



## MODIFICATION GENETIC ALGORITHM FOR TOPOLOGICAL OPTIMIZATION THE ROTOR OF SYNCHRONOUS MOTORS

TI. Petrov

Kazan state power engineering university, Kazan, Russia  
tobac15@mail.ru

**Abstract:** Permanent magnet synchronous motors (PMSM) find more and more widespread use in various fields of application of electric drives of industrial enterprises. For each application of the electric drive, it is necessary to accept technical requirements, such as the maximum torque of the electric motor and the fulfillment of the required conditions for the strength characteristics of the rotor and stator.

PMSM has a number of advantages over other types of engines. Asynchronous motors have developed resource rational energy efficiency, while synchronous motors are more energy efficient without modifications. PMSM have smaller weight and size parameters, which allows them to be used in a wider field of application, for example, in household appliances, robots and many other drives.

**TARGET.** The aim is to develop a methodology for topological complex optimization of the engine design, based on a genetic algorithm.

**METHODS.** The genetic algorithm is more accurate than traditional analytical methods, the method used in the analysis of AC machines, takes less time than the usual trial and error design procedure based on the finite element method. The main optimization criterion is an increase in torque while maintaining the mass of the most expensive material (permanent magnets). This feature is important for the manufacture of a designed engine in production.

**RESULTS.** A Python program that will allow you to carry out a comprehensive topological optimization for the engine in question.

**CONCLUSION.** Topological optimization based on the method of modifying the rotor design using a genetic algorithm with the additions necessary for correct operation with synchronous motors is presented.

**Keywords:** topological optimization, genetic algorithm, rotor design, permanent magnets, synchronous motor.

**Acknowledgments:** The reported study was funded by RFBR, project number 19-37-90134.

**For citation:** Petrov TI. Modification genetic algorithm for topological optimization the rotor of synchronous motors. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021;23(3):87-96. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-87-96.

## The text of the article should be in English

### Введение

Приводы синхронных электрических машин являются подсистемой множества промышленных, транспортных и бытовых систем, для примера это - электрические / гибридные электромобили, ветряные генераторы, бытовые приборы, самолеты, насосы, вентиляторы и т. д. В некоторых случаях производительность, размер, стоимость и эффективность этой подсистемы имеют наиболее важное значение для работоспособности или конкурентоспособности двигателя. Часто разработчику системы необходимо понять, является ли выбранная подсистема «оптимальной» для рассматриваемого приложения [1]. Компромисс между различными показателями производительности подсистемы электрических машин также представляет большой интерес для разработчика системы. Точно так же необходимо понять, будет ли улучшение определенного материала для применения в электрических машинах представлять значительный интерес для определенных приложений. Критические материалы (с точки зрения стоимости,

доступности и т.д.) необходимо заменить более доступными, если существует угроза дефицита поставок. Для примера можно привести следующий случай, когда несколько лет назад было большой проблемой использование постоянных магнитов на основе редкоземельных элементов, вследствие проблем с поставкой из Китая, основного поставщика.

Для всех этих сценариев требуется автоматизированный инструмент проектирования, который может оптимизировать конструкцию в соответствии с требованиями конечного пользователя и помочь определить правильную комбинацию топологии, материалов, геометрии и электрической нагрузки для достижения нескольких целей [2]. К желаемым свойствам такого средства можно отнести:

1. Применимо к широкому спектру сценариев проектирования и задач анализа конструкции.
2. Требуется минимум интуиции или суждения со стороны конечного пользователя.
3. Точный, т.е. тот, который дает истинный оптимум и, следовательно, основан на точной модели машины.
4. Возвращает результаты за реалистичное время, которое конечный пользователь может позволить себе подождать.
5. Использует вычислительные ресурсы, которые могут позволить себе большинство пользователей.
6. Гибкость: возможность расширения за пределы существующих геометрий, материалов, методов анализа или определений проблем.

Первая задача автоматизации проектирования - понять требования конечного пользователя и на их основе сформулировать задачу оптимизации. Конечный пользователь может решить проблему проектирования множеством различных способов. До сих пор не было предпринято попыток классификации проблем или перечисления различных возможных способов их определения [3]. Вторая проблема заключается в понимании того, как можно использовать общую структуру моделей и методов для решения различных классов определений проблем, обеспечивая при этом точность моделей и быструю сходимость к оптимальным значениям.

