

УДК 621.8

DOI: [10.26102/2310-6018/2024.46.3.018](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.46.3.018)

Параметрическая модель шлангокабеля с использованием Siemens NX

Д.С. Шевченко 

*Воронежский государственный технический университет, Воронеж,
Российская Федерация*

Резюме. Шлангокабель является одним из ключевых средств управления, например, в системе подводной добычи нефти и газа. Его можно рассматривать как индивидуальный продукт, связанный с конкретными параметрами вариантов использования, например, место установки. В этой статье применяется метод расчета надежности шлангокабеля с помощью усовершенствованного метода второго момента первого порядка (AFOSM) и метода Монте-Карло. Обсуждаются преимущества и текущие ограничения внедрения подхода проектирования на основе знаний (КВЕ), который, в свою очередь, дает возможность для создания различных конфигураций и вариантов продукта, для интеграции моделей САПР, дополненных функцией автоматического расчета. Даются рекомендации по будущим исследованиям метода КВЕ при проектировании изделий. В статье демонстрируется использование Siemens NX и его структуры для представления инженерных знаний под названием Knowledge Fusion (KF) для создания параметрической модели конструкции шлангокабеля с учетом ее надежности с целью улучшения процесса проектирования сечения. Раскрываются преимущества внедрения подхода КВЕ для интеграции моделей САПР, дополненных автоматическими расчетами для обеспечения надежности продукта, предлагаются варианты расширения работы для рассмотрения более сложных инженерных процессов.

Ключевые слова: параметрическая модель, КВЕ, Knowledge Fusion, CAD, проектирование изделия, индивидуальное изделие, шлангокабель, AFOSM, метод Монте-Карло.

Для цитирования: Шевченко Д.С. Параметрическая модель шлангокабеля с использованием Siemens NX. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2024;12(3). URL: <https://moitvivr.ru/ru/journal/pdf?id=1633> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.46.3.018

Parametric model of a hose cable using Siemens NX

D.S. Shevchenko

Voronezh State Technical University, Voronezh, the Russian Federation

Abstract: Hose cable is one of the key management tools, for example in a subsea oil and gas production system. It can be considered as a customized product related to specific parameters of use cases, such as installation location. This paper applies a method to calculate the reliability of the hose cable using the Advanced First Order Second Moment Method (AFOSM) and Monte Carlo method. The advantages and current limitations of adopting a knowledge-based engineering (KBE) approach are discussed, which in turn enables the creation of different product configurations and variants, for the integration of CAD models augmented with an automatic calculation function. Recommendations are made for future research into the KBE method of product design. The paper demonstrates the use of Siemens NX and its framework for representing engineering knowledge called Knowledge Fusion (KF) to create a reliability-aware parametric model of a hose cable design to improve the sectional design process. The benefits of adopting a KBE approach to integrate CAD models augmented with automatic calculations to ensure product reliability are disclosed, and options for extending the work to consider more complex engineering processes are proposed.

Keywords: parametric model, KBE, Knowledge Fusion, CAD, product design, customized product, hose cable, AFOSM, Monte Carlo method.

For citation: Shevchenko D.S. Parametric model of a hose cable using Siemens NX. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2024;12(3). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1633> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.46.3.018 (In Russ.).

