian Federation*

Рассмотрены актуальные вопросы проектирования современных систем ударо- и виброзащиты (СУВЗ), а также применяемых в них энергопоглощающих устройств (ЭУ). Постановлена задача разработки универсального научно-методического аппарата для автоматизации проектирования СУВЗ на основе эластомерных энергопоглощающих элементов. Предложен инновационный подход к синтезу СУВЗ с применением современных технологий объектно-ориентированного анализа, проектирования и моделирования. Рассмотрен вариант реализации предлагаемого подхода для синтеза облика и определения параметров СУВЗ и ЭУ.

The study addresses the current issues of designing modern shock and vibration protection systems (SVPS), as well as the energy-absorbing devices (EADs) used in them. The task is set to develop a universal scientific and methodological apparatus for automating the design of SVPS based on elastomeric energy-absorbing elements. An innovative approach to SVPS synthesis using modern object-oriented analysis, design, and modeling technologies is proposed. A variant of implementing the proposed approach for the synthesis of the configuration and determination of parameters of SVPS and EAD is considered.

Ключевые слова: синтез облика, система амортизации, энергопоглощающее устройство, демпфер, оптимизация, инженерное программное обеспечение, математическое моделирование, машинное обучение.

Keywords: configuration synthesis, damping system, energy-absorbing device, damper, optimization, engineering software, mathematical modeling, machinelearning.

Мягкость нельзя сломить!

Брюс Ли, мастер восточных единоборств

Введение

В настоящее время наблюдается резкое ускорение процесса создания и распространения новых технологий, в том числе цифровых, способных резко менять рынки и производственные системы. Это открывает новые возможности для ускорения инновационно-ориентированного роста и технологического развития Российской Федерации [1]. Важнейшим элементом цифровой трансформации промышленности, прежде всего машиностроения, на этапе разработки инновационной продукции является внедрение технологий компьютерного и суперкомпьютерного моделирования и «умных» цифровых моделей (цифровых двойников), создаваемых с учётом целевых характеристик продуктов с последующим проведением виртуальных испытаний, обеспечивая возможность выпуска в кратчайшие сроки глобально конкурентоспособной кастомизированной продукции [2,3].

При проектировании сложных наукоемких изделий часто возникает задача разработки систем уда-

ро- и виброзащиты (СУВЗ) оборудования, которое может иметь существенные ограничения по допустимой величине приходящих на него внешних воздействий [4,5]. При этом, разработка таких систем может иметь следующие особенности, усложняющие их проектирование.

1. Наличие большого числа требований и ограничений, предъявляемых к таким системам, среди которых целесообразно выделить:

- конструктивные ограничения, прежде всего обусловленные ограничением возможных габаритов и допустимых перемещений защищаемых объектов (ЗО), при этом может возникать противоречие между необходимой жёсткостью СУВЗ и максимально допустимым перемещением ЗО;
- дополнительные ограничения к применяемым материалам, в зависимости от сферы применения (морская, арктическая, космическая техника);
- необходимость обеспечения требований по допустимым уровням воздействий, приходящих на ЗО. При этом несовершенство СУВЗ может

ограничивать номенклатуру применяемого оборудования.

2. Сложность формирования нагрузок и расчётных случаев. Нагрузки для таких систем являются динамическими (вибрация, одиночные или многократные ударные воздействия) и зачастую имеют стохастический характер. Более того, величина приходящих на СУВЗ нагрузок, зависит от сопряжённых конструкций. Как следствие, нередко задача проектирования СУВЗ является совместной с задачей проектирования конструкций.

3. Отсутствует обобщённая методика проектирования СУВЗ. Существующие методики либо привязаны к конкретным объектам техники (включая ограничения к применяемым типам энергопоглощающих устройств), областям применения и схемам расположения устройств. Отсюда разработка объекта техники, не имеющего близких аналогов, потребует разработки новой методики проектирования СУВЗ, включая численное моделирование работы СУВЗ.

4. Отсутствует обобщённая методика проектирования энергопоглощающих устройств (ЭУ). Возможны два подхода по выбору применяемых в СУВЗ ЭУ:

- использование существующих и производимых промышленностью ЭУ, которые имеют ограниченную номенклатуру, и как следствие набор ограниченных возможных характеристик, а также применяемых технологий;
- разработка новых устройств, что потенциально позволяет разрабатывать более совершенные индивидуальные устройства под конкретные условия применения, включая возможность применения в ЭУ инновационных технических решений.

