

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»
Институт «Политехнический», факультет «Аэрокосмический»
Кафедра «Летательные аппараты»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой, д.т.н., профессор

_____ / В.Г. Дегтярь /

“ _____ ” _____ 2018г.

Вентильный двигатель рулевой машины

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ
РАБОТЕ

ЮУрГУ-13.03.02.2018.193 ВКР

Руководитель проекта:

Доцент, к.т.н

_____ /А.И. Согрин/

“ _____ ” _____ 2018 г.

Автор проекта

студент группы _____

_____ /А.Е.Капустин/

“ _____ ” _____ 2018 г.

Нормоконтролер

Доцент, к.т.н.

_____ / /

“ _____ ” _____ 2018 г.

Челябинск 2018 г.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования

«Южно-Уральский государственный университет»
(национальный исследовательский университет)

Политехнический институт
Аэрокосмический факультет

Кафедра «Летательные аппараты»
Направление 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

_____/В.Г. Дегтярь/
_____/2018 г.

ЗАДАНИЕ

на выпускную квалификационную работу студента

Капустина Алексея Евгеньевича

(Ф.И.О. полностью)

Группа П-428

1 Тема работы

Вентильный двигатель рулевой машины

утверждена приказом по университету от 04.04.2018 г. № 580

2 Срок сдачи студентом законченной работы: 21.06.2018г.

3 Исходные данные к работе

Начальные параметры для проектирования

4 Перечень подлежащих разработке вопросов

4.1. Определение главных размеров двигателя

4.2 Расчет магнитной цепи

4.3 Разработка расчет обмотки статора

4.4 параметры обмотки

Всего листов 37

					ЮУрГУ-13.03.02.2018.193 ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		5

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Наименование этапов выпускной квалификационной работы	Срок выполнения этапов работы	Отметка о выполнении руководителя
Ознакомление с конструкцией	09.04.2018 – 13.04.2018	
Расчет основных размеров	16.04.2018 – 26.04.2018	
Расчет магнитной цепи	27.04.2018 – 18.05.2018	
Расчет обмотки статора	21.05.2018 – 01.06.2018	
Определение параметров Обмотки	04.06.2018 – 21.06.2018	

Заведующий кафедрой _____ / В.Г. Дегтярь /

Руководитель работы _____ / А.И. Согрин /

Студент _____ / А.Е. Капустин /

АННОТАЦИЯ

Капустин.А.Е Вентильный двигатель рулевой машины –
Челябинск: ЮУрГУ, П-428; 2018, 30 с., 5 ил.,
библиографический список – 10 наим.

Основной целью данной выпускной квалификационной работы является расчет параметров вентильного двигателя для рулевой машины летательного аппарата.

В работе проводятся расчеты главных размеров, магнитной цепи, определение рабочих характеристик, а также определение потерь мощности.

					ЮУрГУ-13.03.02.2018.193 ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		8

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	10
1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛАВНЫХ РАЗМЕРОВ.....	12
2 РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ	17
3 ОБМОТКА СТАТОРА.....	29
4 ПАРАМЕТРЫ ОБМОТКИ.....	33
5 РАСЧЕТ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ.....	35
5.1 ПОСТРОЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК.....	32
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	35
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	36

ВВЕДЕНИЕ

Электрические машины являются важным составляющим в современном мире. Они широко применяются для различной производственной промышленности, на электрических станциях, в автомобильной промышленности, в авиации, а также в быту. За последнее время значительно возросло применение электрических машин малой мощности до нескольких сотен ватт. Их используют в устройствах автоматики и вычислительной техники. так называемых микромашин, широко применяемых во многих устройствах автоматики, телемеханики, связи, промышленной электроники, счетно-решающей и измерительной техники.

На данный момент преобладают имеют сети переменного тока, поэтому в промышленности применяются в основном машины переменного тока. Наряду с этим распространение получили и машины постоянного тока, несмотря на то, что они дороже, чем машин переменного тока. Это связано с тем, что они обладают наиболее хорошими эксплуатационными характеристиками в отношении регулирования частоты вращения, реверса, пуска, и допускают более высокие перегрузки по сравнению с машинами переменного тока. Но имеется существенный недостаток связанный с щеточным механизмом, из-за которого существенно понижается надежность всей конструкции, появляется взрывоопасность двигателя, а также создаются радиопомехи.

Поэтому был спроектирован бесконтактный двигатель, работающий от постоянного тока, щеточный- коллекторный узел в котором заменен коммутатором на основе полупроводниковых элементов. Такой двигатель называется вентильным двигателем.

Вентильные электродвигатели представляют собой синтез электрической машины (двигателя) и полупроводникового преобразователя, который позволяет регулировать частоту вращения в широких пределах. Конструкция вентильного электродвигателя подобна синхронной машине. На его валу имеется датчик положения, выходные сигналы которого воздействуют на устройства управления

					ЮУрГУ-13.03.02.2018.193 ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		10

полупроводниковыми приборами преобразователя постоянного тока в переменный (инвертора) или переменного тока одной частоты в переменный ток другой частоты.

Идея создания вентильного двигателя, который должен был стать бесколлекторным аналогом электрической машины, снабженной механическим коллектором и щетками, возникла в 30-е годы XX в. в СССР. Эта идея связана с именем Д.А. Завалишина. Работы этих лет ориентировались на применение громоздких ионных приборов, входивших в состав коммутаторов вентильных двигателей, что ограничивало их практическое применение.

Толчком к развитию работ по бесконтактным двигателям постоянного тока послужило появление транзисторов, обладающих хорошими переключающими свойствами и компактностью, а также острая потребность космонавтики и авиационной техники в двигателях, способных надежно работать длительное время в сложных условиях без обслуживания.

Конструкторская проблема при построении модели электрической машины, которая была бы оптимальной во всех отношениях, как с точки зрения собственной конструкции, так и с точки зрения производительности, остается актуальной. Но, как правило, при ее разработке, так или иначе, приходится задаваться какими – либо параметрами, осуществлять множество расчетов, перебирая тем самым различные вероятности исходов, а это, как очевидно, не позволяет однозначным образом решить поставленную задачу.

1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛАВНЫХ РАЗМЕРОВ

Вентильный электродвигатель – это тип синхронной машины, реализованный в замкнутой системе с использованием датчика положения ротора, системы управления и силового полупроводникового преобразователя. Такие двигатели также называют бесконтактными двигателями постоянного тока или обращенной машиной постоянного тока. Такой тип двигателя создан с целью улучшения свойств двигателей постоянного тока.

В проектируемом двигателе индуктор располагается на роторе (в виде постоянных магнитов), роль якоря принимает статор.