#### **Литературный обзор**

Принимая во внимание тенденцию к повышению энергоэффективности, использование более экономичных СДПМ (рис. 1) становится все более актуальным [4,5]. Однако у СДПМ есть и очевидные недостатки, главный из которых - высокая базовая стоимость двигателя. Постоянные магниты (ПМ) (неодим, кобальт, никель и др.) - дорогостоящий элемент конструкции двигателя. В настоящее время развивается промышленное производство постоянных магнитов (ПМ) с высокими энергетическими характеристиками [6,7]. Такие магниты позволяют создавать большой магнитный поток в малых объемах, что позволяет значительно увеличить максимальную мощность электрических машин [8]. Стоимость ПМ по отношению к стоимости активных материалов для СДПМ составляет около 80%, и поэтому становится очевидным, что необходимо уменьшить объем ПМ [9] и, если возможно, повысить энергоэффективность двигателя. И один из вариантов уменьшения объема ПМ – более оптимальное расположение магнитов в теле ротора, которое можно определить в процессе топологической комплексной оптимизации конструкции двигателя.

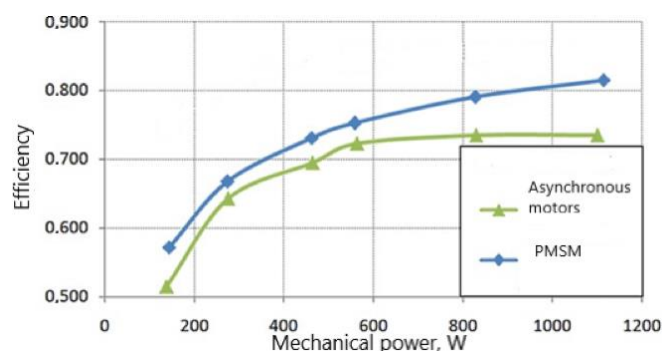


Fig. 1. Energy efficiency of asynchronous motors and PMSM (1 kW)

Распределение материалов (топология) в корпусе ротора СДПМ (постоянные магниты разной направленности, воздух, железо) определяет характеристики электрической машины. Первоначально топологическая оптимизация проводилась методом конечных элементов для уменьшения массы и улучшения прочностных характеристик конструкций [10].

Разработанная методика и программа дают возможность использовать оптимизацию не только для повышения прочностных характеристик, но и для изменения основных характеристик двигателя (увеличение вращающего момента, уменьшение температуры и т.д.) при заданном весе и габаритах [11].

Алгоритм пошаговой топологической оптимизации роторов с учетом электромагнитных, тепловых процессов и прочностного анализа позволяет проектировать прототипы роторов СДПМ с высокими энергетическими характеристиками для подготовки эскизной и рабочей конструкторской документации, но на данный момент отсутствуют работы по топологической комплексной оптимизации конструкции синхронных двигателей с ПМ [12]. Эта идея реализована за счет топологической оптимизации, то есть в нашем случае мы переходим от стандартных положений магнита к V- или W-образным магнитам. Точное расположение магнитов определяется с помощью генетического алгоритма (ГА).

#### **Методы. Метод генетического алгоритма**

Модель электрической машины является нелинейной, сложной и часто требует численных методов оценки. Кроме того, оценка производной по параметрам проекта может стать чрезмерной, если количество переменных проекта велико или оно не определено для дискретных входных данных.