В настоящее время активно развиваются аддитивные технологии, появляются новые современные эластомерные и композиционные материалы, всё большее распространение получают сетчатые конструкции. Разработка новых ЭУ, реализующих инновационные технологии, требует существенных затрат по их проектированию и отработке. Более того, отсутствует возможность быстрой оценки, насколько разработка нового ЭУ будет выгоднее чем применение серийного решения, как с точки зрения достижимых технических характеристик, так и с точки зрения финансовых затрат на разработку.

Постановка задачи

Для проектирования СУВЗ предлагается разработать научно-методический аппарат и сопутствующее математическое и программное обеспечение, позволяющие автоматизировать процесс проектирования СУВЗ и ЭУ, включая возможность:

- задания новых типов конструкций ЭУ, моделей материалов, видов воздействий и схем расположения элементов СУВЗ;
- разработки и интеграции в разработанное программное обеспечение новых методик расчёта;
- решения задачи как параметрического синтеза облика, так и структурного (как для СУВЗ, так и для ЭУ).

Для этого необходимо решить следующие задачи.

1. Разработать модель, обеспечивающую универсальную формализацию основных свойств, характеристик ЭУ, СУВЗ и их компонент, а также методик расчёта их характеристик.

2. Систематизировать методы расчёта характеристик ЭУ и СУВЗ, сформировать рекомендации по их разработке.

3. Разработать методику синтеза оптимального облика ЭУ и СУВЗ, как параметрического, так и структурного.

4. Разработать программное обеспечение, реализующее автоматизацию проектирования СУВЗ и ЭУ, обеспечивающую накопление результатов в базе данных (БД) и использующую ранее полученные результаты при синтезе новых устройств.

Для решения поставленных задач предлагается использовать технологии объектно-ориентированного анализа, проектирования и моделирования [6], а также следовать унифицированному процессу разработки программного обеспечения (*Unified Process*), и в рамках его структуры совместно решать задачу разработки необходимых объектных моделей, математических методов и сопутствующего программного обеспечения.

Объектно-ориентированный анализ

В рамках объектно-ориентированного анализа сформированы и описаны основные прецеденты (*Use Cases*), возникающие при проектировании СУВЗ и ЭУ. На их основе сформирована концептуальная модель предметной области (*domain model, conceptual object model*) и первичные требования, предъявляемые к разрабатываемой методике и программному обеспечению. Пример модели, с указанием основных и наиболее общих объектов предметной области и их взаимодействий, показан на рисунке 1.

Объектно-ориентированный проектирование

На следующем этапе была разработана объектно-ориентированная модель (ООМ) синтеза СУВЗ и ЭУ. Пример диаграммы классов СУВЗ, отражающей основные классы и связи, показан на рисунке 2 (используется нотация UML [7]). Возможные схемы расположения ЭУ, сами ЭУ, расчётные случаи, набор требований и реализации расчётных методов представлены как иерархия классов и связей. В рамках разработанной модели, за счёт применения типовых паттернов проектирования [8], предусмотрена возможность её расширения за счёт добавления новых классов объектов (например, классами, реализующими новые типы воздействий, приходящих на СУВЗ) без перестроения остальных элементов модели. Задание новых типов ЭУ реализовано за счёт создания соответствующих экземпляров класса с заданием им атрибутов, определяющих набор параметров проектирования (параметры назначенных моделей материалов и геометрические размеры в случае параметризованной геометрии) и разработанных расчётных методов определения характеристик ЭУ.