Расчет электрических машин начинается с определения главных размеров, исходя из заданных условий. Необходимо определить внутренний и наружный диаметр якоря, диаметр статора и т.д

Коэффициент, с помощью которого будет сделан расчет диаметра якоря, рассчитывается по следующей формуле

$$K = \frac{K_b \cdot K_{об} \cdot \pi^2 \cdot \alpha_\delta}{60}, \quad (1.1)$$

где: $K_b = 1.1$ — коэффициент формы индукции в зазоре

$K_{об} = 0,93$ — обмоточный коэффициент

$\alpha_\delta = 0,74$ — расчетный коэффициент полюсного перекрытия

$$K = \frac{1.11 \cdot 0.93 \cdot 3,14^2 \cdot 0.74}{60} = 0,125$$

Индукция в зазоре определяется по формуле, исходя из параметра выбранного материала магнита

$$B_\delta = 0,85 \frac{B_r}{K_b}, \quad (1.2)$$

					ЮУрГУ-13.03.02.2018.193 ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		12

где $B_r = 1,05$ — индукция магнита NdFeB

$$B_\delta = 0,85 \frac{1,05}{1,1} = 0,811$$

Диаметр якоря определим по следующей формуле:

$$D_a = \sqrt[3]{\frac{P_H}{K \cdot A \cdot B_\delta \cdot \lambda \cdot n}}, \quad (1.3)$$

где $P_H = 438$ Вт – номинальная мощность двигателя

$A = 13000$ А/м – линейная нагрузка,

$\lambda = 0,8$ – геометрический коэффициент,

$n = 955$ об/мин – номинальная скорость вращения.

$$D_a = \sqrt[3]{\frac{438}{0,125 \cdot 13 \cdot 10^3 \cdot 0,811 \cdot 0,8 \cdot 955}} = 0,076 \text{ м}$$

Длина якоря:

$$l_a = D_a \cdot \lambda,$$

$$l_a = 0,076 \cdot 0,8 = 0,061 \text{ м}$$

Число пар полюсов рассчитаем по следующей формуле:

$$p = \frac{60 \cdot f}{n}, \quad (1.4)$$

где $f = 125$ Гц – частота.

Из этой же формулы можно выделить зависимость частоты от оборотов. скорость синхронного электродвигателя может очень точно контролироваться изменением частоты питающего тока. Таким образом эти электродвигатели подходят для высокоточных приложений.

$$p = \frac{60 \cdot 125}{955} = 7,85$$

Исходя из того, что число пар полюсов должно быть целым числом, принимаем:

$$p = 8$$

Первоначально, расчет на число пар полюсов происходил с частотой 300 Гц, но по причине того, что число пар полюсов получалось слишком большим для данного двигателя, частоту пришлось значительно снизить до заданного выше значения.

Важным параметром в данном расчете является ширина магнита, для удобства производства, данное значение должно быть больше 4...5 мм.

Ширину магнита определим из следующего выражения:

$$B_m = \alpha_\delta (D_a - 2\delta) \cdot \frac{\pi}{2p}, \quad (1.5)$$

где $\delta = 0.0005$ м — величина воздушного зазора

$$B_m = 0,74(0,076 - 2 \cdot 0,0005) \cdot \frac{\pi}{2 \cdot 8} = 0.011 \text{ м}$$

Изначальный выбор высоты полюса магнита был предварительный исходя из выражения

$$h_m = (0,1..0,2) \cdot D_a, \quad (1.6)$$

Но в последующих расчетах было выяснено, что наиболее эффективным для увеличения коэффициента использования двигателя оказалась высота полюса магнита, равная

$$h_m = 0,005 \text{ м}$$

Наружный диаметр якоря определяется по следующей формуле:

$$D_{\text{я}} = D_{\text{а}} + 2(h_m + \delta), \quad (1.7)$$

$$D_{\text{я}} = 0,076 + 2(0,005 + 0,0005) = 0,087 \text{ м}$$

Методом нахождения наилучшего варианта, был определен наружный диаметр статора, который равен

$$D_{\text{h}} = \frac{D_{\text{а}}}{(0,5 \dots 0,7)}, \quad (1.8)$$

$$D_{\text{h}} = 0,113 \text{ м}$$

Высоту статора определим по формуле

$$h_{\text{я}} = \frac{D_{\text{h}} - D_{\text{я}}}{2}, \quad (1.9)$$

$$h_{\text{я}} = \frac{0,113 - 0,087}{2} = 0,013$$

Длина средней магнитной линии в станине:

$$L_{\text{я}} = \pi \frac{D_{\text{я}} - h_{\text{я}}}{2p} + h_{\text{я}}, \quad (1.10)$$

$$L_{\text{я}} = \pi \frac{0,087 - 0,013}{2 \cdot 8} + 0,013 = 0,033$$

					ЮУрГУ-13.03.02.2018.193 ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		16

2 РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

Для расчета магнитной цепи, первоначально нужно задать минимально возможные параметры для высоты шлица, высоты спинки ротора и статора а также ширины зубца. Путем изменения этих данных ведется подборка оптимальной индукции магнитного поля для статора, ротора и зубцов.

Электромагнитная мощность

$$P_{эм} = \frac{1 - \eta}{2 \cdot \eta} P_n, \text{ Вт} \quad (2.1)$$

$$P_{эм} = \frac{1 - 0,92}{2 \cdot 0,92} \cdot 438 = 457 \text{ Вт}$$

Среднее ЭДС:

$$E_{ср} = \frac{1 + \eta}{2} \cdot (U - \Delta U_k), \quad (2.2)$$

где $U=36 \text{ В}$ — напряжение на зажимах.

$\Delta U_k = 0.7$ — Падение напряжения на переключающем элементе.

$$E_{ср} = \frac{1 + 0,92}{2} \cdot (36 - 0,7) = 33,9 \text{ В}$$

Среднее значение тока определяется по формуле:

$$I_{ср} = \frac{P_{эм}}{E_{ср}}, \quad (2.3)$$

$$I_{ср} = \frac{457}{33,9} = 13,48 \text{ А}$$

Угол на полюс рассчитаем по следующей формуле:

					ЮУрГУ-13.03.02.2018.193 ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		17

$$\alpha_{\pi} = \frac{\pi}{p}, \quad (2.4)$$

$$\alpha_{\pi} = \frac{3,14}{8} = 0,393$$

Угол на зубец:

$$\alpha_z = \frac{2 \cdot \pi}{Z}, \quad (2.5)$$

$$\alpha_z = \frac{2 \cdot 3,14}{18} = 0,349$$

Рассчитаем высоту паза:

$$h_{\pi} = \frac{D_h - D_a - 2 \cdot h_c}{2}, \quad (2.6)$$

где $h_c = 0.0027$ — высота спинки статора.