Введение

Одним из направлений Индустрии 4.0 является удовлетворение растущего спроса на продукцию, изготовленную по индивидуальному заказу. В сфере подводной добычи и добычи газа поперечное сечение шлангокабеля из стальной трубы всегда варьируется в зависимости от требований конкретного проекта, что является типичным продуктом, изготовленным по индивидуальному заказу [1]. Шпунтовый кабель из стальной трубы часто состоит из некоторых структурных и функциональных компонентов, как показано на Рисунке 1 [2]. Наружная оболочка представляет собой внешнюю оболочку, используемую для защиты от морской воды. Растяжимая защита, часто состоящая из двух слоев для балансировки крутящего момента, является основным компонентом, выдерживающим растягивающую нагрузку. Функциональные компоненты собраны во внутреннее ядро, покрытое внутренней оболочкой, включающей центральную и внешнюю трубки, электрический кабель, оптическое волокно, наполнители. Поскольку глубина залегания воды в системе увеличивается, применение традиционного метода детерминированного проектирования с использованием коэффициента безопасности трудно привести в соответствие с проектными требованиями. Поэтому метод проектирования, основанный на надежности, привлекает все больше внимания при проектировании конструкций шлангокабелей [1, 2]. Обычная система САД фокусируется на геометрических аспектах конструкции, не имея возможности учитывать негеометрические аспекты. Хотя САПР приспособлена к интерактивным операциям с ограниченными возможностями автоматизации операций с помощью сценариев, по-прежнему сложно создавать надежные параметрические модели продуктов, которые допускают изменение топологии и свободу вносить адаптивные модификации [3]. Метод проектирования на основе знаний (КВЕ), являющийся развитием традиционных САД-систем, позволяет быстро создавать различные конфигурации и варианты продукта, а также управлять им, обучаться и расти на большом объеме междисциплинарных знаний.

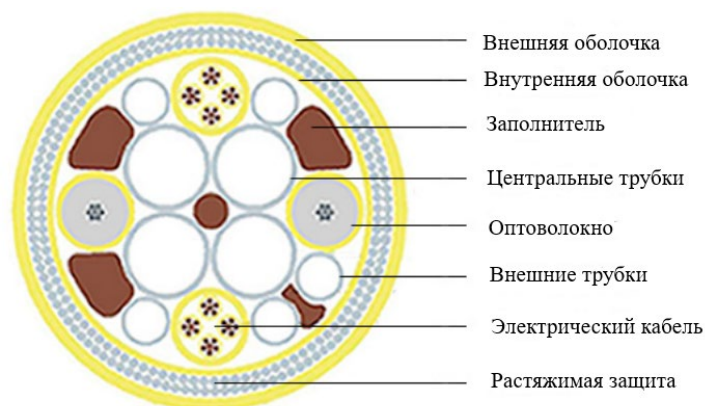


Рисунок 1 – Типовое поперечное сечение шлангокабеля из стальной трубы
 Figure 1 – Typical cross-section of steel tube umbilical cable

Метод КВЕ также может поддерживать интеграцию разнородных наборов инструментов анализа в структуру многодисциплинарной оптимизации проектирования (MDO) за счет автоматизации генерации необходимых дисциплинарных абстракций. Это может избавить оптимизатора от бремени управления ограничениями пространственной интеграции, что по своей сути может быть гарантировано правильно определенными генеративными моделями [4]. Как упоминалось выше, шлангокабели из стальных трубок изготавливаются по индивидуальному заказу в зависимости от требований проекта. После того как инженеры-проектировщики предоставили первоначальный проект, инженерам-аналитикам необходимо провести некоторый плановый анализ, чтобы гарантировать соответствие проекта требованиям. Определение показателей надежности является одним из рутинных анализов. Методу проектирования с использованием традиционной модели САПР не хватает гибкости при выполнении такого рода задач [4, 5]. Если первоначальный проект необходимо изменить, инженерам-проектировщикам приходится заново создавать модель, что может занять много времени. В таких ситуациях метод КВЕ дает преимущество, позволяющее завершить цикл проектирования, экономя время, предоставляя параметрическую модель.

В этой статье выбрана конструкция поперечного сечения шлангокабеля из стальной трубы, учитывая ее надежность, в качестве примера, демонстрирующего преимущества внедрения метода КВЕ вместо традиционного подхода САПР при индивидуальном проектировании продукта. Во-первых, представлен метод расчета надежности шлангокабеля с использованием усовершенствованного метода второго момента первого порядка (AFOSM) и метода Монте-Карло. Во-вторых, рабочий процесс создания параметрической модели шлангокабеля демонстрируется с помощью Siemens NX и его модуля под названием Knowledge Fusion (KF). Наконец, обсуждаются преимущества и текущие ограничения внедрения подхода КВЕ для интеграции моделей САПР, дополненных функцией автоматического расчета, и даются рекомендации по будущим исследованиям метода КВЕ при проектировании изделий.

