

Оптимизация топологии ротора высокоскоростной синхронной реактивной машины

М. А. Ситников¹, С. А. Галуни²
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
¹maximys.97@mail.ru, ²sagalunin@etu.ru

Ануар Белхсен
Университет Аалто
Хельсинки, Финляндия
Anouar.belahcen@aato.fi

Аннотация. В настоящее время в связи с растущим использованием технологий возобновляемой энергии и технологий водородной энергетики особый интерес вызывают высокоскоростные электрические машины. Высокоскоростные электрические машины хорошо зарекомендовали себя в компрессорных установках и могут повысить общий КПД всего агрегата за счет отказа от редуктора. Однако конструкция и работа этих электрических машин сопряжены с рядом трудностей, таких как возникающие в результате повышенные центробежные силы, приводящие к повышенным механическим напряжениям в конструкции ротора. В данной статье в качестве исследуемого объекта рассматривается высокоскоростной синхронный реактивный двигатель. Цель состоит в том, чтобы исследовать возможность снижения механических напряжений в стали ротора за счет оптимизации ее топологии при сохранении выходной электромагнитной мощности.

Ключевые слова: синхронная реактивная машина; оптимизация топологии; COMSOL

I. ВВЕДЕНИЕ

Оптимизация ротора синхронных реактивных двигателей возникла ранее в научно-технической литературе. Например, в [1] сделана попытка оптимизировать ротор электрической машины и геометрические параметры статора. В качестве контролируемых параметров авторы [1] рассматривали расстояние между пазами статора, размер стальных ребер в роторе и размер воздушных барьеров ротора. Целевой функцией была разница индуктивностей по продольной и поперечной оси. Задача оптимизации решалась методом конечных элементов, и полученные результаты подтверждены экспериментальными исследованиями.

В [2] авторы рассмотрели оптимизацию геометрии ротора синхронной реактивной машины с помощью гибридного оптимизатора роя частиц и алгоритма оптимизатора серого волка. В качестве контролируемых переменных использовались геометрические параметры воздушных барьеров и стальных ребер ротора. Целевой функцией в данном исследовании была пульсация электромагнитного момента (ΔT) и его среднее значение (T_{avg}). Целевая функция описывалась следующим образом:

$$f = \Delta T^2 + \frac{1}{T_{avg}}.$$

Работы [3, 4] были посвящены аналогичным вопросам и решались примерно одинаково. Стоит отметить, что все вышеперечисленные работы подошли к решению задач оптимизации именно с помощью параметрической оптимизации, то есть при наличии некоторых контролируемых параметров, изменяя значение которых, происходит поиск оптимального значения требуемого выхода. Также из-за стандартной частоты вращения авторы не рассматривали вопросы механики ротора. Однако в высокоскоростных электрических машинах эти проблемы занимают центральное место, поскольку работа машины из-за механических напряжений становится невозможной.

В ходе электромагнитного анализа рассматриваемой машины было выявлено, что наиболее перспективной геометрией ротора для электрической машины мощностью 130 кВт и частотой вращения ротора 31500 об/мин может быть геометрия, показанная на рис. 1. Эти характеристики были зафиксированы в предыдущей работе над машиной с постоянными магнитами [5].

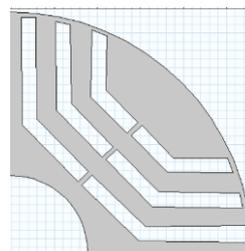


Рис. 1. Исходная топология ротора

Однако, несмотря на преимущества электромагнитных характеристик, эта геометрия имеет проблемы, связанные с механическими напряжениями, которые могут возникнуть во время работы. На рис. 2 показано распределение механических напряжений в роторе.

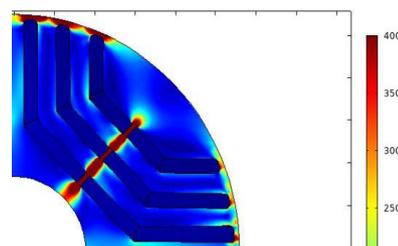


Рис. 2. Распределение механических напряжений в роторе

Как видно из рис. 2, чрезмерные механические напряжения возникают в ребрах стали между барьерами магнитного потока и ребрами из стали и между барьерами магнитного потока и воздушным зазором. Механические напряжения в этих областях достигают 1200 МПа, в то время как максимально допустимое напряжение для стали AISI 4140 составляет всего 410 МПа.