$$h_{\pi} = \frac{0,113 - 0,87 - 2 \cdot 0,0027}{2} = 0,016$$

Для определения вылета лобовых частей, воспользуемся формулой:

$$l_{\pi} = \frac{\tau_{cp} - \alpha_z}{2} \cdot K_{\pi}, \quad (2.7)$$

где $\tau_{cp} = \frac{\alpha_z}{2} \cdot (D_h - 2 \cdot h_c - h_{\pi}) = 0.016$

$K_{\pi} = 1,1$ – коэффициент удлинения лобовых частей

$$l_{\pi} = \frac{0,016 - 0,349}{2} \cdot 1,1 = 6,229 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Осевая длина статора:

$$l_c = l_a, \quad (2.8)$$

$$l_c = 0,061 \text{ м}$$

Осевая длина статора с учетом вылета лобовых частей:

$$l_H = l_c + 2l_{\text{л}}, \quad (2.9)$$

$$l_H = 0,061 + 2 \cdot 6,229 \cdot 10^{-3} = 0,073 \text{ м}$$

Осевая длина магнита:

$$l_M = l_c + 5\delta, \quad (2.10)$$

$$l_M = 0,061 + 5 \cdot 0,0005 = 0,063 \text{ м}$$

Объем магнита:

$$V_M = h_M \cdot l_M \cdot b_M, \quad (2.11)$$

$$V_M = 0,005 \cdot 0,063 \cdot 0,011 = 3,435 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$$

Предварительный поток в нейтральном сечении магнита:

$$\Phi_1 = \frac{H_c \cdot \mu_0 \cdot V_M}{\delta \cdot K_\mu + h_M}, \quad (2.12)$$

где $K_\mu = 1,5$ – коэффициент насыщения магнитной цепи

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$$

$H_c = 850 \cdot 10^3 \frac{\text{А}}{\text{м}}$ — коэрцитивная сила магнита

$$\Phi_0 = \frac{850 \cdot 10^3 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 3,435 \cdot 10^{-6}}{0,0005 \cdot 1,5 + 0,005} = 6,381 \cdot 10^{-4}$$

$$R_p = \frac{H_p \cdot l_{cp,p}}{\Phi_1}, \quad (2.15)$$

$$R_p = \frac{4572 \cdot 0,005}{4,6 \cdot 10^{-4}} = 7,09 \cdot 10^3 \text{ Ом}$$

Площадь магнита:

$$S_M = l_M \cdot b_M, \quad (2.16)$$

$$S_M = 0,063 \cdot 0,011 = 6,87 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

Сопротивление воздушного потока магнитному потоку:

$$R_\delta = \frac{\delta}{\mu_0 \cdot S_M}, \quad (2.17)$$

$$R_\delta = \frac{0,0005}{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 6,87 \cdot 10^{-4}} = 5,791 \cdot 10^5 \text{ Ом}$$

Поток через зубец:

$$\Phi_z = \frac{\Phi_1 \cdot 2 \cdot p}{Z}, \quad (2.18)$$

$$\Phi_z = \frac{4,6 \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot 8}{18} = 4,089 \cdot 10^{-4}$$

Индукция магнитного поля в зубце:

$$B_z = \frac{\Phi_z}{a_z \cdot l_c \cdot k_c}, \quad (2.19)$$

Где $a_z = 0,0047 \text{ м}$ – ширина зубца,

$k_c = 0,93$ – коэффициент заполнения пакета сталью

Где $H_c = 2218$ – напряженность магнитного поля в спинке статора

$$R_c = \frac{2218 \cdot 0,0068}{4,6 \cdot 10^{-4}} = 3,267 \cdot 10^4 \text{ Ом}$$

Для проверки условий, примем

$$B_{M1} = l_M = 0,063 \text{ м}$$

$$B_{M2} = B_M = 0,011 \text{ м}$$

$$t = \frac{(l_H - l_M - 2\Delta\varepsilon)}{2}, \quad (2.25)$$

где $\Delta\varepsilon = 0,0007$

$$t = \frac{(0,073 - 0,063 - 2 \cdot 0,0007)}{2} = 4.279 \cdot 10^{-3}$$

Размеры в относительных единицах:

$$b_{M1}^* = \frac{b_{M1}}{h_M}, \quad (2.26)$$

$$b_{M1}^* = \frac{0,063}{0,005} = 12,634$$

$$b_{M2}^* = \frac{b_{M2}}{h_M}, \quad (2.27)$$

$$b_{M2}^* = \frac{0,011}{0,005} = 2,175$$

$$t^* = \frac{t}{h_M}, \quad (2.28)$$

$$t^* = \frac{4.279 \cdot 10^{-3}}{0,005} = 0,856$$

Относительная магнитная проницаемость магнита из сплава $NdFeB$

$$\mu_r^* = 1,04$$

$$\rho_H^* = \frac{\delta \cdot h_M}{\mu_r^* \cdot S_M}, \quad (2.29)$$

где $\mu_r^* = 1,04$

$$\rho_H^* = \frac{0,0005 \cdot 0,005}{1,04 \cdot 6,87 \cdot 10^{-4}} = 3,499 \cdot 10^{-3}$$

Расчетный относительный коэффициент:

$$b_\delta^* = \mu_r^* \cdot b_{M1}^* \cdot b_{M2}^* \cdot \rho_H^* \quad (2.30)$$

$$b_\delta^* = 1,04 \cdot 12,634 \cdot 2,175 \cdot 3,499 \cdot 10^{-3} = 0,1$$

Относительная глубина проникновения полей рассеяния со стороны торцевых экранов:

$$\Delta y_{01}^* = 0,1204 + 0,0168 \cdot b_{M2}^* + 0,152 \cdot \mu_r^* \cdot t^* + b_\delta^* \cdot (0,237 + 0,173 \cdot \mu_r^* \cdot t^* - 0,086 \cdot t^* \cdot \mu_r^* \cdot b_{M2}^*) \quad (2.31)$$

$$\Delta y_{01}^* = 0,1204 + 0,0168 \cdot 3,499 + 0,152 \cdot 1,04 \cdot 0,856 + 0,1 \cdot (0,237 + 0,173 \cdot 1,04 \cdot 0,856 - 0,086 \cdot 0,856 \cdot 1,04 \cdot 3,499) = 0,315$$

$$\Delta y_{03}^* = \Delta y_{01}^* = 0,315$$

Угол наклона экранов

$$\gamma = \frac{\alpha_\Pi}{2}, \quad (2.32)$$

$$\gamma = \frac{0,393}{2} = 0,196$$

Относительная глубина проникновения полей рассеяния со стороны смежного магнита:

$$\Delta y_{02}^* = 0,1204 + 0,0168 \cdot b_{M2}^* + 0,236 \cdot b_\delta^* - 0,0194 \cdot \mu_r^* \cdot \gamma - 0,00243 \cdot \mu_r^* \cdot \gamma \cdot b_{M2}^*$$