Материалы и методы

Структурная надежность определяется как способность объекта выполнять свою функцию в течение определенного периода при определенных условиях [6]. Из-за производственных ошибок геометрические параметры шлангокабеля будут иметь отклонения от расчетного значения (Таблица 1) [7], что приводит к вероятности разрушения конструкции при расчетной нагрузке в течение срока ее службы. А самой опасной частью считаются центральные трубы. Надежность шлангокабеля в течение его расчетного срока службы можно определить как $R = 1 - P_f$, где P_f – вероятность отказа, определяется распределением функции производительности z . При $z \leq 0$ конструкция выйдет из строя, т. е. $P_f = P(z \leq 0)$.



Рисунок 2 – Иллюстрация показателя надежности β
Figure 2 – Illustration of the reliability index β

Таблица 1 – Статистика пяти переменных
Table 1 – The statistics of five variables

Items	μ	σ
Внешний диаметр центральных трубок	29,14 мм	0,043
Толщина центральных трубок	1,87 мм	0,062
Внешний диаметр внешних трубок	15,52 мм	0,043
Толщина внешних трубок	1,41 мм	0,047
Предел текучести материала	550 Мпа	22,6

В таблице 1 μ – среднее значение измеренных характеристик, σ – стандартное отклонение (мера разброса значений относительно среднего).

Предполагая, что функция z соответствует нормальному распределению $N(\mu_z, \sigma^2)$ с функцией плотности вероятности $f(z)$, вероятность отказа эквивалентна заштрихованной области на Рисунке 2. Очевидно, что преобразование $\frac{z-\mu_z}{\sigma_z}$ соответствует стандартному нормальному распределению $N(0, 1)$ с функцией плотности вероятности $\varphi\left(\frac{z-\mu_z}{\sigma_z}\right)$. Таким образом, связь между вероятностью отказа и распределением функции качества может быть представлена формулой:

$$P_f = P(z \leq 0) = P\left(\frac{z-\mu_z}{\sigma_z} \leq \frac{-\mu_z}{\sigma_z}\right) = \Phi\left(\frac{-\mu_z}{\sigma_z}\right). \quad (1)$$

Необходимо определить индекс надежности $\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z}$, затем $P_f = \Phi(-\beta)$. Здесь индекс надежности β представляет собой расстояние между критическим значением и средним значением. Чем больше показатель надежности β , тем безопаснее конструкция [8]. В данном конкретном случае на оценку надежности влияют только стальные компоненты (центральные и внешние трубы, растянутая броня). На основании инженерного опыта и механического анализа центральные трубы считаются наиболее опасными компонентами. Без учета пластической деформации, если напряжение фон Мизеса в центральных трубках превышает предел текучести стали, центральные трубы с высокой вероятностью сломаются, и жидкость под давлением внутри вытечет наружу. На основе допущения с учетом неопределенности пяти переменных (Таблица 1) функция эффективности определяется как

$$z = \gamma \sigma_y - \sigma = g(x_1, x_2, \dots, x_5), \quad (2)$$

где γ – коэффициент использования материала центральной трубы, σ_y – предел текучести, и напряжение по фон Мизесу:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{2}((\sigma_a - \sigma_r)^2 + (\sigma_a - \sigma_h)^2 + (\sigma_h - \sigma_r)^2)}. \quad (3)$$

Поскольку толщина стенки центральной трубки намного меньше ее радиуса, центральную трубку можно рассматривать как модель тонкостенного цилиндра (Рисунок 3).

