

## РАЗРАБОТКА ГЕНЕРАТОРА С ПЛОСКИМИ ПРОВОДАМИ И ВЕРТИКАЛЬНОЙ НАМОТКОЙ

В. Е. ВАВИЛОВ<sup>1</sup>, Е. А. ЕМАТИН<sup>2</sup>, Н. Г. ТАРАСОВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>s2\_88@mail.ru, <sup>2</sup>vjeka@mail.ru, <sup>3</sup>nikolay.tarasov.1994@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

**Аннотация.** Рассматривается генератор с обмоткой, состоящей из плоских проводов прямоугольного сечения. Проводится исследование внешней характеристики этого генератора, а также рассчитываются омические потери и потери в стали магнитопровода генератора.

**Ключевые слова:** Ansoft Maxwell; плоские провода; прямоугольное сечение; внешняя характеристика; омические потери; потери в стали магнитопровода.

### ВВЕДЕНИЕ

В статье описан порядок разработки бесконтактного электрического генератора с постоянными магнитами. Цель статьи – создание генератора с плоскими проводами, имеющими сечение в виде прямоугольника. Так же ставилась задача сравнения характеристик данной экспериментальной электрической машины, с характеристиками компьютерной модели, полученными в программе Ansoft Maxwell.

### ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ

Генератор с плоскими проводами представляет собой бесконтактную электрическую машину с обмоткой из проводов прямоугольного сечения. Его разработка и расчет ведется таким же образом, как и для обычного генератора, однако сечение плоских проводников выбирается исходя из расчетного сечения, и подбирается эквивалентное последнему. Преимуществом является лучший отвод тепла от обмоток и более эффективная технология укладки провода в катушках. Недостатком являются повышенные потери, связанные со скин-эффектом.

Отвод тепла от обмоток получается лучше в случае, когда площадь поверхности, которая охлаждается больше. Проведя подсчеты площади поверхности двух проводников одной площади, а именно прямо-

угольного проводника с соотношением сторон 0,5 на 10 мм и круглого проводника диаметром 2,52 мм, выяснили, что площадь внешней поверхности прямоугольного проводника в данном случае будет приблизительно в 3 раза больше, чем у проводника круглого сечения. Отсюда сделали предположение, что плоский провод будет лучше охлаждаться.

Более эффективная технология укладки провода в паз заключается в том, что в случае, когда находится оптимальное соотношение сторон прямоугольного провода, коэффициент заполнения паза получается выше, чем при укладке в паз круглого провода. К тому же укладка прямоугольного провода значительно легче, чем укладка круглого провода.

Потери на скин-эффект возникают при достаточно больших частотах вращения ротора генератора, что добавляет определенные сложности, которые увеличивают потери в генераторе. А так как бесконтактные электрические машины используют в основном при больших частотах вращения, то для генератора с плоскими проводниками это является достаточно серьезной проблемой.

Цель статьи – сравнение характеристик компьютерной модели генератора с характеристиками экспериментального образца.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА В ANSOFT MAXWELL

Окончание табл. 1

Модель генератора была получена с помощью модуля RMXprt, с использованием следующих параметров генератора, представленных в табл. 1.

Таблица 1

#### Параметры модели генератора

Параметр	Значение
Внешний диаметр статора, мм	120
Внутренний диаметр статора, мм	80
Внешний диаметр ротора, мм	76
Активная длина статора, мм	70
Активная длина ротора, мм	75
Толщина постоянного магнита, мм	5
Марка постоянного магнита	NdFeB

Количество полюсов	14
Количество витков в фазе, шт.	10
Сечение катушки, мм <sup>2</sup>	5
Сопротивление катушки, мОм	7,147

Далее построили модель в 2D и изменили площадь обмотки на площадь обмотки экспериментального образца. На рис. 1 изображена модель экспериментального образца.

Также была смоделирована работа генератора при трехфазном коротком замыкании при 3000 об/мин. Зависимость токов в фазах от времени при включении генератора показана на рис. 1.