$$\Delta y_{02}^* = 0,1204 + 0,0168 \cdot 2,175 + 0,236 \cdot 0,1 - 0,0194 \cdot 1,04 \cdot 0,196 - 0,00243 \cdot 1,04 \cdot 0,196 \cdot 2,175 = 0,175$$

$$\Delta y_{04}^* = \Delta y_{02}^* = 0,175$$

$$\Delta b_M^* = b_{M1}^* - b_{M2}^*, \quad (2.34)$$

					ЮУрГУ-13.03.02.2018.193 ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		24

$$\Delta b_M^* = 12,634 - 2,175 = 10,459$$

Удельные магнитные проводимости на единицу площади нейтрального сечения:

$$\lambda_{\mu 3} = 1 + (0,869 - 0,1023 \cdot b_{M2}^* - 0,0896 \cdot \Delta b_M^* + 0,0118 \cdot \Delta b_M^* \cdot b_{M2}^*) \cdot \Delta y_{01}^*$$

$$\lambda_{\mu 3} = 1 + (0,869 - 0,1023 \cdot 2,175 - 0,0896 \cdot 10,459 + 0,0118 \cdot 10,459 \cdot 2,175) \cdot 0,315 = 0,987$$

$$\lambda_{\mu 1} = \lambda_{\mu 3} = 0,987$$

$$\lambda_{\mu 2} = 1 + (0,869 - 0,1023 \cdot b_{M2}^*) \cdot \Delta y_{02}^*, \quad (2.36)$$

$$\lambda_{\mu 2} = 1 + (0,869 - 0,1023 \cdot 2,175) \cdot 0,175 = 1,113$$

$$\lambda_{\mu 4} = \lambda_{\mu 2} = 1,113$$

Площадь участков области формирования рабочего потока:

$$S_{m1} = \frac{b_{M1}^* + \Delta b_M^* - 2 \cdot \Delta y_{02}^*}{2} \cdot \left(\frac{b_{M2}^*}{2} - \Delta y_{01}^* \right), \quad (2.37)$$

$$S_{m1}^* = \frac{12,634 + 10,459 - 2 \cdot 0,175}{2} \cdot \frac{2,175}{2} - 0,315 = 8,787$$

$$S_{m3}^* = S_{m1}^* = 8,787$$

$$S_{m2}^* = \frac{b_{M2}^*}{2} - \Delta y_{01}^*, \quad (2.38)$$

$$S_{m2}^* = \frac{2,175}{2} - 0,315 = 0,773$$

$$S_{m4}^* = S_{m2}^* = 0,773$$

Полезная проводимость в относительных единицах:

$$\Lambda_m^* = 2 \cdot \mu_r^* \cdot (S_{m1}^* \cdot \lambda_{\mu 1} + S_{m2}^* \cdot \lambda_{\mu 2}), \quad (2.40)$$

$$\Lambda_m^* = 2 \cdot 1,04 \cdot (12,546 \cdot 0,987 + 0,773 \cdot 1,113) = 19,834$$

Полезная проводимость в абсолютных величинах:

$$\Lambda_m = h_m \cdot \mu_0 \cdot \Lambda_m^* \quad (2.41)$$

$$\Lambda_m = 0,005 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 19,834 = 1,246 \cdot 10^{-7}$$

Сопротивление магнита основному магнитному потоку:

$$R_m = \frac{1}{\Lambda_m} \quad (2.42)$$

$$R_m = \frac{1}{1,246 \cdot 10^{-7}} = 8,024 \cdot 10^6$$

Полное магнитное сопротивление магнитному потоку:

$$R = R_p + R_\delta + R_z + R_c + R_m \quad (2.43)$$

$$\begin{aligned} R &= 4,956 \cdot 10^4 + 5,791 \cdot 10^5 + 1,101 \cdot 10^5 + 3,267 \cdot 10^4 + 8,024 \cdot 10^6 \\ &= 8,795 \cdot 10^6 \end{aligned}$$

Полезный магнитный поток:

$$\Phi = \frac{H_c \cdot h_m}{R} \quad (2.44)$$

$$\Phi = \frac{850 \cdot 10^3 \cdot 0,005}{8,795 \cdot 10^6} = 4,833 \cdot 10^{-3}$$

Магнитный поток Φ отличается от потока Φ_1 на 4,8 процентов. Следовательно поток, и все габаритные размеры подобраны верно, причем значение Φ_1 меньше, чем Φ . Из этого следует, что магнитная цепь имеет насыщение.

Определим объем болванки ротора для расчета массы. Воспользуемся следующей формулой:

$$V = R^2 \cdot \pi \cdot l_m \quad (2.44)$$

где $R=0,033$ — радиус болванки

$$V = 0,033^2 \cdot 3,14 \cdot 0,063 = 2,096 \cdot 10^{-4}$$

Масса ротора определяется по формуле:

					ЮУрГУ-13.03.02.2018.193 ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		26

$$m = V \cdot \rho,$$

где $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$ — плотность стали

$$m = 2,096 \cdot 10^{-4} \cdot 7800 = 1,635$$

Определим момент инерции по заданной формуле

$$J = \frac{m \cdot R^2}{2},$$

$$J = \frac{1,635 \cdot 0,033^2}{2} = 8,636 \cdot 10^{-4}$$

Добротность рассчитывается по следующей формуле:

$$D = \frac{M_H}{\sqrt{J}},$$

$$D = \frac{4,375}{\sqrt{8,636 \cdot 10^{-4}}} = 148,877$$

Из этого следует, что наш двигатель обеспечивает заданную добротность.

Максимальная индукция в спинке ротора:

$$B_{pmax} = \frac{\Phi}{2 \cdot h_p \cdot l_m}, \quad (2.45)$$

$$B_{pmax} = \frac{4,883 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 2,3 \cdot 10^{-3} \cdot 0,063} = 1,663$$

Максимальная индукция в зубце:

$$B_{zmax} = \frac{\Phi \cdot 2 \cdot p}{Z \cdot \alpha_z \cdot l_c \cdot k_c}, \quad (2.46)$$

$$B_{zmax} = \frac{4,883 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 8}{18 \cdot 0,0047 \cdot 0,061 \cdot 0,93} = 1,586$$

Максимальная индукция в спинке статора:

$$B_{cmax} = \frac{\Phi}{2 \cdot h_c \cdot l_c \cdot k_c}, \quad (2.47)$$

$$B_{cmax} = \frac{4,883 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,0027 \cdot 0,061 \cdot 0,93} = 1,553$$

Индукция в воздушном зазоре:

$$B_\delta = \frac{\Phi}{S_M}, \quad (2.48)$$

$$B_\delta = \frac{4,883 \cdot 10^{-3}}{6,87 \cdot 10^{-4}} = 0,703$$

3 ОБМОТКА СТАТОРА

Для расчета сечения активной меди нам понадобится рассчитать площадь паза.