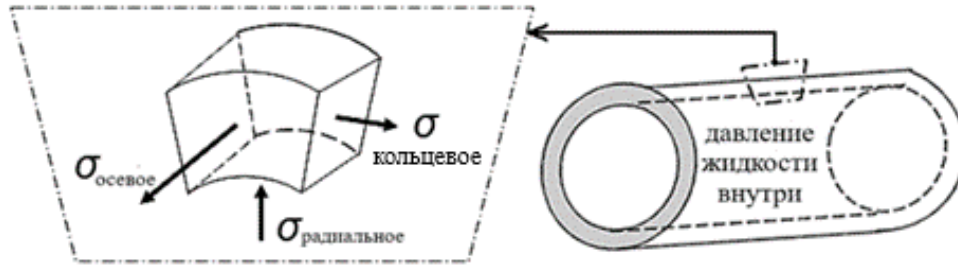


Рисунок 3 – Анализ центральной трубы как тонкостенного цилиндра
Figure 3 – Force analysis of the central tube as thin-wall cylinder

Рассматривая модель тонкостенного цилиндра, находящегося под внутренним давлением, кольцевое, радиальное и продольное (осевое) напряжение, ($\sigma_{hoop}, \sigma_{radial}, \sigma_{axial}$) создаваемое в стенке, можно рассчитать по формуле (4), где p – давление внутренней жидкости, D, d – внешний и внутренний диаметр центральной трубы:

$$\begin{aligned}\sigma_{hoop} &= p \frac{D^2+d^2}{D^2-d^2}, \\ \sigma_{radial} &= -p, \\ \sigma_{axial} &= \sigma_t + \sigma_M + \sigma_e.\end{aligned}\quad (4)$$

Напряжение в осевом направлении σ_{axis} представляет собой сумму трех компонентов: напряжения, вызванного внутренним давлением σ_e , напряжения, вызванного изгибающим моментом σ_M , и напряжения, вызванного растягивающей нагрузкой σ_t , которое можно рассчитать по формуле (5), где $T, \frac{1}{p}$ – растягивающая нагрузка и кривизна шлангокабеля на конце, рассчитанные с помощью профессионального программного обеспечения для моделирования (OrcaFlex) [9]:

$$\begin{aligned}\sigma_e &= p \frac{\pi d^2}{4} \frac{1}{A_t}, \\ \sigma_M &= E_t \frac{D}{2} \frac{1}{\rho}, \\ \sigma_t &= \frac{T K_t}{K A_t}.\end{aligned}\quad (5)$$

Жесткость при растяжении шлангокабеля и его компонентов можно рассчитать по формуле (6), где K – общая жесткость при растяжении шлангокабеля, A_t, A_o – площади поперечного сечения центральной и внешней трубок, K_t, K_o – жесткость растяжения центральной трубки и внешней трубки, E_t – модуль Юнга стали, α_o, α_i – внешний и внутренний угол спирали между растянутой защитой и осью, n_o, n_i – количество внешних и внутренних растянутых защит:

$$\begin{aligned}K &= 4K_t + 5K_o + n_i E_t A_o \cos^3 \alpha_o, \\ A_t &= \pi \frac{D^2-d^2}{4}, \\ K_t &= E_t A_t, \\ K_o &= E_t A_o.\end{aligned}\quad (6)$$

AFOSM является широко используемым методом оценки надежности конструкции с функцией качества с незначительной нелинейностью [8, 10]. AFOSM

имеет высокую эффективность и приемлемую точность в большинстве случаев. Он адаптирован на основе метода среднего значения первого порядка второго момента (MFOSM), который легко применять, но, как оказалось, уступает методу AFOSM.