Одним из решений этой проблемы может стать введение немагнитной стали в магнитные барьеры ротора. Однако при этом потребуются сложная производственная процедура без гарантии ее эффективности.

Второе решение – оптимизировать расположение стальной и воздушной секций ротора таким образом, чтобы снизить возникающие механические напряжения.

II. ОСНОВЫ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

A. Оптимизация в задачах механики твердого тела

Оптимизация топологии — это метод, позволяющий произвольно оптимизировать форму конструкции без определенных геометрических параметров. Такая методология подходит для задач, где общая геометрия недоступна. COMSOL Multiphysics решает задачи топологической оптимизации, описывая структуру с помощью искусственного объемного фактора θ_c , который играет роль управляющей переменной в задаче оптимизации [7]. Эта переменная принимает значения 0 или 1 в механике твердого тела, что соответствует пустым или твердым областям соответственно. Чтобы точно описать постановку задачи оптимизации, необходимо ограничить сложность конструкции; в противном случае оптимизация может быть сведена к бесконечным мелким изменениям и особенностям, которые невозможно решить никаким методом конечных элементов из-за конечного размера сетки. Детали проектирования можно ограничить с помощью фильтра, который создает другое поле, θ_f , который гарантированно не содержит функций меньше некоторого заданного значения R_{\min} , поскольку рассчитывается в рамках решения задачи Гельмгольца [8]:

$$\theta_f = R_{\min}^{-2} \nabla^2 \theta_f + \theta_c$$

Затем отфильтрованная переменная проецируется с использованием гиперболического тангенса [9]:

$$\theta = \frac{\left(\tanh(\beta(\theta_f - \theta_\beta)) + \tanh(\beta\theta_\beta) \right)}{\left(\tanh(\beta(1 - \theta_\beta)) + \tanh(\beta\theta_\beta) \right)}$$

COMSOL может автоматически выбирать параметры проецирования.

Обычно, чтобы гарантировать бинарное решение, применяется метод твердого изотропного материала со штрафом (SIMP) [10]:

$$\theta_p = \theta_{\min} + (1 - \theta_{\min}) \theta(\mathbf{x})^p$$

где \mathbf{x} – пространственная координата.

Тогда выражение для модуля Юнга E , который является контролируемой переменной в задачах механики твердого тела, принимает следующий вид:

$$E(\mathbf{x}) = E_0 \theta_p,$$

где E_0 - начальное значение модуля Юнга в данной точке и $p \geq 1$ - штрафной коэффициент, из-за которого промежуточные плотности обеспечивают меньшую жесткость по сравнению с их «стоимостью» в весе.

B. Оптимизация в задачах электромагнетизма

Проблемы оптимизации могут быть решены не только для механики твердого тела, но и для электромагнетизма, например, для оптимизации топологии ротора синхронного реактивного электродвигателя для максимального увеличения электромагнитного момента. Постановка задач в этом случае имеет структуру, аналогичную описанной выше, но регулируемой переменной является относительная магнитная проницаемость:

$$\mu_r = 1 + \theta(\mathbf{x}) \cdot (\mu_{r0} - 1)$$

где μ_{r0} начальная магнитная проницаемость материала.

Особенность решения этих задач возникает, если кривую намагничивания электротехнической стали изначально задать в виде $B = f(H)$. В этом случае необходимо привести эту кривую к виду $\mu_r = f(B)$, который можно использовать в задачах оптимизации.

III. ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ТОПОЛОГИИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ

A. Минимизация механических нагрузок на ротор

Оптимизация топологии ротора в рамках механики твердого тела сводилась к необходимости снижения механических напряжений, возникающих в роторе. Следовательно, целевой функцией может быть минимизация плотности энергии деформации, которая может быть выражена:

$$W = \tilde{W}(\mathbf{B}, \mathbf{R})$$

где \mathbf{B} левый тензор деформаций Коши–Грина, \mathbf{R} тензор вращения из полярного разложения \mathbf{F} , и \mathbf{F} двухточечный тензор градиента деформации.