Так как мы выбрали овальный паз, то воспользуемся следующими формулами для нахождения ее площади.

Диаметр меньшей окружности образующей паза:

$$D_{п1} = \frac{\frac{\alpha_z}{2} (D_h - 2h_c - 2h_{п}) - a_z}{1 - \frac{\alpha_z}{2}}, \quad (3.1)$$

$$D_{п1} = \frac{\frac{0,349}{2} (0,113 - 2 \cdot 0,0027 - 2 \cdot 0,016) - 0,0047}{1 - \frac{0,349}{2}} = 0,01$$

Диаметр большей окружности образующей паза:

$$D_{п2} = \frac{\frac{\alpha_z}{2} (D_h - 2h_c) - a_z}{1 + \frac{\alpha_z}{2}}, \quad (3.2)$$

$$D_{п2} = \frac{\frac{0,349}{2} (0,113 - 2 \cdot 0,0027) - 0,0047}{1 + \frac{0,349}{2}} = 0,012$$

Высота прямой части паза:

$$h_{12} = h_{п} - \frac{D_{п2} + D_{п1}}{2}, \quad (3.3)$$

$$h_{12} = 0,016 - \frac{0,012 + 0,01}{2} = 4,798 \cdot 10^{-3}$$

Площадь овального паза:

$$S_{п} = \frac{\pi}{8} (D_{п2}^2 + D_{п1}^2) + \frac{h_{12}}{2} (D_{п2} + D_{п1}), \quad (3.4)$$

$$S_{\Pi} = \frac{\pi}{8} (0,01^2 + 0,012^2) + \frac{4,798 \cdot 10^{-3}}{2} (0,01 + 0,012) = 1,524 \cdot 10^{-4}$$

Сечение активной меди

$$Q_m = S_{\Pi} \cdot z \cdot k_m, \quad (3.5)$$

где $k_m = 0,35$ — сечение активной меди

$$Q_m = 1,524 \cdot 18 \cdot 0,35 = 9,6 \cdot 10^{-4}$$

Средняя длина полувитка:

$$l_{cp} = l_c + l_{\Pi} + \tau_{cp}, \quad (3.6)$$

$$l_{cp} = 0,061 + 0,0062 + 0,016 = 0,083$$

Для расчета коэффициента использования двигателя, необходимо провести ряд расчетов.

Диаметр двигателя по середине воздушного зазора:

$$D_{\delta} = D_B + 2h_p + 2h_m + \delta, \quad (3.7)$$

$$D_{\delta} = 0,076 + 2 \cdot 0,0023 + 2 \cdot 0,005 + 0,0005 = 0,091 \text{ м}$$

Температурный коэффициент

$$k_t = 1 + \alpha_t, \quad (3.8)$$

где $\alpha_t = 0,004$

$$k_t = 1 + 0,004 = 1,004$$

Коэффициент использования двигателя

$$K_{\Pi} = 0,5 D_{\delta} \cdot B_{\delta} \cdot K_c \cdot l_c \cdot \sqrt{\frac{Q_m \cdot K_H}{\rho \cdot l_{cp} \cdot k_t}}, \quad (3.9)$$

где $K_c = 0,85$ — коэффициент формы поля в воздушном зазоре

$K_H = 0,909$ — Коэффициент коммутации

$\rho = 0,175 \cdot 10^{-3}$ — удельное сопротивление меди

$$K_{II} = 0,5 \cdot 0,091 \cdot 0,811 \cdot 0,85 \cdot 0,061 \cdot \sqrt{\frac{9,6 \cdot 10^{-4} \cdot 0,909}{0,175 \cdot 10^{-3} \cdot 0,083 \cdot 1,004}} = 1,473$$

Фазное напряжение:

$$U_{\phi} = \frac{U}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{3}}, \quad (3.10)$$

$$U_{\phi} = \frac{36}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{3}} = 14,7$$

Число зубцов на фазу:

$$Z_{\phi} = \frac{Z}{3}, \quad (3.11)$$

$$Z_{\phi} = \frac{18}{3} = 6$$

Число витков обмотки:

$$W_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{4,44 \cdot \Phi \cdot k_{об} \cdot f'}, \quad (3.12)$$

Где $k_{об} = 0,93$ – обмоточный коэффициент.

$$W_{\phi} = \frac{14,7}{4,44 \cdot 4,6 \cdot 10^{-4} \cdot 0,93 \cdot 125} = 61,9$$

Принимаем $W_{\phi} = 54$

Число активных проводников в пазу:

$$W_{II} = W_{\phi} \cdot \frac{3}{Z_{\phi}}, \quad (3.13)$$

$$W_{\pi} = 54 \cdot \frac{3}{18} = 9$$

Номинальный фазный ток:

$$I_{\phi} = I_{д} \cdot \sqrt{\frac{2}{3}}, \quad (3.14)$$

$$I_{\phi} = \frac{312,5 \cdot 10^3}{600 \cdot \sqrt{3}} = 28,7 \text{ A}$$

Эффективная площадь сечения проводника:

$$q_{\text{эф}} = \frac{I_{\phi}}{J}, \quad (3.18)$$

где $J = 10^7$ Плотность тока в обмотке статора

$$q_{\text{эф}} = \frac{28,7}{10^7} = 2,87 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

Для определения площади заполнения паза, определим площадь витков меди, по следующей формуле:

$$S_m = q_{\text{эф}} \cdot W_{\pi} \cdot 2, \quad (3.19)$$

$$S_m = 2,87 \cdot 10^{-6} \cdot 9 \cdot 2 = 5,159 \cdot 10^{-5}$$

Коэффициент заполнения паза:

$$k_{\text{зп}} = \frac{S_m}{S_{\pi}}, \quad (3.20)$$

$$k_{\text{зп}} = \frac{5,159 \cdot 10^{-5}}{1,524 \cdot 10^{-4}} = 0,339$$

Коэффициент заполнения паза должен находиться в диапазоне от (0,3 до 0,35)

4 ПАРАМЕТРЫ ОБМОТКИ

Коэффициент проводимости для потока пазового рассеяния:

$$\lambda_{\pi} = \left(0,618 + \frac{h_{\text{ш}}}{a_{\text{ш}}} + \frac{h_z - h_{\text{ш}} - 1,5 \cdot a_{\text{ш}}}{3d_{\text{п1}}} \right), \quad (4.1)$$

где $h_{\text{ш}} = 0,0005$ — ширина шлица

$$\lambda_{\pi} = 0,618 + \frac{0,0005}{0,0005} \cdot 1 + \frac{0,005 - 0,0005 - 1,5 \cdot 0,0005}{1,5 \cdot 0,01} = 1,739$$