В первую очередь полезно внедрить метод MFOSM. Начнем с простого случая, рассмотрим структуру с линейной функцией качества $z = f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n c_i x_i$, где f является линейной функцией, c_i – константа, x_i – независимые случайные величины, соответствующие нормальному распределению $N(\mu_i, \sigma_i^2)$. По свойству нормального распределения $z \sim N(\sum_{i=1}^n c_i \mu_i, \sum_{i=1}^n c_i^2 \sigma_i^2)$. Тогда показатель надежности этой системы можно рассчитать по формуле [5, 7, 8]:

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z} = \frac{\sum_{i=1}^n c_i \mu_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n c_i^2 \sigma_i^2}}.$$

Показатель надежности системы с линейной функцией производительности легко рассчитать. Однако функция производительности во многих случаях нелинейна, поэтому распределение функции производительности нелегко вычислить напрямую. Рассмотрим общий случай: структуру с общей функцией качества $z = g(x_1, x_2, \dots, x_n)$, где x_i – независимые случайные величины, соответствующие нормальному распределению $N(\mu_i, \sigma_i^2)$. Функцию производительности можно разложить в ряд Тейлора в точке среднего значения μ и линеаризовать, взяв два элемента первого порядка:

$$z \approx z^* = g(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial g(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n)}{\partial x_i} (x_i - \mu_i), \quad (7)$$

Согласно свойству нормального распределения, а также независимости переменных x_i , соотношения (8) можно получить на основе линеаризованной функции качества (7):

$$\begin{aligned} \mu_z &= g(\mu), \\ \sigma_z^2 &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial g(\mu)}{\partial x_i} \frac{\partial g(\mu)}{\partial x_j} \text{cov}(X_i, X_j) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g(\mu)}{\partial x_i} \sigma_i \right)^2, \end{aligned}$$

таким образом

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z} = \frac{g(\mu)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g(\mu)}{\partial x_i} \sigma_i \right)^2}}. \quad (8)$$

Поскольку функция производительности расширяется в точке среднего значения и использует ряд Тейлора первого порядка, а также первый и второй моменты входных переменных.

Точка соответствия критериям называется расчетной точкой и обычно решается итерационным методом [11]:

1. Выбрать начальное значение расчетной точки (x^*) с помощью $x_i^* = \mu_i (i = 1, 2, \dots, n)$.

2. Рассчитать коэффициент чувствительности (α_i) с помощью (9):

$$\alpha_i = \frac{\sigma_i \frac{\partial g(x_1^*, \dots, x_n^*)}{\partial x_i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\sigma_i \frac{\partial g(x_1^*, \dots, x_n^*)}{\partial x_i} \right)^2}} (i = 1, 2, \dots, n). \quad (9)$$

3. Получить группу уравнений относительно β и текущей расчетной точки (x^*) с помощью (10):

$$x_i^* = \mu_i - \beta \alpha_i \sigma_i (i = 1, 2, \dots, n). \quad (10)$$

4. Поместить текущую расчетную точку (10) в уравнение поверхности предельного состояния (11), чтобы получить уравнение, содержащее только β , затем решить его, чтобы получить β :

$$z = \gamma\sigma_y - \sigma_{equal} = g(x) = g(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0. \quad (11)$$

5. Обновить значение проектной точки (x^*) с помощью (10).

6. Повторять шаги 2–5 до тех пор, пока $|\Delta\beta| \leq$ пороговое значение (например, $1e-5$).

7. Рассчитать вероятность отказа по формуле $P_f = \Phi(-\beta)$.

Поскольку метод AFOSM является методом оценки, обычно применяется моделирование методом Монте-Карло для проверки точности результата, полученного методом AFOSM, если это возможно. Это широкий класс вычислительных алгоритмов, которые полагаются на повторяющуюся случайную выборку для получения численных результатов. Основная концепция заключается в использовании случайности для решения проблем, которые в принципе могут быть детерминированными. В этой статье моделирование методом Монте-Карло применяется на следующих этапах [12]:

1. Сгенерировать случайные величины (x_i), соответствующие нормальному распределению $N(\mu_i, \sigma_i^2)$, на основе статистики в Таблице 1.