Для линейных изотропных материалов, претерпевающих небольшие деформации, функцию плотности энергии деформации можно записать как:

$$W = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_y \varepsilon_y + \sigma_z \varepsilon_z + 2\sigma_{xy} \varepsilon_{xy} + 2\sigma_{yz} \varepsilon_{yz} + 2\sigma_{xz} \varepsilon_{xz})$$

где σ и ε напряжения и деформации по соответствующим осям.

С другой стороны, минимизация максимального значения механических напряжений может выступать в качестве целевой функции. Для этого можно определить в COMSOL датчик домена для отслеживания значений пиковых напряжений.

В качестве ограничения было выбрано распределение массы по длине, то есть интеграл плотности материала по заданной площади. Для исходной геометрии, показанной на рис. 1, распределение массы составляло 47 кг / м.

На рис. 3 показан результат оптимизации топологии ротора при минимизации энергии пластической деформации с ограничением конечного распределения массы 40 кг / м.

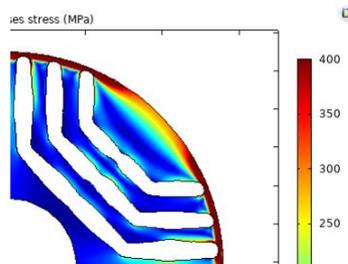


Рис. 3. Результат оптимизации при минимизации энергии пластической деформации и распределения массы 40 кг / м

Рис. 3 показывает, что механические напряжения в стальных ребрах между барьерами магнитного потока были устранены, в то время как проблема повышенных нагрузок на периферии осталась.

На рис. 4 показан результат оптимизации топологии ротора при минимизации пикового значения механических напряжений с ограничением конечного массового распределения 40 кг / м.

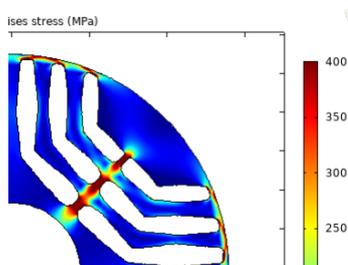


Рис. 4. Результат оптимизации при минимизации максимальных значениях напряжения и распределении массы 40 кг / м

Из рис. 4 видно, что проблема механических напряжений на периферии была практически решена, а нагрузки на ребра между барьерами магнитного потока были уменьшены. Однако механические напряжения в этой зоне не соответствовали допустимому пределу 410 МПа.

На рис. 5 показан результат оптимизации топологии ротора с задачей минимизации энергии пластической деформации и с ограничением распределения выходной массы 30 кг / м.

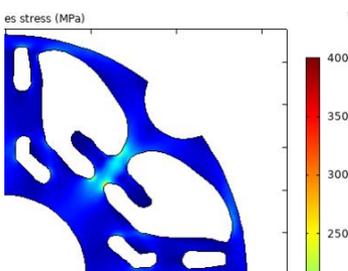


Рис. 5. Результат оптимизации с минимизацией энергии пластической деформации и распределения веса 30 кг / м

Как следует из рис. 5, проблема повышенных механических напряжений полностью решена. Максимальные напряжения, возникающие при такой конфигурации ротора, не превышают 250 МПа.

На рис. 6 показан результат оптимизации топологии ротора при минимизации пиковых значений механических напряжений и ограничении распределения выходной массы до 30 кг / м.



Рис. 6. Результат оптимизации при минимизации максимальных значениях напряжения и распределении веса 30 кг / м

Геометрия на рис. 6 совершенно нереалистична, поскольку некоторые части материала оказались подвешенными в пространстве и совсем не связанными.

Таким образом, можно утверждать, что лучший способ уменьшить механическое напряжение в роторе синхронной высокоскоростной машины – это топология на рис. 5.

V. Максимизация электромагнитного момента

Как отмечалось ранее, COMSOL также может решать задачи оптимизации топологии электромагнитных величин. Однако в этом случае в качестве целевой функции использовалась максимизация выходного электромагнитного момента, при этом ограничения были только на внешней и внутренней границах материала, то есть при оптимизации ротор не может занимать площадь воздушного зазора, так же как и площадь вала. При этом, в отличие от предыдущих исследований, изначально весь ротор рассматривался как единое целое, заполненное сталью без воздушных преград.

На рис. 7 показан результат этой оптимизации и сравнение с исходной геометрией (рис. 1).