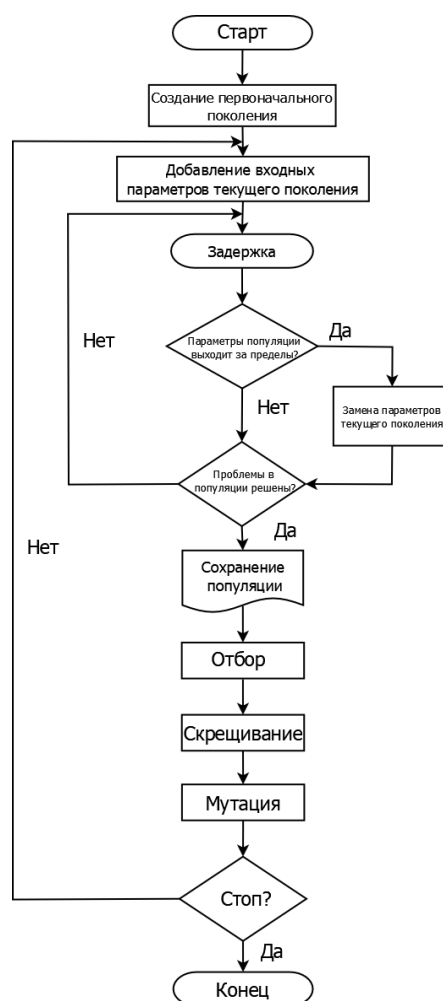


Fig. 2. Standard GA algorithm

В таких случаях поиск на основе градиента или поиск по сетке становится невозможным из-за сложности проблемы. Следовательно, используются определенные случайные, но умные алгоритмы поиска, такие как генетические алгоритмы (ГА),

дифференциальная эволюция, контролируемый случайный поиск и оптимизация роя частиц.

Идея использования компьютерных мощностей для оптимизации электрических машин возникла более 60 лет назад. В контексте современных компьютеров и развития методов стохастической оптимизации использование ГА для оптимизации электромагнитных устройств было предложено Улером и др. в 1994 г. С тех пор этот метод применялся к нескольким различным сценариям проектирования и развивался с точки зрения принятых методов и моделей [13], а также с точки зрения сложности целей проектирования [14].

Очень мощной особенностью использования методов поиска на основе популяции является гибкость при распределении вычислений. Оценка пригодности индивидумов в каждом наборе популяций является независимым вычислением и может быть назначена любому компьютеру в сети. Это не обязательно требует вычислительной среды с высокой пропускной способностью или вычислительной среды. Также не критична надежность сети и доступность узлов. Это демонстрируется блок-схемой на рис. 2, на которой показана реализация сервера оптимизации на базе генетического алгоритма, адаптированного для этой работы.

В случае, если количество целей равно одному ( $M = 1$ ), оптимизатор возвращает один вектор параметров, который максимизирует / минимизирует целевую функцию. Если проблема имеет более одной цели для оптимизации ( $M > 1$ ), оптимизатор возвращает не доминируемый, а оптимальный по Парето набор решений. Оптимизация с несколькими целями позволяет разработчику понять компромиссы между различными целями и сделать выбор на основе этого набора, а не назначать функцию взвешивания, не зная компромиссов. Обратите внимание, что пределы границ параметров обрабатываются отдельно от ограничений-неравенств, поскольку их выполнение не требует какой-либо оценки функции, поскольку они легко удовлетворяются с помощью линейного отображения.

Хотя аналитические подходы топологической оптимизации на базе ГА требуют меньшего объема вычислений, они обладают следующими недостатками:

1. Модель основана на приближении поля и не может быть подтверждена как правильная для широкого диапазона входных параметров, что ставит под угрозу точность результатов.

2. Модель не распространяется на все типы геометрий, и моделирование необходимо повторять для каждого выбора геометрии статора / ротора.

3. Некоторые представляющие интерес эффекты, такие как зубчатый момент, пульсация крутящего момента, нелегко смоделировать с помощью этого типа анализа.

4. Средняя модель магнита не дает точного предсказания размагничивания, поскольку частичное размагничивание требует знания поля внутри магнита.

Некоторые недостатки можно исправить дальнейшим усовершенствованием метода, специально предназначенное для исследования крутящего момента, магнитного потока и потерь в сердечнике в электрической машине. Эта модель извлекает данные трехфазного потока из небольшого количества магнитостатических симуляций для электрического угла поворота на  $60^\circ$  и собирает форму волны электрического угла на  $360^\circ$  потоков и магнитных полей с использованием преобразования «пространство-время». Крутящий момент вычисляется из магнитного потока после выделения значимых гармоник в форме волны магнитного потока. Это означает, что пользователь может контролировать, сколько значимых гармоник следует учитывать при расчетах крутящего момента и потерь в сердечнике. Этот метод был дополнительно усовершенствован за счет отдельного учета зубцового момента.

Конструкция ротора представлена в виде последовательности чисел, где каждая цифра представляет определенный материал (воздух, сталь, магниты с разным направлением коэрцитивной силы и т.д.).

Например, на рисунке 3 показана часть ротора с поверхностным расположением магнитов, где цифра 3 - ПМ, 1 - сталь, 0 - воздух.