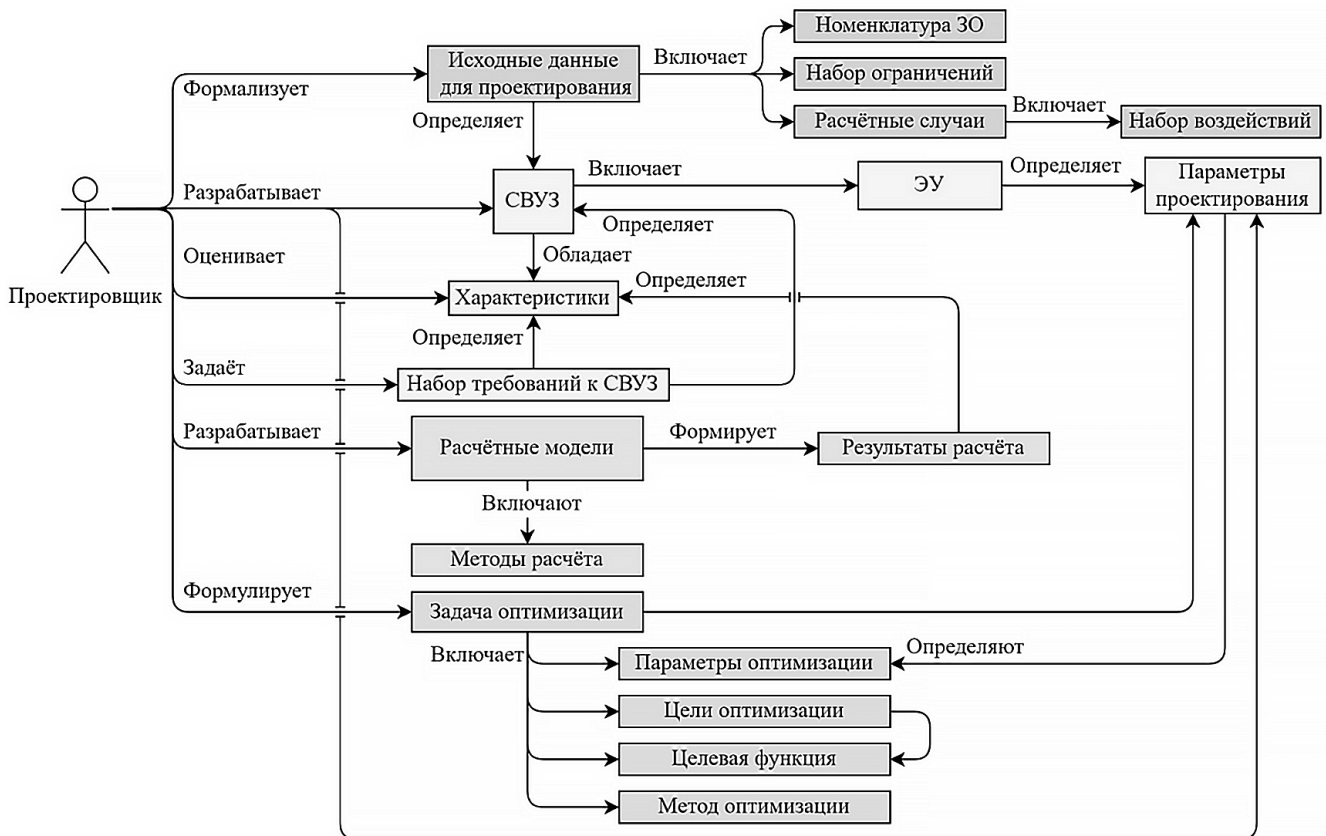


Рис. 1. Концептуальная модель предметной области

Моделирование работы СВУЗ и ЭУ

Для расчёта характеристик СВУЗ и ЭУ в основном используются численные методы. Прежде всего, численные методы решения систем дифференциальных уравнений (СДУ) и метод конечных элементов (МКЭ). Для решения СДУ целесообразно использовать решатели с открытым исходным программным кодом (например, *odepack* [9]). Для решения ряда задач МКЭ, требуются специализированные САЕ-пакеты [10]. Большинство из них имеет API-интерфейс для взаимодействия со сторонними приложениями, позволяющий автоматизировать, как построение конечно-элементных моделей, так и непосредственно проведение вычислений.

Стоит отметить, что определение характеристик сложных СВУЗ и ЭУ МКЭ является вычислительно сложной задачей и может потребовать специализированных вычислительных мощностей. Так, определение силовых и прочностных характеристик даже для достаточно простого рабочего элемента ЭУ теряющего устойчивость при сжатии, требует решения конечно-элементной задачи (рисунок 3) в нелинейной динамической постановке с учётом условий сложных контактных взаимодействий (в том числе условий самоконтакта конечных элементов) при разных скоростях деформирования с достаточной мелкой сеткой. Решение такой задачи в объёмной постановке при сложной нагрузке моментами потребует высокопроизводительных вычислений

(НРС). Более того, решение таких задач нередко имеет плохую сходимость и для получения конечного решения может потребовать отладки модели: множественной отправки на расчёт при разных параметрах и настройках конечно-элементной модели и решателя (например, при разных размерах конечных элементов).