Коэффициент проводимости для потока лобовых долей:

$$\lambda_{\text{л}} = 0,34 \cdot \frac{q}{l_c} \cdot \left(l_{\text{л}} + \tau_{\text{ср}} - 0,64 \cdot \frac{\pi \cdot D_{\delta}}{Z} \right), \quad (4.2)$$

$$\lambda_{\text{л}} = 0,34 \cdot \frac{2,866 \cdot 10^{-6}}{0,061} \cdot \left(0,0062 + 0,016 - 0,64 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,061}{18} \right) = 1,943 \cdot 10^{-7}$$

$$BH_{\text{max}} = \frac{B_r \cdot H_c}{4}, \quad (4.3)$$

$$BH_{\text{max}} = \frac{1,05 \cdot 850 \cdot 10^3}{4} = 2,231 \cdot 10^5$$

Коэффициент проводимости для потока статора, замыкающегося через магнит:

$$\lambda_{\text{м}} = \frac{1}{2 \cdot p \cdot \mu_0} \cdot \left(1 - 2 \sqrt{\frac{B_r \cdot H_c}{BH_{\text{max}}} + \frac{B_r \cdot H_c}{BH_{\text{max}}}} \right) \cdot \frac{B_r}{H_c}, \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{м}} &= \frac{1}{2 \cdot 8 \cdot 1,257 \cdot 10^{-6}} \cdot \left(1 - 2 \sqrt{\frac{1,05 \cdot 850 \cdot 10^3}{2,231 \cdot 10^5} + \frac{1,05 \cdot 850 \cdot 10^3}{2,231 \cdot 10^5}} \right) \cdot \frac{1,05}{850 \cdot 10^3} \\ &= -0,43 \end{aligned}$$

Сумма коэффициентов проводимостей для всех магнитных потоков статора:

$$\Lambda = \lambda_{\pi} + \lambda_{\text{л}} + \lambda_{\text{м}}, \quad (4.5)$$

$$\Lambda = 1,739 + 1,943 \cdot 10^{-7} - 0,43 = 1,309$$

Индукция в секции:

$$L_c = 2 \cdot \mu_0 \cdot \Lambda \cdot \frac{W^2 \cdot l_c}{p \cdot q}, \quad (4.6)$$

$$L_c = 2 \cdot 1,257 \cdot 10^{-6} \cdot 1,309 \cdot \frac{54^2 \cdot 0,061}{8 \cdot 2,866 \cdot 10^{-6}} = 25,4$$

Где $W = 54$ – число витков в секции.

Истинная длина статора:

$$l_{c.ист.} = l_c \cdot 1,06, \quad (4.7)$$

$$l_{c.ист.} = 0,061 \cdot 1,06 = 0,065 \text{ м}$$

Средняя длина витка обмотки статора:

$$l_{в.} = 2 \cdot (l_{c.ист.} + l_{л}), \quad (4.8)$$

$$l_{в.} = 2 \cdot (0,065 + 4,308 \cdot 10^{-3}) = 0,141 \text{ м}$$

Рассчитаем температурный коэффициент

$$k_{\theta} = 1 + 0,004 \cdot (t_p - 20), \quad (4.9)$$

где $t_p = 135^\circ$ - Для класса изоляции

$$k_{\theta} = 1 + 0,004 \cdot (135 - 20) = 1,46$$

$$q_a = \frac{I_{\phi}}{j_{sh}}, \quad (4.10)$$

где $j_{sh} = 6$ - плотность тока в обмотке с естественным охлаждением

$$q_a = \frac{28,7}{6} = 4,78$$

Активное сопротивление обмотки статора:

$$r_1 = k_{\theta} \cdot \frac{W \cdot l_{в.}}{57 \cdot q_a}, \quad (4.11)$$

$$r_1 = 1,46 \cdot \frac{54 \cdot 28 \cdot 0,141}{57 \cdot 4,78} = 0,041 \text{ Ом}$$

5 РАСЧЕТ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ

Электрические потери в обмотке статора вычисляются по следующей формуле:

$$P_{эл} = m \cdot I_{sh}^2 \cdot r, \quad (5.1)$$

где $I_{sh} = 12,6$ — действующее значение тока секции

$m=3$ — число фаз

$$P_{эл} = 3 \cdot 12,6^2 \cdot 0,041 = 19,4 \text{ Вт}$$

Потери в коммутирующем устройстве:

$$P_k = m_1 \cdot \Delta U_k \cdot I_{cp}, \quad (5.2)$$

где $m_1 = 2$ — число последовательно соединенных коммутирующих элементов.

$\Delta U_k = 0,7$ В — потери на коммутирующем элементе

$$P_k = 2 \cdot 0,7 \cdot 13,5 = 18,9 \text{ Вт}$$

Рассчитаем массу спинки статора по следующей формуле:

$$m_a = \frac{(D_H^2 - (D_H - 2h_a)^2) \cdot l_a \cdot k_c \cdot \rho \cdot \pi}{4}, \quad (5.3)$$

$$m_a = \frac{(0,113^2 - (0,113 - 2 \cdot 0,0027)^2) \cdot 0,061 \cdot 0,93 \cdot 7,8 \cdot 10^3 \cdot 3,14}{4} = 0,421$$

$$m_c = \frac{(4 - S_{п} \cdot z) \cdot l_a \cdot k_c \cdot \rho \cdot \pi}{(D_H^2 - D_a^2) \pi 4}, \quad (5.4)$$

$$m_c = \frac{(4 - 1,524 \cdot 10^{-4} \cdot 18) \cdot 0,061 \cdot 0,93 \cdot 7,8 \cdot 10^3}{(0,113^2 - 0,078^2) \cdot 4} = 1,96$$

Магнитные потери на гистерезис и вихревые токи

$$P_{\text{мг}} = P_0 \left(\frac{f}{50}\right)^{1,4} (B_c^2 \cdot m_a \cdot k_{\text{та}} + B_z^2 \cdot m_z \cdot k_{\text{tz}}), \quad (5.5)$$

где $P_0 = 1,6$ Удельные потери в листовой электротехнической стали

$k_{\text{та}} = 1,5$ — коэффициент учитывающий увеличение магнитных потерь в спинке якоря после механической обработки.

$k_{\text{tz}} = 2$ — коэффициент учитывающий увеличение магнитных потерь в зубцах после механической обработки.

$m_z = 1,539$ — масса зубцов якоря.

$$P_{\text{мг}} = 1,6 \left(\frac{125}{50}\right)^{1,4} (1,478^2 \cdot 0,421 \cdot 1,5 + 1,509^2 \cdot 1,539 \cdot 2) = 48,4 \text{ Вт}$$

Расчет механических потерь включает в себя расчет потерь в подшипниках и потерь на трение якоря о воздух.