**Topology**

<b>1</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>1</b>
1	1	1	1	1
1	0	0	0	1

**Ind1=1333111111000**

*Fig. 3. An example of the topology of the PMSM rotor*

Эту последовательность можно рассматривать как хромосому, и в результате ГА - это процесс поиска лучшей хромосомы для конкретной целевой функции, в нашем случае определения крутящего момента.

Для реализации ГА необходимо использовать следующую последовательность методов:

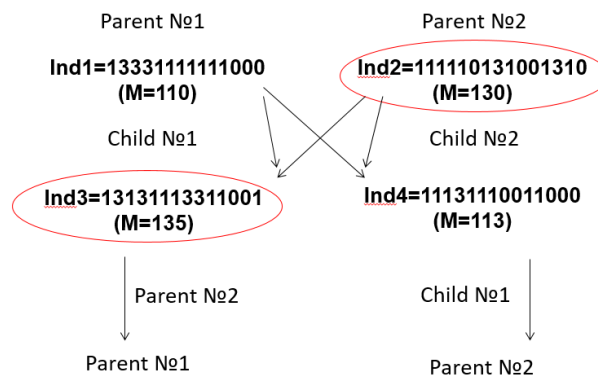
1. Случайный выбор первых хромосом (родителей). Число может отличаться, но обязательным условием является четность. Например, представлены два родителя.

2. Происходит скрещивание двух хромосом (родителей) друг с другом и получение еще двух хромосом (детей).

3. По рассчитанному значению крутящего момента (M) для всех 4 хромосом выбираем два наибольших значения. Эти 2 хромосомы становятся следующими родителями.

4. ГА работает до того случая, когда будут достигнуты определенные результаты выполнения работ (достижение определенного значения целевой функции, количество циклов ГА)

Пример ГА показан на рисунке 4. В этом случае хромосомы для следующего поколения были родительским № 2 и дочерним № 1.



*Fig. 4. An example of one iteration of a genetic algorithm*

### **Особенности генетического алгоритма топологической оптимизации СДПМ**

Теперь обратимся к особенностям ГА для топологической оптимизации СДПМ. Без учета следующих положений ГА становится бесполезным для двигателей.

Наиболее очевидным дополнением является четкий фактор завершения ГА - наибольший крутящий момент обнаруживается на одной хромосоме, а не на популяции или паре хромосом.

Вторая добавка - это определенное количество определенного материала в каждой хромосоме, а именно ПМ, это необходимо для уменьшения объема дорогостоящего материала.

Также важно отметить, что целевая функция для определения крутящего момента не является аналитической; ее решение требует использования метода конечных элементов. Для решения этой проблемы используется специальное программное обеспечение Elcut.

Остальные функции будут выражены в виде подклассов описанного выше алгоритма.

1.1. Если родителей больше двух, то необходимо осуществить подбор наиболее подходящих хромосом для дальнейшей трансформации.

Выбор может быть реализован в виде случайного выбора или выбора наиболее подходящих хромосом по значению целевой функции. Чтобы лучшая хромосома постоянно попадала в пару для спаривания, можно ввести метод элитарности. Однако следует учитывать, что элитарность может привести к попаданию в область локального максимума, а это приведет к ошибочному результату. Чтобы решить эту проблему, необходимо ввести условие определенного количества повторов элитной хромосомы.

2.1. Спаривание должно осуществляться методом разделения по двум точкам, чтобы добиться наибольшего разнообразия хромосом.

Особенности термических и прочностных расчетов заключаются в том, что в хромосомах гены с материальными магнитами не участвуют в изменениях. Идея состоит в том, чтобы обеспечить необходимую температуру двигателя через отверстия в корпусе ротора, то есть путем замены материала стали на воздух. А для расчетов на прочность алгоритм обратный, необходимо увеличить прочность станка, заменив материал воздух на сталь. Поэтому важно установить правильное максимальное значение целевой функции.

В качестве примера мы используем СДПМ с поверхностным расположением магнитов (рис.4).

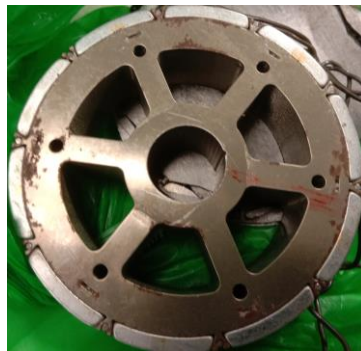


Fig. 5. PMSM rotor with surface magnets

### Результаты

Для реализации комплексной топологической оптимизации была реализована программа на языке Python.