Моделирование СВУЗ МКЭ нередко позволяет упростить задачу заменой ЭУ на специализированные конечные элементы, реализующие характеристики ЭУ (такая задача может быть решена и методами моделирования многотельной динамики, MBD), но задача может значительно усложниться при необходимости моделирования сопряжённых с СВУЗ деформируемых конструкций (например, для подтверждения их прочности или учёта форм колебаний) или необходимости комбинаторного перебора возможных размещений номенклатуры защищаемого оборудования.

Синтез оптимального облика СВУЗ и ЭУ

Задача синтеза оптимального облика СВУЗ и ЭУ может быть записана как общий случай задачи оптимизации

$$f_1(x) \rightarrow \min_{x \in X}, \dots, f_p(x) \rightarrow \min_{x \in X}$$

при следующих ограничениях на множестве X

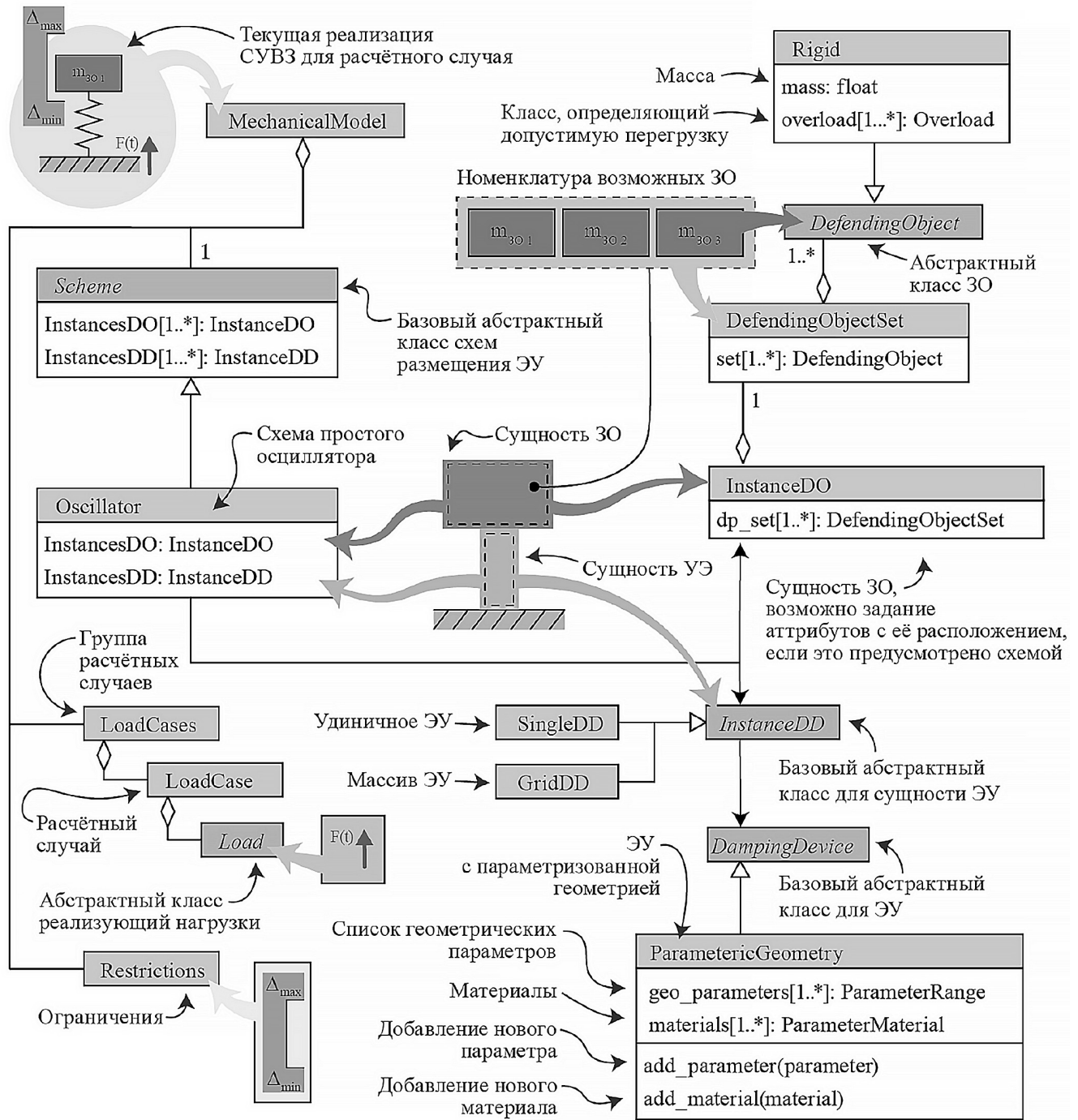


Рис. 2. Объектно-ориентированная модель СУВЗ