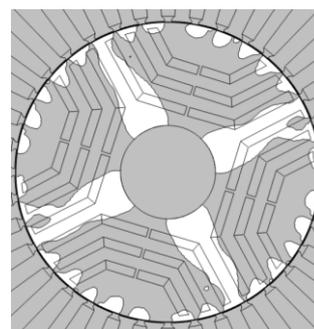


Рис. 7. Результат оптимизации ротора с целью максимизации электромагнитного момента

Топология на рис. 7 выглядит «лепестковой», что нереально с технологической точки зрения.

IV. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ СРАВНЕНИЕ ТОПОЛОГИЧЕСКИ ОПТИМИЗИРОВАННОЙ ГЕОМЕТРИИ

A. Сравнение электромагнитных характеристик исходной топологии и оптимизированной

Основной характеристикой синхронного двигателя является характеристика нагрузки, которая представляет собой зависимость электромагнитного момента или электромагнитной мощности от угла ротора по отношению к магнитному полю статора.

Для начальной геометрии, показанной на рис. 1, нагрузочная характеристика зависимости электромагнитного момента от угла нагрузки показана на рис. 8.

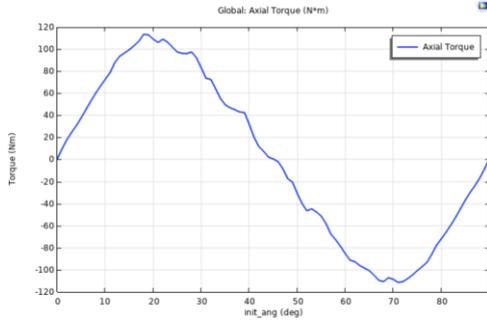


Рис. 8. Нагрузочная характеристика синхронного двигателя с исходной геометрией ротора

Для оптимизированной топологии, показанной на рис. 5, нагрузочная характеристика зависимости электромагнитного момента от угла нагрузки показана на рис. 9.

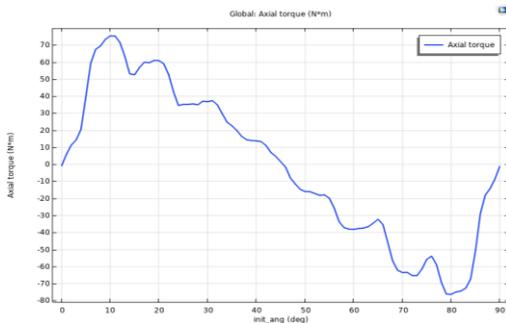


Рис. 9. Нагрузочная характеристика синхронного двигателя с геометрией ротора, оптимизированной для задачи механики твердого тела

Из рис. 8 и 9 видно, что при оптимизации геометрии ротора наблюдается уменьшение выходного электромагнитного момента в 1,5 раза. Однако следует отметить, что электромагнитный момент, показанный на рис. 8, изначально был недостижим из-за чрезмерных механических напряжений в стали ротора. То есть работа такой электрической машины была бы невозможна. Нагрузочная характеристика, показанная на рис. 9, в этом случае является полностью адекватной и разумной заменой, поскольку, исходя из механических нагрузок, работа такого электродвигателя не будет сопровождаться разрушением материала или другими механическими проблемами.

Вторая по важности характеристика – пульсация выходного электромагнитного момента. Для исходной геометрии (рис. 1) график крутящего момента за период показан на рис.10, а для оптимизированной геометрии – на рис.11. В этом случае пульсация крутящего момента может быть определена с помощью следующего выражения:

$$\Delta T = \frac{\max T - \min T}{T_{avg}} \times 100\%$$

где $\max T$ – максимальное значение момента за период, $\min T$ – минимальное значение момента за период, T_{avg} – среднее значение момента за период.