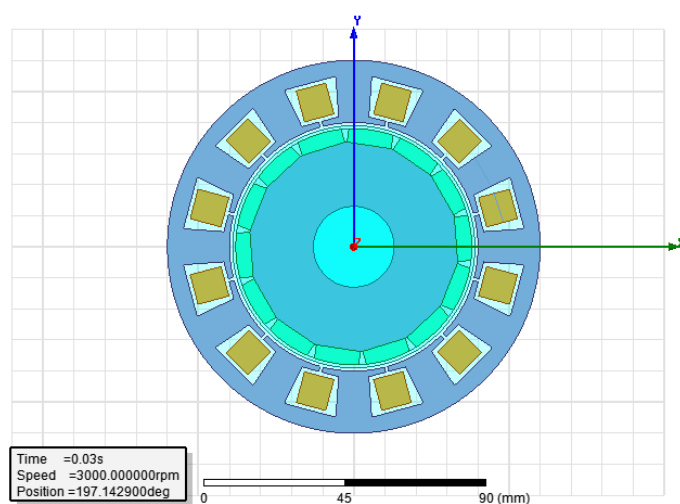


Рис. 1. Модель экспериментального образца

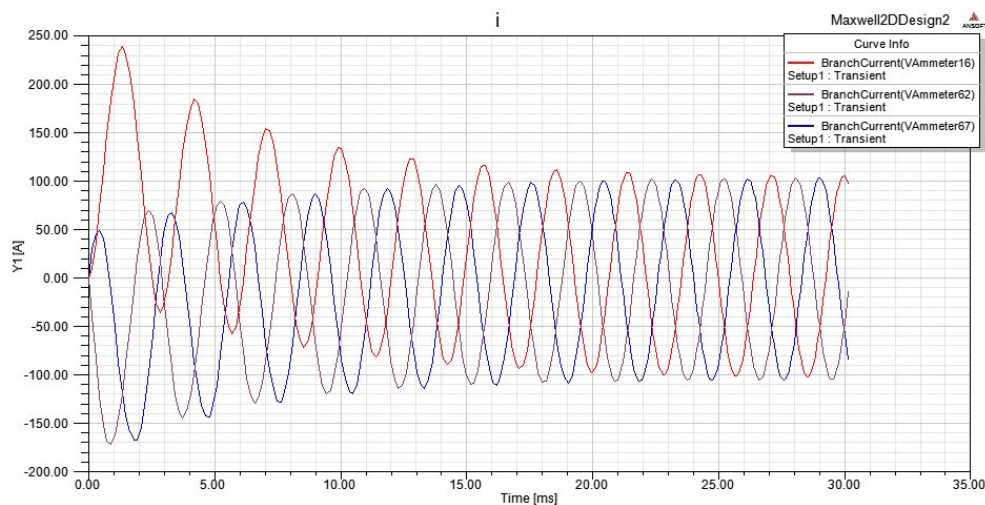


Рис. 2. Ток в фазах генератора при трехфазном КЗ

## СБОРКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА

## Экспериментальный образец



Рис. 3. Ротор экспериментального образца

На рис. 4 показан экспериментальный образец в сборе совместно с приводным двигателем.

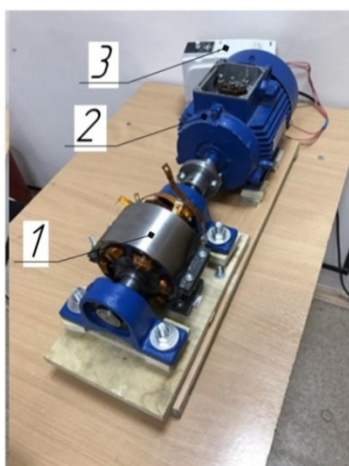


Рис. 4. Экспериментальный образец в сборе совместно с приводным двигателем: 1 – генератор с плоскими проводниками; 2 – асинхронный электродвигатель; 3 – частотный преобразователь

Таблица 2

## Параметры экспериментального образца

Параметр	Значение
Внешний диаметр статора, мм	120
Внутренний диаметр статора, мм	80
Внешний диаметр ротора, мм	76
Активная длина статора, мм	70
Активная длина ротора, мм	75
Толщина постоянного магнита, мм	5
Марка постоянного магнита	NdFeB
Количество полюсов	14
Количество витков в фазе, шт.	10
Ширина провода основной обмотки, мм	10
Толщина провода основной обмотки, мм	0,5
Сопротивление катушки, мОм	8,03

## СНЯТИЕ ВНЕШНИХ ХАРАКТЕРИСТИК С МОДЕЛИ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА

Затем была исследована внешняя характеристика одной катушки экспериментального образца при помощи приводного двигателя и измерительных приборов. Генератор выступал в роли шестифазной машины, так как снятие характеристик велось с одной катушки. В результате этих исследований были получены следующие данные, (табл. 3 и 4).