$$\begin{cases} g_j(x) = 0, j = \overline{1, J} \\ h_k(x) \leq 0, k = \overline{1, K} \\ x_i^L \leq x_i \leq x_i^U, i = \overline{1, N}, \end{cases}$$

где $f_p: R^n \rightarrow R, p = \overline{1, P}$ – целевые критериальные функции;

$g_j(x), h_k(x)$ – ограничения типа равенств и неравенств на множество X соответственно.

В такой постановке может решаться как задача параметрического синтеза, так и структурного. Структурный синтез может быть реализован за счёт параметризации объектов ООМ (например, определяющих количество и расположение ЭП) или создания таких шаблонов конструкции ЭП, при которых значения параметров определяют его структуру (например, такой подход нередко применяется при генетической оптимизации [11-14]).

В зависимости от размерности вектора параметров оптимизации, количества целевых функций (а

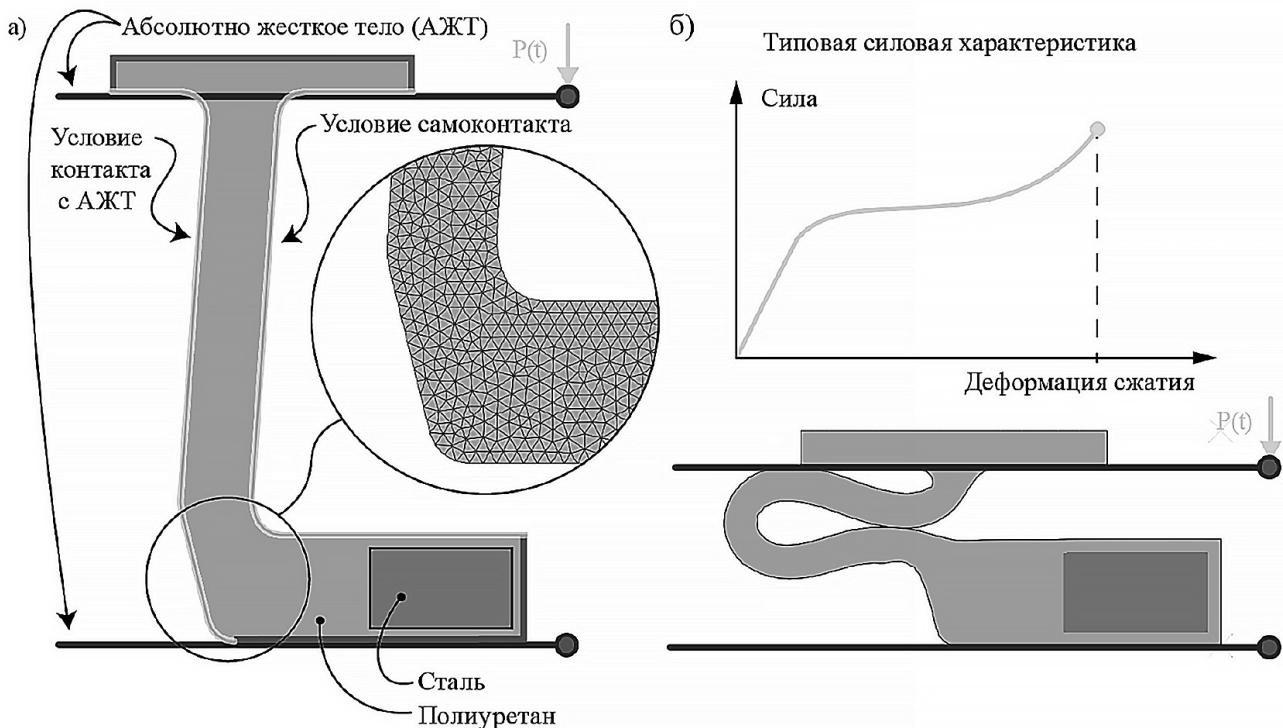


Рис. 3. Пример конечно-элементной модели (а) и её деформированное состояние при максимальном сжатии (б)