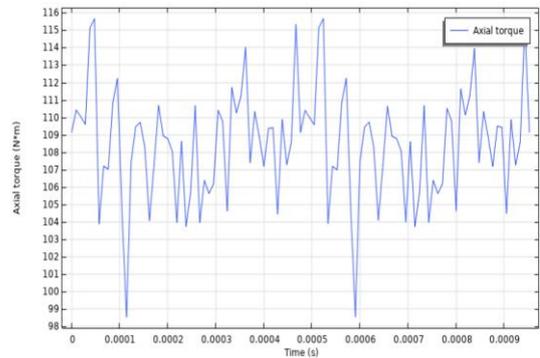


Рис. 10. Электромагнитный момент для периода с начальной топологией ротора

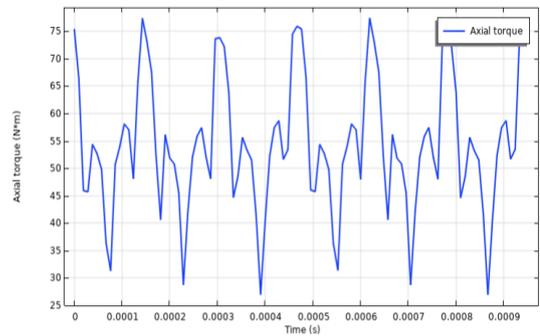


Рис. 11. Электромагнитный момент для периода с оптимизированной топологией ротора

Из рис. 10 и 11 рассчитано, что пульсация крутящего момента для первого случая составляет 15 %, а во втором случае пульсация достигает 90 %.

В. Улучшение оптимизированной топологии

Как отмечалось ранее, несмотря на то, что топологически оптимизированная геометрия дает хорошие результаты с точки зрения механических параметров, она проигрывает с точки зрения мощности и пульсации электромагнитного момента. Также стоит отметить, что начальная заявленная мощность составляет 130 кВт, что при частоте вращения 31500 об/мин соответствует электромагнитному крутящему моменту в 39 Нм. На рис. 9 видно, что это значение вполне достижимо и дает запас в 1,8 раза по отношению к максимальному крутящему моменту. Таким образом, необходимо решить проблему пульсации.

Внеся небольшие изменения в оптимизированную топологию, исходя из соображений распределения магнитного поля в роторе, можно получить ротор, показанный на рис. 12. Можно увидеть, что небольшое изменение воздушных барьеров ротора никак не влияет на механические нагрузки.

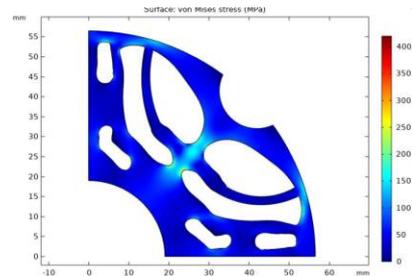


Рис. 12. Механические напряжения после улучшения оптимизированной топологии

При этом, как видно из рис. 13 и 14, такое изменение не приводит к изменению полученной нами нагрузочной характеристики электродвигателя, но при этом результирующая пульсация крутящего момента составляет 80 %, а также увеличивается среднее значение электромагнитного момента.

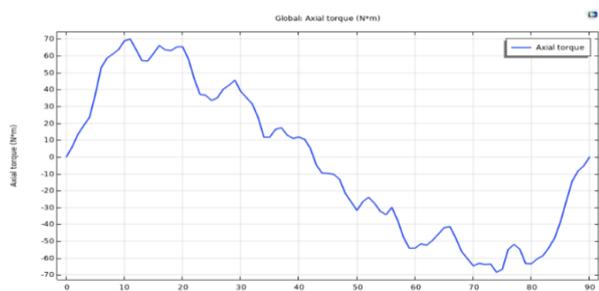


Рис. 13. Нагрузочная характеристика после улучшения оптимизированной топологии

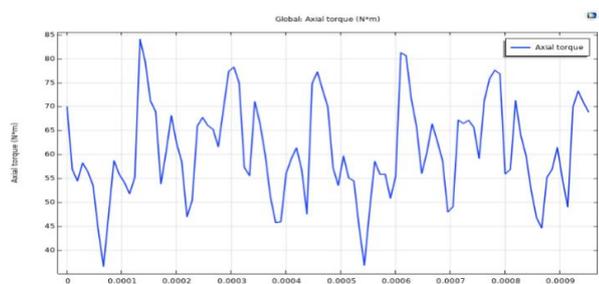


Рис. 14. Пульсация электромагнитного момента после улучшения оптимизированной топологии

Пульсации электромагнитного крутящего момента можно дополнительно уменьшить путем введения постоянных магнитов в самые незначительные воздушные барьеры, показанные на рис. 12. Рис. 15 показывает график электромагнитного крутящего момента после введения постоянных магнитов.