Таблица 3

## Результаты экспериментальных исследований при различных значениях частоты вращения приводного двигателя

$n=1500$ об/мин		$n=3000$ об/мин	
Ток в обмотке статора, А	Напряжение, В	Ток в обмотке статора, А	Напряжение, В
0,55	4,8	0,55	9,8
0,897	4,79	0,96	9,794
1,024	4,79	1,05	9,783
1,22	4,787	1,24	9,78
1,32	4,783	1,496	9,77
1,67	4,78	1,925	9,76
1,95	4,77	2,54	9,746
2,28	4,767	3	9,724
2,33	4,765	4,8	9,68
3,6	4,75	18,58	8,8

Таблица 4

## Результаты моделирования при различных значениях частоты вращения

$n=1500$ об/мин		$n=3000$ об/мин	
Ток в обмотке статора, А	Напряжение, В	Ток в обмотке статора, А	Напряжение, В
0,549	4,455	0,542	8,948
0,896	4,45	0,964	8,934
1,023	4,448	1,049	8,931
1,219	4,446	1,24	8,925
1,319	4,444	1,5	8,917
1,672	4,441	1,922	8,904
1,948	4,438	2,541	8,885
2,239	4,434	3,009	8,871
2,333	4,433	4,785	8,811
3,598	4,419	17,918	8,392

Далее были построены внешние характеристики по полученным данным.

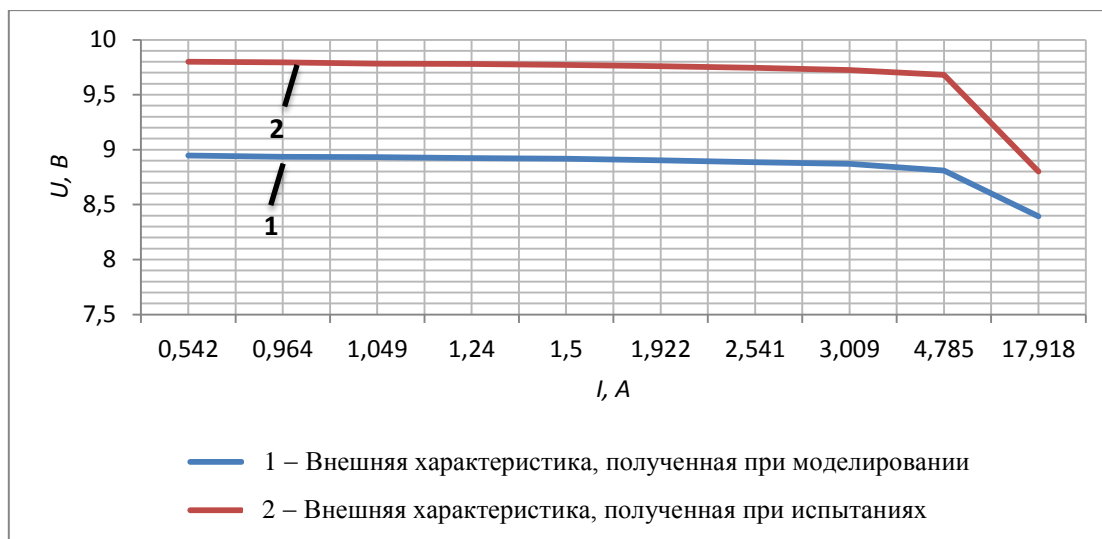


Рис. 5. Внешняя характеристика генератора при  $n=3000$  об/мин полученная при моделировании в Ansoft Maxwell 14.0 и испытаниях