В качестве примера приведем последовательность расчета для оптимизации вращающего момента (электромагнитные расчеты).

1. Создаем начальную популяцию из 4 хромосом случайным образом (рандомайзер). На этом этапе уже необходимо введение условия определенного количества материала, например, не менее 5 ячеек стали (материал 0), где хромосома следующего вида - [0, 1, 4, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 4].

2. Расчет целевой функции в программе Elcut (рис. 5).

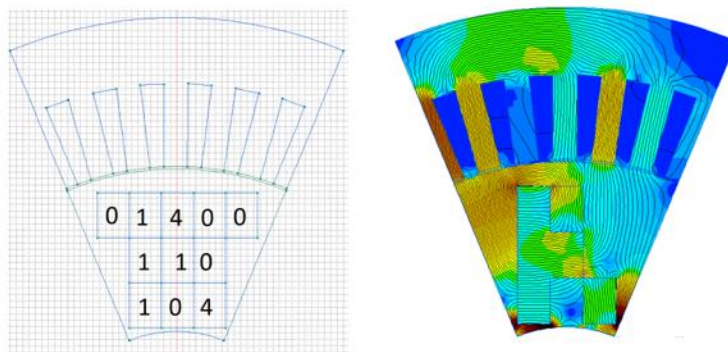


Fig. 6. Rotor sector for calculation in Elcut

3. Предыдущий шаг необходимо проделать три раза для трех различных геометрий, связано это с тем, что для адекватной оценки вращающего момента необходимо

рассчитывать значение среднеквадратичного момента. Три геометрии должны отличаться расположением фаз в пазах статора с вращением 15 градусов.

4. Выбор особей для скрещивания необходим для вариативности возможных скрещиваний и значений целевой функции, в нашем случае использован выбор наиболее подходящей половины, а элитарность введена посредством обязательного выбора хромосомы с наибольшим вращающим моментом в пару для скрещивания.

5. Скрещивание заключается в создании двух хромосом (ребенок 1 и 2) на базе двух хромосом родителей, в методике используется скрещивание по одной точке.

6. Мутация (Мутация любой хромосомы, кроме элитарной)

7. Создание следующего поколения.

В результате получаем excel файл со следующими строками:

```
{'Individuals': [[0, 1, 4, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 4], [0, 0, 4, 0, 3, 1, 1, 0, 1, 0, 4], [4, 0, 0, 0, 3, 1, 1, 0, 1, 0, 4], [4, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 4]], 'Fitness': [14.730919862656235, 62.313722405261586, 201.16742612394617, 430.0058139141842]}.
```

Где Individuals – хромосомы, Fitness – значения вращающего момента.

В ходе реализации комплексной топологической оптимизации получена новая конструкция ротора СДПМ (рис. 6). Разработанный двигатель имеет в своем составе на 9,7 % меньший объем ПМ, и по теоретическим расчетам должен иметь более высокий вращающий момент (увеличение на 3-5%) (рис 7.).

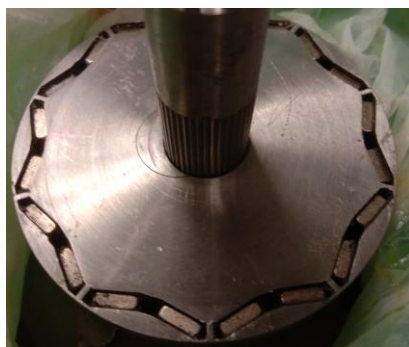


Fig. 7. PMSM rotor after design change after topological optimization

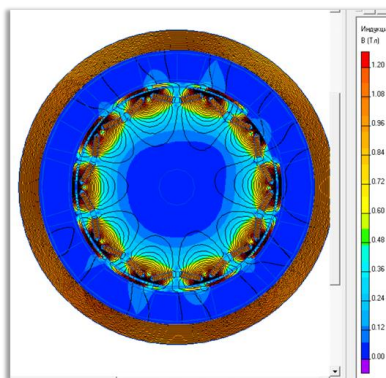


Fig. 8. The magnetic field of the modernized PMSM

### Выводы

В идеальном мире «автоматизированный» инструмент проектирования - это инструмент, способный переводить пользователя от требований дизайна к набору Парето без какого-либо понимания пользователем процесса проектирования. Аналогичным образом исследователь, который ищет альтернативы стандартным технологиям (топологии, материалам или технологиям производства) с целью превзойти то, что достижимо с помощью стандартизованных технологий, должен иметь возможность проводить объективное сравнение существующих и новых технологий с помощью инструмента автоматизированного проектирования.