2. Вызвать функцию производительности (2) N_{total} (например, 100000) раз, чтобы получить распределение z .

3. Рассчитать вероятность провала с помощью $P_f = \frac{N_{fail}}{N_{total}}$, где N_{total} – общее время испытаний Монте-Карло, а N_{fail} – это моменты, когда $z \leq 0$.

4. Подобрать z , чтобы получить индекс надежности ($\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z}$).

Реализуя два метода в Python, можно получить два результата надежности. Из Таблицы 2 видно, что два результата близки друг к другу, что можно рассматривать как доказательство осуществимости двух методов.

Таблица 2 – Сравнение двух методов

Table 2 – Comparison of two methods

	MC simulation	AFOSM	REQMT 1	REQMT 2
R	0,99455	0,99498	0,99	0,999987
β	2,5459	2,5746	2,33	4,2

Шланги из стальных трубок параметрируются с учетом геометрических и негеометрических аспектов.

С помощью готовых базовых классов и некоторых функций Siemens NX KF становится возможным построить геометрическую модель шлангокабеля из стальной трубы. Наиболее часто используемый класс формы – класс цилиндра [13], применив операцию вычитания, трубку можно легко смоделировать. Спиральную армирующую проволоку можно смоделировать с помощью класса линии выборки и функции развертки. После создания каждой элементарной части можно создать массив этих частей с помощью функции дочернего списка. Когда геометрические детали будут готовы, процесс будет обрабатывать некоторые негеометрические параметры в соответствии с потребностями пользователя. В этой статье центральные трубы будут отображаться разными цветами в зависимости от того, соответствует ли их надежность требованию. Если они соответствуют требованию, они будут зелеными, в противном случае – красными (Рисунок 4).

```
#central_tubes color depending on reliability
(Child list) body_colored_central_tubes:
  Class, ug_body;
  Feature, {nth(child:index:, central_tubes:)};
  quantity, num_cen tube;;
  color, if (reliability_cts_real: < reliability_cts_required:)
    then ug_askClosestColor(RED)
    else if(reliability_cts_real: > reliability_cts_required:)
    then ug_askClosestColor(GREEN)
    else ug_askClosestColor(YELLOW); ;
```

Рисунок 4 – Отрывок из кода KF (файл DFA)
Figure 4 – Excerpt from KF code (DFA file)

Результаты

Рабочий процесс создания параметрической модели с учетом надежности (хранится в файле с расширением DFA, который содержит код KF) можно увидеть на Рисунке 5. Весь процесс можно разделить на 4 этапа: ввод параметров, расчет производительности (в данном случае надежности), создание файла DFA, визуализация модели.

На первом этапе пользователю предлагается ввести параметры, включая геометрические и негеометрические, в скрипт Python. При необходимости этот интерфейс конечного пользователя можно заменить графическим пользовательским интерфейсом (GUI) для повышения удобства использования. После того, как программа получит введенные пользователем параметры, будет проведен пользовательский расчет и результат будет передан на следующий шаг. В этой статье мы рассматриваем надежность только в качестве примера. Однако на этом этапе могут быть добавлены некоторые другие вычисления в соответствии с пожеланиями пользователя. Подготовив все необходимые параметры, программа выведет параметрическую модель в файл DFA, который содержит геометрические и негеометрические параметры. В конечном итоге, пользователь может визуализировать модель с помощью Siemens NX и увидеть, соответствует ли надежность этой конструкции требованиям. Если дизайн не соответствует критериям, пользователь может ввести новый набор параметров и немедленно получить обновленный файл DFA. Когда результат будет удовлетворительным, будут доступны как 3D-модель, так и расчет.