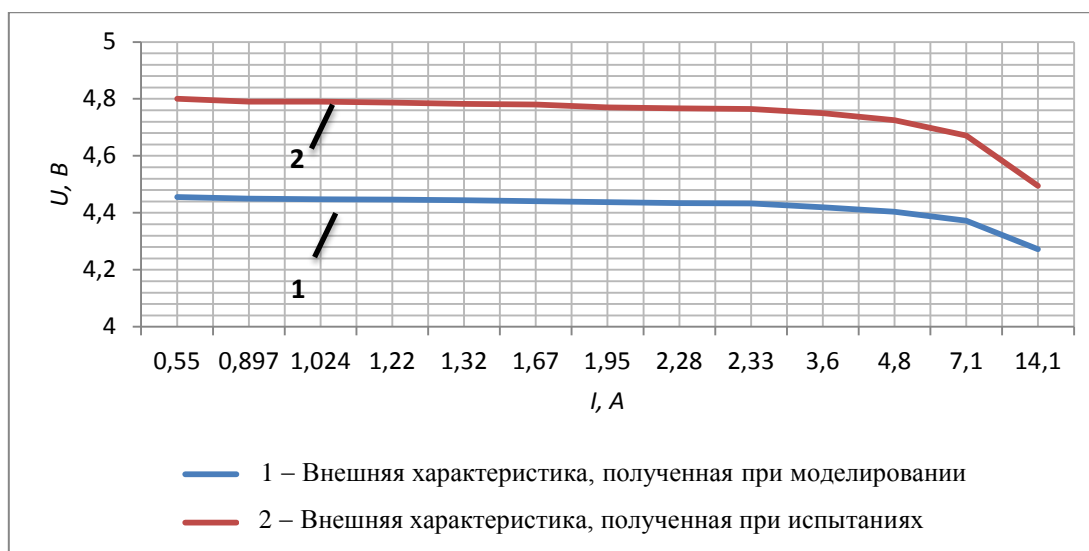


Рис. 6. Внешняя характеристика генератора при  $n=1500$  об/мин, полученная при моделировании в Ansoft Maxwell 14.0 и испытаниях

Также были исследованы токи короткого замыкания в одной катушке при скорости приводного двигателя, равной  $n=2500$  об/мин. В результате были получены следующие данные:

$$I_K = 83 \text{ A}; U_K = 1,3 \text{ В}.$$

Данные, полученные при моделировании генератора при скорости приводного двигателя  $n=2500$  об/мин:

$$I_K = 100,37 \text{ A}; U_K = 1,54 \text{ В}.$$

Также были посчитаны потери в обмотке статора, обусловленные вихревыми токами и эффектом близости элементарных проводников. Для этого была использована формула (1) из [1]:

$$P_{BT} = \frac{\pi^3 H_{n\max}^2 \mu_0^2 f^2 d_n^4 \sigma_{cu} l_{cu}}{4}. \quad (1)$$

Значение  $H_{n\max}^2$  – это максимальная напряженность поля в катушке статора. Это значение нашли с помощью моделирования.

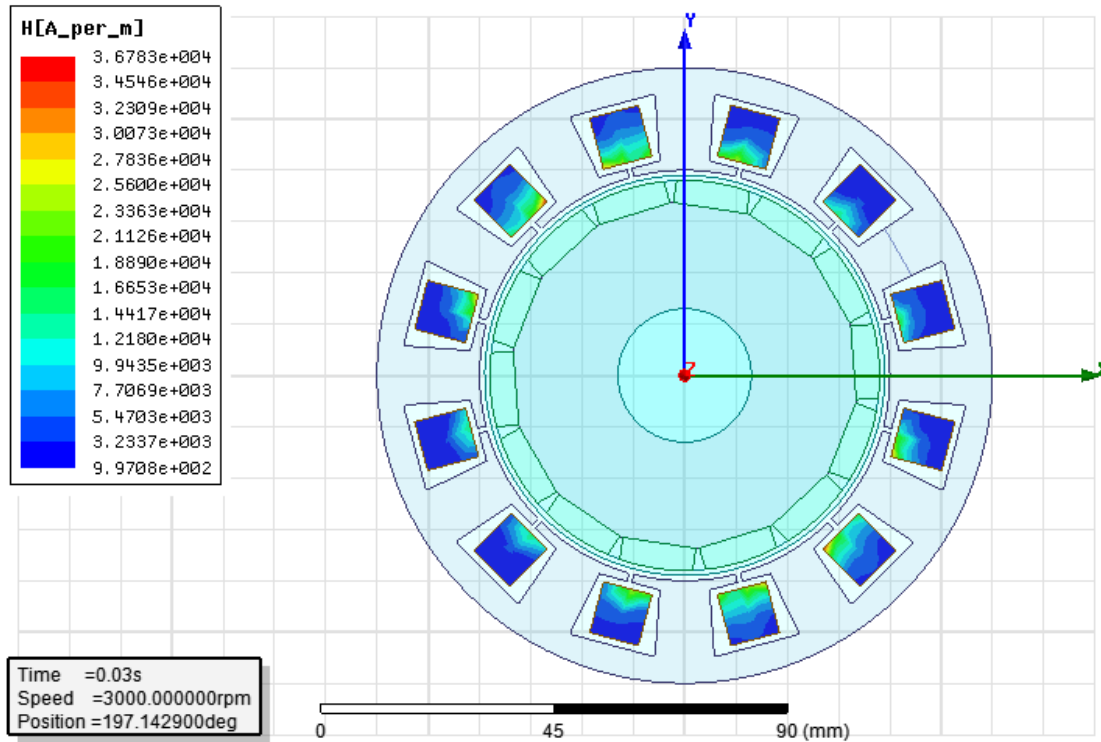


Рис. 7. Зависимость напряженности магнитного поля в пазу от времени

Так как напряженность магнитного поля распределяется по обмотке неравномерно, было взято некоторое среднее значение  $H_{max}^2 = 22400 \text{ А/м}$ . Величины  $f, d_n$  взяты из модуля RМхрт.