Чтобы оптимизировать конструкцию СДПМ, можно использовать генетический алгоритм, который имеет необходимые преимущества перед другими методами поиска. Поскольку ГА изначально создавался для решения задач, связанных с улучшением

характеристик группы лиц, и перед нами стоит задача получения наиболее оптимального расположения материалов в одном конкретном случае, ГА был модернизирован для задач топологической оптимизации СДПМ [15].

Для перехода от этого довольно абстрактного определения такого инструмента проектирования к программной реализации необходимо модернизировать генетический алгоритм, что и было продемонстрировано в данной работе. Этот инструмент разработан в среде Python и используется для исследования топологий роторов СДПМ.

### References

1. Myagkov LL, Sivachev SM, Strizhov EE, et.al. Topological optimization of a high-performance diesel piston. *Dvigatelsestroyeniye*. 2018;2;3–10.
2. Lee J, Kikuchi N. Structural topology optimization of electrical machinery to maximize stiffness with body force distribution. *IEEE Trans. Magn.* 2010;46;10; 3790–3794.
3. Petrov TI, Safin AR. Modification of the synchronous motor model for topological optimization. *E3S Web of Conferences*. 2020;178; paper № 01016.
4. Gracheva EI., Naumov OV, Gorlov AN. Modelling Characteristics of Reliability Low-Voltage Switching Devices on the Basis of Random Checks on the Example of Contactors. Proceedings. *1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA*. 2019;8947595;641-643.
5. Safin AR, Khusnutdinov RR, Kopylov AM, et.al. Development of a method for topological optimization of electric machines based on a genetic algorithm. *Vestnik KSPEU*. 2019;4(40);77-85.
6. Karaulov VN, Sakharov MV. Methods of designing a reversed motor with permanent winch drive magnets. *Vestnik IGEU*. 2019;2.
7. Khitrin AM., Erofeeva MM., Tuktamyshev VR, et.al. Topological optimization of hull components of a helicopter gearbox. *Vestnik PNIPU. Aerospace Engineering*. 2018;53.
8. Ishikawa T, Nakayama K, Kurita N, et.al. Optimization of rotor topology in PM synchronous motors by Genetic algorithm considering cluster of materials and cleaning procedure. *IEEE Trans. on Magnetics*. 2014;50;2; 7015704.
9. Takahashi N, Yamada T, Miyagi D. Examination of optimal design of IPM motor using ON/OFF method. *IEEE Trans. Magn.* 2010;46;8;3149-3152.
10. Kishov EA, Komarov VA. Topological optimization of power structures by convex linearization. *Vestnik Samara University. Aerospace engineering, technology and engineering*. 2018;1
11. Dong L, Han X, Hua L. Effects of the rotation speed ratio of double eccentricity bushings on rocking tool path in a cold rotary forging press. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2015;29;4.
12. Khasanov SR, Gracheva EI, Toshkhodzhaeva MI., et.al. Reliability modeling of high-voltage power lines in a sharply continental climate. *E3S Web Conf*. 2020;178;01051.
13. Morimoto S, Kawamoto K, Sanada M, et.al. Sensorless control strategy for salient-pole PMSM based on extended EMF in rotating reference frame. *Proc. 2001 IEEE IAS Annual Meeting*. 2011;4;2637-2644.
14. Bashin KA, Torsunov RA, Semenov SV. Methods of topological optimization of structures used in the aerospace industry. *Bulletin of the PNRPU. Aerospace engineering*. 2017;4;51
15. Dadabaev ST, Isломовна TM, Saidulloевна MD. Modelling of starting transition processes of asynchronous motors with reduced voltage of the supply network. *European Journal of Electrical Engineering*. 2020;22;1;23-28.

### Authors of the publication

**Timur I. Petrov** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.