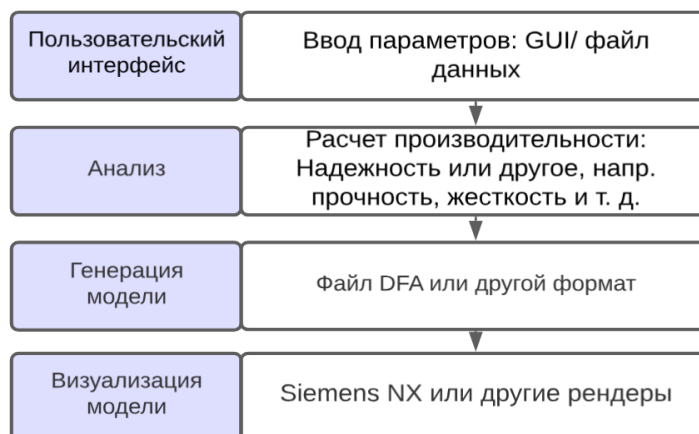


Рисунок 5 – Рабочий процесс создания параметрической модели
Figure 5 – Workflow to generate the parametric model

Как упоминалось выше, центральные трубки будут окрашены в зеленый или красный цвет в зависимости от того, соответствует ли надежность требованиям. В этой

статье предъявляются различные требования для демонстрации этой функции в качестве примера. Из таблицы 2 видно, что при относительно низком нормативе ($\beta = 2,33$, $R = 0,99$) центральные трубки могут соответствовать критериям и будут иметь зеленый цвет (Рисунок 6 (a)). И наоборот, если используется относительно высокий стандарт ($\beta = 4,2$, $R = 0,999987$), центральные трубки будут отображаться красным цветом (Рисунок 6 (b)). Цвета задаются в соответствии с правилами объекта «body colored central tube», определенного в файле DFA (Рисунок 4).

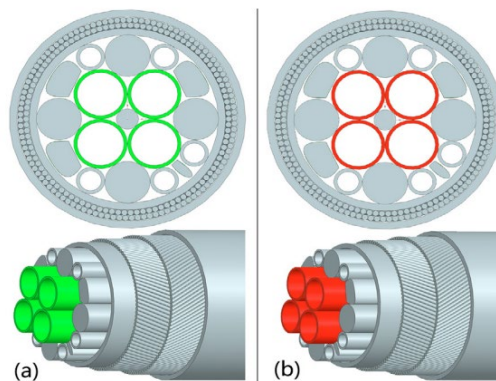


Рисунок 6 – Демонстрация результата
Figure 6 – Result demonstration

Обсуждение

Шлангокабель представляет собой типичный продукт, изготовленный по индивидуальному заказу, поскольку его поперечное сечение всегда варьируется в зависимости от требований конкретного проекта. Применяя метод КВЕ для создания параметрической модели вместо традиционного метода проектирования, а также соответствующий инструмент расчета, цикл проектирования можно выполнить с экономией времени. Кроме того, параметрическая модель может сочетаться с алгоритмом создания проекта и алгоритмом оптимизации, что может привести к автоматическому проектированию и оптимизации.

В настоящее время все еще существуют некоторые процессы проектирования, которые трудно параметризовать. С такими процессами обычно легко справиться человеку, но их сложно прописать в программе. Поскольку сложность программы в некоторых случаях имеет более приоритетное значение, чем ручное управление, метод КВЕ может рассматриваться как плохой вариант. Если продукт не изготавливается по индивидуальному заказу и требует частого изменения дизайна, недостатки становятся более существенными.

Заключение

Параметрическая модель шлангокабеля с учетом его надежности была разработана с целью улучшения процесса проектирования сечения. Эта работа показывает потенциал метода КВЕ с учетом не только геометрических параметров, но и негеометрических аспектов. Данные могут быть автоматически переданы между входными и выходными процессами, что значительно экономит время на выполнение процесса проектирования. Кроме того, такие параметрические модели ложатся основу для будущей автоматизации проектирования и оптимизации.

Сосредоточить внимание стоит на том, как сделать метод КВЕ более простым для реализации инженером-конструктором без высоких требований к навыкам программирования, например, применяя некоторые базовые и часто используемые аналитические коды и программы, которые легко использовать и встраивать в структуру КВЕ, особенно некоторые математические функции.