также множества принимаемых ими значений) и системы ограничений, что определяется конкретной задачей, могут потребоваться разные алгоритмы оптимизации. Стоит отметить, что в настоящее время существует множество программных реализаций алгоритмов оптимизации с открытым исходным кодом (например, *pytsoo*, *pytoto*, *scipy*, *openMDAO* и многие другие). Выбор наиболее оптимальных и подходящих алгоритмов для решения ряда наиболее распространённых задач, а также значений гиперпараметров этих алгоритмов, требует дополнительного исследования. В свою очередь, применение МКЭ при определении значений целевой функции, накладывает дополнительные требования к алгоритмам оптимизации, такие как устойчивость к зашумленности значений, а также устойчивость работы алгоритма при возникновении ошибки в процессе расчёта модели (например, для гиперупругих моделей материалов).

Существенной проблемой для синтеза может быть продолжительное расчётное время. Для его, уменьшения рациональным будет являться использование базы данных (БД), хранящей результаты моделирования, полученные ранее. Более того, возможно предварительное обучение программного обеспечения, за счёт просчёта характеристик типовых значений параметров или расчётных случаев для новых конструкций ЭП, материалов и т. п.

Программное обеспечение

Разработка программного обеспечения, реализующего разработанную ООМ, предполагает несколько итераций и уровней разработки. Первичной является

разработка фреймворка реализующего основные функциональные возможности ООМ, а также базовых таблиц БД и ряда расчётных методов для простых схем СУВЗ и ЭУ. Далее, в ходе итеративного процесса разработки планируется:

- расширение и доработка ООМ за счёт новых классов и сущностей;
- наполнение БД результатами моделирования;
- разработка графического интерфейса, реализующего low-code подход в работе с приложением и концепцию визуального программирования, за счёт реализации интерфейса, основанного на ориентированных ациклических графах (*DAG, node-based interface*), отражающих структуру ООМ.

Заключение

Применяемый подход для разработки научно-методического аппарата и сопутствующего математического и программного обеспечения, позволил обобщить опыт проектирования СУВЗ и ЭУ, а также систематизировать ранее разработанные решения. Разрабатываемое программное обеспечение позволит гибко адаптировать имеющийся опыт разработки подобного класса устройств для решения новых задач проектирования, внедрять новые решения и технологии, а также существенно снизить трудоёмкость проектирования таких систем. Важно отметить, наличие возможности широкого применения в рамках разрабатываемого программного комплекса продуктов сторонних разработчиков с открытым исходным кодом, что в свою очередь существенно снижает трудоёмкость его разработки.