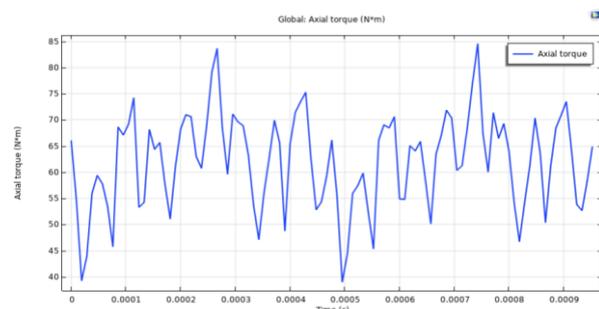


Рис. 15. Пульсация электромагнитного момента после введения постоянных магнитов

Из-за небольшого размера магнитов по сравнению с остальными воздушными заслонками они не изменяют нагрузочную характеристику синхронного реактивного двигателя, но в то же время немного стабилизируют действующий электромагнитный момент. Пульсации выходного крутящего момента в этом случае составляли 72 %.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной работы показано, что полностью адекватную модель топологии ротора высокоскоростной электрической машины можно создать с помощью методов топологической оптимизации в среде COMSOL Multiphysics. В этом случае полностью решаются задачи минимизации механических напряжений от центробежных сил. Работа оптимизатора исследуется при различных целевых функциях и ограничениях. В ходе оптимизации было установлено, что из-за меньшего использования стали электромагнитная мощность и крутящий момент, развиваемые на валу, уменьшаются, а также увеличивается его пульсация. Чтобы уменьшить пульсацию, можно внести незначительные изменения в оптимизированную геометрию и разместить небольшие постоянные магниты в области воздушных барьеров. В этом случае эти методы не влияют на нагрузочную характеристику, а только уменьшают пульсации на выходе. Дальнейшее уменьшение пульсаций электромагнитного момента может быть реализовано как посредством корректировки топологии, так и путем создания соответствующей системы управления двигателем, которая будет неотъемлемой частью электромеханического преобразователя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] T. Matsuo and T. A. Lipo, "Rotor design optimization of synchronous reluctance machine," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 9, no. 2, pp. 359-365, June 1994, doi: 10.1109/60.300136.
- [2] Rezk, Hegazy, Kotb B. Tawfiq, Peter Sergeant, and Mohamed N. Ibrahim 2021. "Optimal Rotor Design of Synchronous Reluctance Machines Considering the Effect of Current Angle" *Mathematics* 9, no. 4: 344. <https://doi.org/10.3390/math9040344>
- [3] J. Bárta and Ā. Ondrušek, "Design and optimization of synchronous reluctance machine," *Proceedings of the 16th International Conference on Mechatronics - Mechatronika 2014*, 2014, pp. 60-64, doi: 10.1109/MECHATRONIKA.2014.7018236.
- [4] JAN BARTA, CESTMIR ONDRUSEK, "Optimization of synchronous reluctance motor based on radial basis network", *Serbian Journal of Electrical Engineering 2020 Volume 17, Issue 2, Pages: 223-234*, <https://doi.org/10.2298/SJEE2002223N>
- [5] Zlatko Kolondzovski, THERMAL AND MECHANICAL ANALYSES OF HIGH-SPEED PERMANENT-MAGNET ELECTRICAL MACHINES: Doc-toral Dissertation, Aalto University – 94 pp. [Electronic source]. URL: <https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/4809/isbn9789526032801.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (access date – 02.09.2021)
- [6] <https://www.comsol.ru/blogs/performing-topology-optimization-with-the-density-method/>
- [7] <https://www.comsol.ru/model/topology-optimization-of-an-mbb-beam-7428>
- [8] B.S. Lazarov and O. Sigmund, "Filters in topology optimization based on Helmholtztype differential equations," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol 86, pp. 765–781, 2011.
- [9] F. Wang, B.S. Lazarov and O. Sigmund, "On projection methods, convergence and robust formulations in topology optimization," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol 43, pp. 767–784, 2011.
- [10] M.P. Bendsøe, "Optimal shape design as a material distribution problem," *Structural Optimization*, vol. 1, pp. 193–202, 1989.