Масса вращающейся части двигателя:

$$m_B = \frac{D^2 \cdot \pi \cdot l_\delta \cdot \gamma}{4}, \quad (5.6)$$

$$m_B = \frac{0,078^2 \cdot 3,14 \cdot 0,061 \cdot 7800}{4} = 2,803 \text{ кг}$$

Потери на трение в подшипниках:

$$P_{\text{тп}} = K_M \cdot m_B \cdot n \cdot 10^{-3}, \quad (5.7)$$

где $K_M = 2$ коэффициент для шарикоподшипниковых

$$P_{\text{тп}} = 2 \cdot 2,803 \cdot 955 \cdot 10^{-3} = 5,357 \text{ Вт}$$

Потери на трение якоря о воздух:

$$P_{\text{тв}} = 2 \cdot D_B^2 \cdot l_\delta \cdot n^3 \cdot 10^{-6}, \quad (5.8)$$

$$P_{\text{тв}} = 2 \cdot 0,078^2 \cdot 0,061 \cdot 955^3 \cdot 10^{-6} = 0,609 \text{ Вт}$$

Суммарные потери

$$P_c = 1,1(P_{\text{эл}} + P_k + P_{\text{мг}} + P_{\text{тв}} + P_{\text{тп}}), \quad (5.9)$$

$$P_c = 1,1(19,4 + 18,8 + 48,4 + 0,609 + 5,357) = 102 \text{ Вт}$$

Суммарные потери имеют достаточно большое значение, основу этих потерь, безусловно, составляют потери на коммутационные устройства и на магнитные потери на гистерезис. При 120- градусной двух-полупериодной коммутации, к источнику всегда подключены две фазы в последовательности.

5.1 ПОСТРОЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК

Рабочие характеристики представлены ниже:

Характеристика зависимости входной мощности от полезной представлена на рисунке 1.

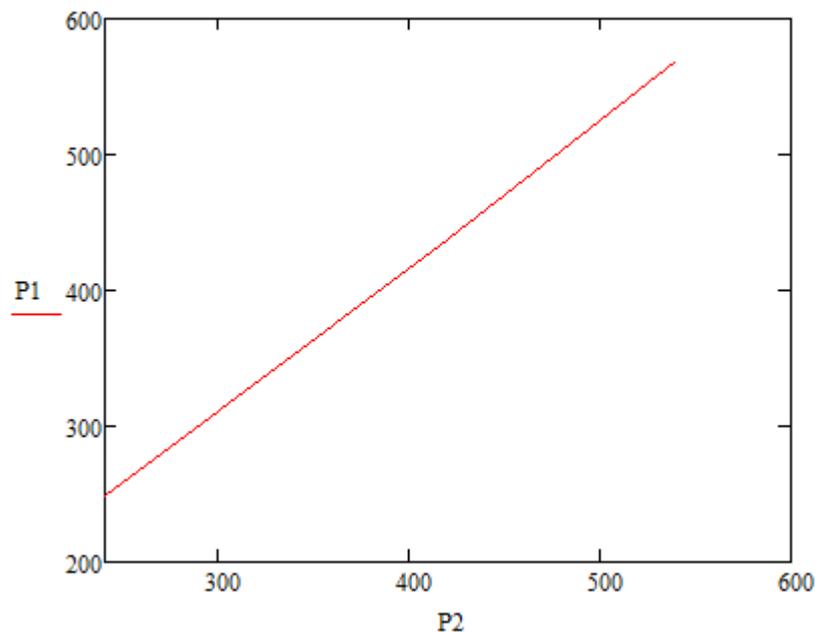


Рисунок 1 - Характеристика входной мощности от полезной

Механическая характеристика представлена на рисунке 2.

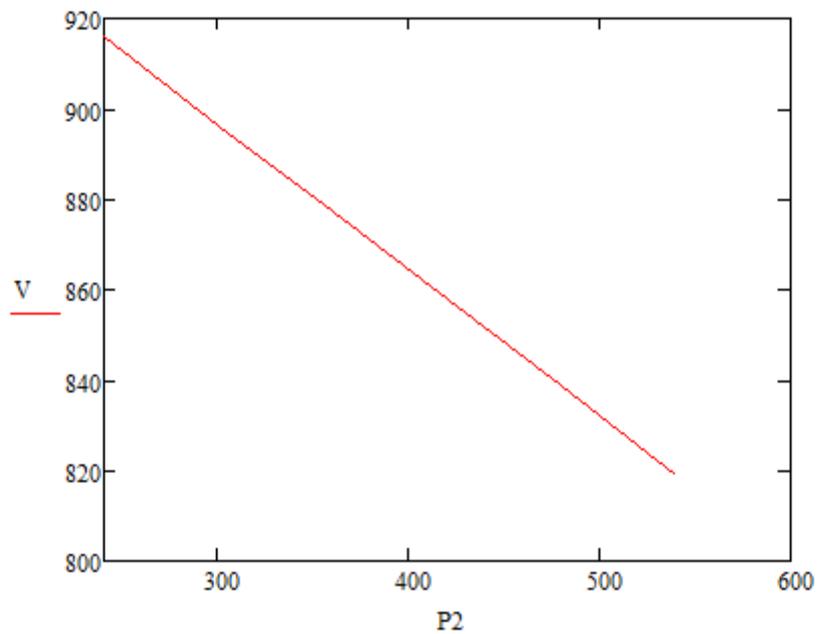


Рисунок 2 - Механическая зависимость

Характеристика зависимости тока от полезной мощности представлена на рисунке 3.

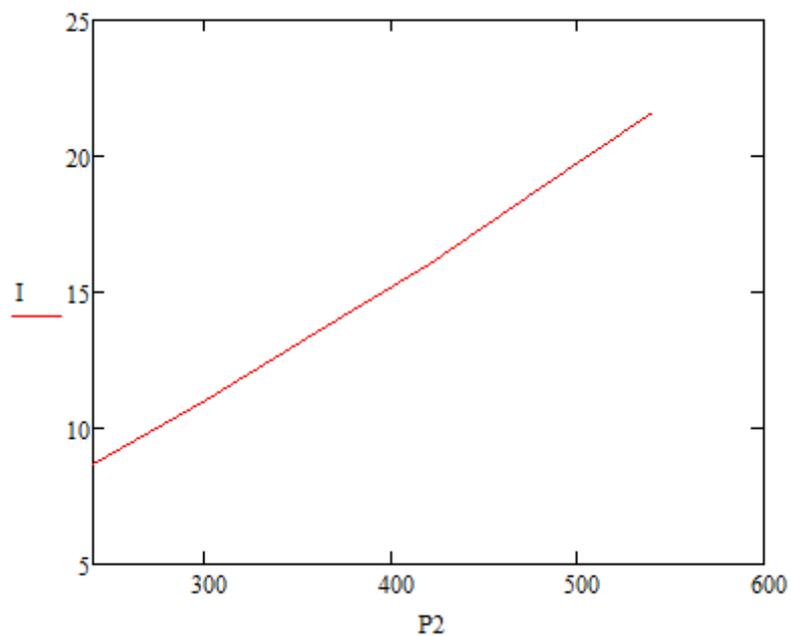


Рисунок 3 - Зависимость тока от полезной мощности

Магнитные и электрические потери представлены на рисунке 4.