Далее были посчитаны потери в обмотке статора по формуле (1).

$$P_{BT} = \frac{(3,14)^3 \cdot (22400)^2 \cdot (1,26 \cdot 10^{-6})^2}{4} \times \frac{(350)^2 \cdot (2,52 \cdot 10^{-3})^4 \cdot 59,6 \cdot 10^6 \cdot 2}{4} = 3,63 \text{ Вт};$$

Далее были посчитаны омические потери  $P_m = mI^2 r_a$ , где  $I$  – действующий ток, протекающий по обмотке,  $r_a$  – активное сопротивление обмотки.

Ток получили из графика токов, полученного при моделировании работы генератора при определенной нагрузке.

$$I = \frac{I_M}{\sqrt{3}} = \frac{4,88}{\sqrt{3}} = 2,81 \text{ А};$$

$$P_m = 3 \cdot 2,81^2 \cdot 0,016 = 0,38 \text{ Вт}.$$

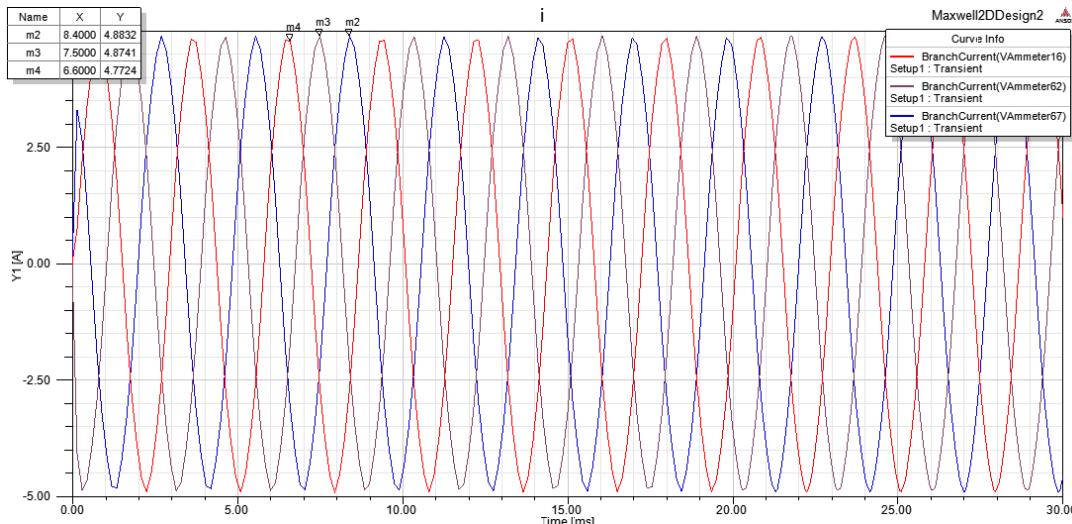


Рис. 8. График токов генератора работающего при нагрузке

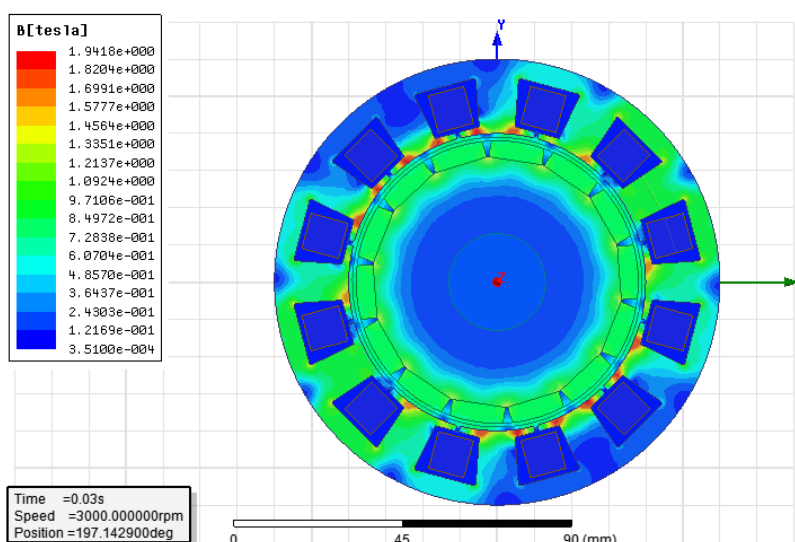


Рис. 9. Распределение магнитного поля в генераторе

Тогда суммарные потери в обмотках могут быть представлены в виде:

$$P_{cu} = P_m + P_{BT};$$

$$P_{cu} = 0,38 + 3,63 = 3,98 \text{ Вт.}$$

Потери в стали магнитопровода статора рассчитали по эмпирическому выражению [1]:

$$P_c = (7 \cdot 10^{-4} \cdot B^{1,75} \cdot f^{1,5} + 4,7 \cdot 10^{-4} \cdot B^{1,86} \cdot f^{1,53}).$$

Где индукцию магнитного поля найдем с помощью картины распределения магнитного поля в генераторе (рис. 9).

Исходя из рис. 9 и неоднородного распределения магнитной индукции по магнитопроводу статора, было взято значение магнитной индукции, равное 1,1 Тл, отсюда:

$$P_{c.y.} = (7 \cdot 10^{-4} \cdot 1,1^{1,75} \cdot 350^{1,5} + 4,7 \cdot 10^{-4} \cdot 1,1^{1,86} \cdot 350^{1,53}) = 9,8 \text{ Вт};$$

$$P_c = P_{c.y.} \cdot M;$$

где масса получена в RMXprt и равна:

$$M = 2,08 \text{ кг};$$

$$P_c = 9,8 \cdot 2,08 = 20,38 \text{ Вт};$$

### ВЫВОД

Анализируя полученные данные, был сделан вывод, что жесткость внешней ха-

рактеристики макетного образца практически совпадает с характеристикой, полученной при моделировании данного генератора. Внешняя характеристика получается достаточно стабильная и жесткая. Однако напряжение получается приблизительно на 4,5–9 % меньше, чем получилось при испытаниях данного генератора. Также, сравнив ток короткого замыкания, полученный опытным путем и моделированием, был сделан вывод, что ток короткого замыкания в экспериментальном образце получился приблизительно на 20 % меньше, чем при моделировании. Ко всему вышперечисленному, также были рассчитаны потери в стали магнитопровода статора и потери в меди. Эти потери в сумме составили 25,9 % от мощности генератора.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исмагилов Ф. Р., Хайруллин И. Х., Вавилов В. Е. Высокооборотные электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами. Москва: Инновационное машиностроение, 2017. – 248 с. [F. R. Ismagilov, I. H. Khayrullin, V. E. Vavilov, High-speed electrical machines with high-coercivity permanent magnets. Moscow: The innovation mechanical engineering, 2017.]

### ОБ АВТОРАХ

**ВАВИЛОВ Вячеслав Евгеньевич**, к.т.н., доцент кафедры ЭМ УГАТУ.

**ЕМАТИН Евгений Александрович**, студент 3 курса.

**ТАРАСОВ Николай Геннадьевич**, аспирант кафедры ЭМ УГАТУ.

## METADATA

**Title:** Development of the generator with flat wires and vertical winding

**Authors:** V. E. Vavilov<sup>1</sup>, E. A. Ematin<sup>2</sup>, N. G. Tarasov<sup>3</sup>

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup>s2\_88@mail.ru, <sup>2</sup>vjeka@mail.ru,

<sup>3</sup>nikolay.tarasov.1994@yandex.ru

**Language:** Russian

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 2 (21), pp. 19-25, 2019. ISSN 2225-9309 (Print).

**Abstract:** In this article the generator with the winding consisting of flat wires of rectangular section is considered. The research of an external characteristic of this generator is conducted, and ohmic losses and losses in generator magnetic conductor steel are also calculated.

**Key words:** Ansoft Maxwell, flat wires, rectangular section, external characteristic, ohmic losses, losses in magnetic conductor steel.

**About authors:**

**VAVILOV, Vyacheslav Evgenyevich**, Candidate of Technical Sciences, associate professor EM UGATU.

**EMATIN, Evgeny Aleksandrovich**, student 3 courses.

**TARASOV, Nikolay Gennadyevich**, graduate student of department EM UGATU.