Список использованных источников

1. Распоряжение Правительства РФ от 20 мая 2023 г. № 1315-р «Об утверждении Концепции технологического развития на период до 2030 г.»
2. Цифровая трансформация отраслей: стартовые условия и приоритеты: докл. к XXII Апр. междунар. науч. конф. по проблемам развития экономики и общества, Москва, 13—30 апр. 2021 г. / Г.И. Абдрахманова, К.Б. Быховский, Н.Н. Веселитская, К.О. Вишневецкий, Л.М. Гохберг и др.; рук. авт. кол. П.Б. Рудник; науч. ред. Л.М. Гохберг, П.Б. Рудник, К.О. Вишневецкий, Т.С. Зинина; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». — М.: Изд. дом Высшей школы экономики, 2021.
3. Бородавкин В.А., Щеглов Д.К. Введение в цифровую трансформацию предприятий высокотехнологичных отраслей промышленности: новые подходы // Инновации. 2020. № 12(266). С. 23–32.
4. Круглов Ю.А., Туманов Ю.А. Ударовиброзащита машин, оборудования и аппаратуры. — Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1986.
5. Ионов А.В. Средства снижения вибрации и шума на судах / Гос. науч. центр РФ, ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. СПб., 2000.
6. Ларман К. Применение UML 2.0 и шаблонов проектирования. Практическое руководство. 3-е издание.: Пер. с англ. — М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2013.
7. Rumbaugh J. The Unified Modeling Language reference manual. — Pearson Education India, 2005.
8. Гамма Э., Хелм Р., Джонсон Р., Влиссидес Дж. Приемы объектно-ориентированного проектирования. Паттерны проектирования. — СПб.: Питер, 2015.
9. Odepack, a FORTRAN77 code which implements a variety of solvers for ordinary differential equations, by Alan Hindmarsh. URL: https://people.sc.fsu.edu/~jburkardt/f77_src/odepack/odepack.html (дата обращения 01.06.2022).
10. Васильев А.В., Щеглов Д.К., Федоров Д.А., Данилов А.А., Андронников Г.Е. Выбор оптимального программного обеспечения для численного моделирования работы энергопоглощающих элементов перспективных систем амортизации специальных объектов в контексте импортозамещения средств инженерного анализа // Вестник Концерна ВКО «Алмаз — Антей». 2022. № 3. С. 5–21.
11. Floudas C.A., Pardalos P.M. (ed.). Encyclopedia of optimization. — Springer Science & Business Media, 2008.
12. Jutte C.V., Kota S. Design of nonlinear springs for prescribedload-displacement functions. — 2008.
13. Карпенко А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновлённые природой: учебное пособие / А.П. Карпенко. — 2-е изд. — М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017.
14. Simon D. Evolutionary optimization algorithms: biologically-Inspired and population-based approaches to computer intelligence. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 2013.

References

1. Government of the Russian Federation. Decree No. 1315-r of May 20, 2023 «On the Approval of the Concept of Technological Development for the Period until 2030».
2. Abdrahmanova G.I., Bykhovsky K.B., Veselitskaya N.N., Vishnevsky K.O., Gokhberg L.M., et al. (2021). Digital Transformation of Industries: Initial Conditions and Priorities. Proceedings of the XXII April International Academic Conference on Economic and Social Development, Moscow, April 13—30, 2021. Edited by P.B. Rudnik, L.M. Gokhberg, K.O. Vishnevsky, T.S. Zinina. National Research University Higher School of Economics. Moscow: Higher School of Economics Publishing House.
3. Borodavkin V.A., Shcheglov D.K. Introduction to Digital Transformation of High-Tech Industry Enterprises: New Approaches // Innovations. 2020. № 12(266), P. 23–32.
4. Kruglov Y.A., Tumanov Y.A. Shock and Vibration Protection of Machines, Equipment, and Apparatuses. Leningrad: Mashinostroenie. 1986.
5. Ionov A.V. Means of Vibration and Noise Reduction on Ships. State Scientific Center of the Russian Federation, Central Research Institute named after Academician A.N. Krylov. St. Petersburg. 2000.
6. Larman C. Applying UML and Patterns: An Introduction to Object-Oriented Analysis and Design and Iterative Development (3rd ed.). Moscow: Williams Publishing. 2013.
7. Rumbaugh J. The Unified Modeling Language reference manual. — Pearson Education India, 2005.
8. Gamma E., Helm R., Johnson R., & Vlissides J. Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software. Saint Petersburg: Piter, 2015.
9. Odepack, a FORTRAN77 code which implements a variety of solvers for ordinary differential equations, by Alan Hindmarsh. URL: https://people.sc.fsu.edu/~jburkardt/f77_src/odepack/odepack.html (Accessed date: 01.06.2022).
10. Vasiliev A.V., Shcheglov D.K., Fedorov D.A., Danilov A.A., Andronnikov G.E.. Choosing Optimal Software for Numerical Modeling of Energy-Absorbing Elements of Promising Special Object Damping Systems in the Context of Import Substitution of Engineering Analysis Tools. // Bulletin of the Concern VKO «Almaz — Antey». 2022. №3, P. 5–21.
11. Floudas C.A., Pardalos P.M. (ed.). Encyclopedia of optimization. — Springer Science & Business Media, 2008.
12. Jutte C.V., Kota S. Design of nonlinear springs for prescribedload-displacement functions. — 2008.
13. Karpenko A.P. Modern Optimization Search Algorithms: Nature-Inspired Algorithms. Moscow: Bauman Moscow State Technical University Publishing House, 2017.
14. Simon D. Evolutionary optimization algorithms: biologically-Inspired and population-based approaches to computer intelligence. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 2013.