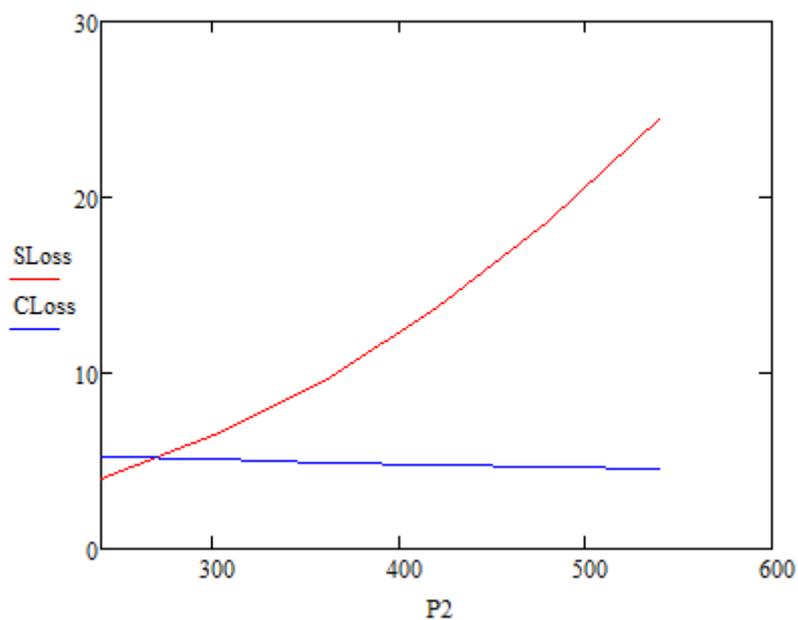


Рисунок 4 - Магнитные и электрические потери. S_{Loss} – магнитные потери, C_{Loss} – электрические потери

Коэффициент полезного действия представлен на рисунке 5.

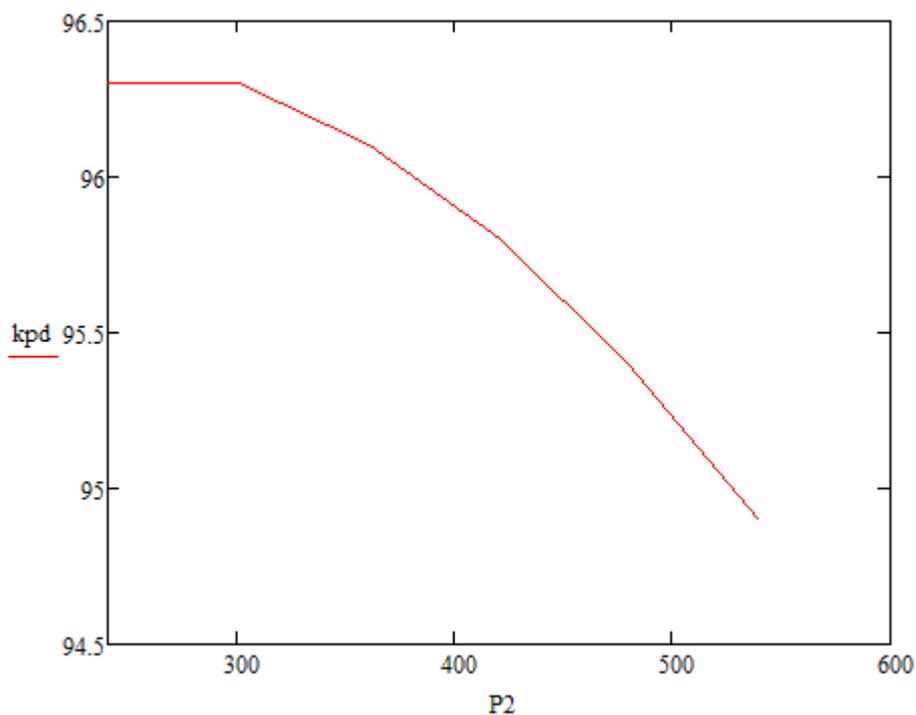


Рисунок 5 - КПД машины: k_{pd} – КПД

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения выпускной квалификационной работы был спроектирован и рассчитан вентильный двигатель для рулевой машины.

По ходу выполнения были определены такие характеристики двигателя как габаритные размеры, включающие в себя все наружные и внутренние размеры машины, так и характеристическая составляющая, включающая в себя расчет магнитной цепи, а также определение потерь мощности в разных участках системы.

Сложность расчета двигателя в том, что нельзя однозначно задаться определенными значениями той или иной характеристики, потому что в ходе расчета становится ясно, что большую часть ранее заданных значений придется заменить. Например, такие трудности возникали при выборе значения для магнитного потока, ведь его диапазон очень широк, но постепенные переборы значений приводят к выбору истинного значения.

В целом, можно сказать, что данный спроектированный двигатель имеет достаточно хорошие характеристики, при весьма ограниченных размерах и может использоваться по назначению в авиационной технике.

					ЮУрГУ-13.03.02.2018.193 ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		40

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1) В.А.Лифанов. — Расчет электрических машин малой мощности с возбуждением от постоянных магнитов – 2-ое издание. – Челябинск, Издательский центр ЮУрГУ 2010. – 164 с.
- 2) И.П. Копылов, Б.К. Клоков. — Проектирование электрических машин. – 4-ое издание. —Высшая школа 2005. – 767 с.
- 3) А.И.Вольдек. — Электрические машины.— 3-е изд..перераб — М.Энергия.—1979. — 876 с.
- 4) Вентильные электродвигатели. История электротехники. — <https://tech.wikireading.ru/15747>.
- 5) Вентильный двигатель. Принцип работы синхронного и асинхронного. — <https://www.asutpp.ru/elektrodvigatel/ventilnyj-dvigatel.html>.
- 6) Применение электрических машин.— <https://lektsii.org/6-90257.html>.
- 7) Виды, работа и применение вентильных двигателей.— <https://electrosam.ru/glavnaja/jelektrooborudovanie/ustrojstva/ventilnye-dvigateli/>
- 8) Ротор вентильного электродвигателя. — <http://www.jurnal.org/articles/2015/elect1.html>
- 9) Обмотка статора. — <http://engineering-solutions.ru/motorcontrol/wrsm/>.
- 10) Обмотка якоря. — <https://lektsii.org/6-96457.html>