Текущую работу можно расширить, чтобы рассмотреть более сложные инженерные процессы, чтобы найти больше препятствий для применения метода КВЕ в реальных инженерных приложениях и продемонстрировать потенциал метода КВЕ для автоматизации проектирования, например, вышеупомянутое автоматическое проектирование и оптимизацию компоновки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Lu Q., Yang Z., Yan J., Yue Q. Design of Cross-Sectional Layout of Steel Tube Umbilical. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. 2014;136(4). <https://doi.org/10.1115/1.4027800>
2. Yan J., Yang Z., Zhao P., Lu Q., Wu W., Yue Q. Reliability Optimization Design of the Steel Tube Umbilical Cross Section Based on Particle Swarm Algorithm. In: *ASME 2017 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 25–30 June 2017, Trondheim, Norway*. American Society of Mechanical Engineers; 2017. <https://doi.org/10.1115/OMAE2017-61388>
3. Sobieszczanski-Sobieski J., Morris A., Van Tooren M. *Multidisciplinary Design Optimization Supported by Knowledge Based Engineering*. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd.; 2015. 400 p.
4. Su Q., Zhang Q., Xu Q., Yan J., Lu Q., Yin Y., Sævik S., Ye N. Deep learning-driven optimization design for the configuration of lazy-wave umbilical cables. *Applied Ocean Research*. 2024;150. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2024.104097>
5. Zhang D., Zhao B., Zhu K. Dynamic analysis of the umbilical cable pull-in operation through J-tube under different wave directions. *Ocean Engineering*. 2023;280. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114838>
6. Choi S.-K., Canfield R.A., Grandhi R.V. *Reliability-based Structural Design*. London: Springer-Verlag; 2007. 306 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-84628-445-8>
7. Soulat M.E. Parametric geometry representation to support aircraft design. In: *2012 IEEE Aerospace Conference, 03–10 March 2012, Big Sky, MT, USA*. IEEE; 2012. pp. 1–17. <https://doi.org/10.1109/AERO.2012.6187342>
8. Hasofer A.M., Lind N.C. Exact and Invariant Second-Moment Code Format. *Journal of the Engineering Mechanics Division*. 1974;100(1):111–121. <https://doi.org/10.1061/JMCEA3.0001848>
9. Madsen H.O., Krenk S., Lind N.C. *Methods of Structural Safety*. New York: Dover Publications, Inc.; 2006. 407 p.
10. Bai Y., Jin W.-L. *Marine Structural Design*. Waltham: Butterworth-Heinemann; 2016. 1008 p.
11. Li F.Z., Low Y.M. Fatigue reliability analysis of a steel catenary riser at the touchdown point incorporating soil model uncertainties. *Applied Ocean Research*. 2012;38:100–110. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2012.07.005>
12. Kroese D.P., Brereton T., Taimre T., Botev Z.I. Why the Monte Carlo method is so important today. *Wiley Interdisciplinary Reviews*. 2014;6(6):386–392. <https://doi.org/10.1002/wics.1314>
13. Shih R. *Parametric Modeling with Siemens NX (2212 Series)*. Mission: SDC Publications; 2023. 508 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Шевченко Денис Сергеевич, аспирант **Denis S. Shevchenko**, post-graduate student,
Воронежский государственный технический Воронеж State Technical University, Voronezh,
университет, Воронеж, Российская the Russian Federation.
федерация.

e-mail: dshevo@mail.ru

ORCID: [0009-0003-5903-9436](https://orcid.org/0009-0003-5903-9436)

*Статья поступила в редакцию 17.07.2024; одобрена после рецензирования 01.08.2024;
принята к публикации 09.08.2024.*

*The article was submitted 17.07.2024; approved after reviewing 01.08.2024;
accepted for publication 09.08.2024.*