

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ И ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ ПРИ ИХ РАДИАЛЬНОМ РАСПОЛОЖЕНИИ В КОНСТРУКЦИИ МОТОР-КОЛЕСА**А.А.Рак, Т.Ю.Александров, А.Е.Познер****CALCULATION OF THE PARAMETERS OF INTERACTION OF ELECTROMAGNETS AND PERMANENT MAGNETS IN A RADIAL-COIL MOTOR-WHEEL****A.A.Rak, T.Yu.Alexandrov, A.E.Pozner***Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, alexandr.a.rak@novsu.ru*

Статья посвящена принципам расчёта параметров взаимодействия постоянных магнитов и электромагнитов, расположенных радиально в бесколлекторном электродвигателе типа «мотор-колесо». Приводятся сведения о распределении механических сил в двигателе, примеры расчёта электромагнитных усилий, информация о типе формирования фаз, соединения обмоток в мотор-колесе. Приводятся вычисления минимально необходимой длины проводника, а также количества витков проводника, намотанного на катушку электромагнита, с учетом радиального расположения электромагнита в составе мотор-колеса. Применение описанных в данной статье методик расчета позволяет создать различные конфигурации электродвигателей и мотор-колес для решения широкого спектра задач. Развитие данной технологии в России позволит выйти на конкурентоспособный уровень в сфере создания персонального электротранспорта, робототехнических средств и других устройств, использующих электродвигатели.

Ключевые слова: мотор-колесо, магнит, электромагнит, бесколлекторный электродвигатель, обмотка

Для цитирования: Рак А.А., Александров Т.Ю., Познер А.Е. Расчет параметров взаимодействия постоянных магнитов и электромагнитов при их радиальном расположении в конструкции мотор-колеса // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2022. №3(128). С.37–40. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2022.3\(128\).37-40](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2022.3(128).37-40)

The article is devoted to the principles of parameter calculating during permanent magnets and electromagnets interaction in a brushless electric motor, which is "radial-coil motor-wheel". Information is given on the distribution of mechanical forces in the engine, examples of the calculation of electromagnetic forces, information on the type of phase formation and the connection of windings in the motor-wheel. Calculations of the minimum required length of the conductor, as well as the number of turns of the conductor wound on the coil of the electromagnet, considering the radial arrangement of the electromagnet as part of the motor-wheel, are given. The application of the calculation methods described in this article allows one to create various configurations of electric motors and motor-wheels to solve a wide range of tasks. The development of this technology in Russia will make it possible to reach a competitive level in the field of creating personal electric vehicles, robotics and other devices using electric motors.

Keywords: radial-coil motor-wheel, magnet, electromagnet, brushless electric motor, winding

For citation: Rak A.A., Alexandrov T.Yu., Pozner A.E. Calculation of the parameters of interaction of electromagnets and permanent magnets in a radial-coil motor-wheel // Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences. 2022. №3(128). P.37–40. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2022.3\(128\).37-40](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2022.3(128).37-40)

Введение

В настоящее время в числе важнейших задач развития нашей страны находится импортозамещение. Одним из наиболее динамично развивающихся рынков является рынок мотор колес, где ежегодно выпускается более 26 млн штук. Основными производителями является Китай (более 80%), США и Германия.

Мотор-колесо — это колесо со встроенными бесщеточным электродвигателем, а также, в некоторых случаях, колёсным редуктором и тормозной системой. Область применения достаточно обширна: электросамокаты, электромотоциклы, инвалидные коляски и другой элетротранспорт.

В России разработка мотор-колес находится на начальном этапе развития. Поэтому организация производства отечественных мотор-колес, не уступающих зарубежным аналогам, а в ряде случаев и превышающих их, является актуальной задачей.

Отправной точкой для рассматриваемого проекта является задача, поставленная одним из партнеров Новгородского государственного университета — АО «НПО «КВАНТ». Столкнувшись со сложностями импорта готовых модулей, предприятие предложило лаборатории робототехники НовГУ разработать самостоятельный проект мотор-колеса, отвечающего заданным параметрам. НПО «КВАНТ» рассматривает в качестве одного из путей диверсификации бизнеса разработку и производство персонального электротранспорта, в частности электрических инвалидных колясок собственной конструкции.

Расчет механических и электромагнитных усилий, возникающих в мотор-колесе при заданных параметрах, является одной из основополагающих задач при проектировании.

Практическая цель расчета — вычислить минимально необходимую длину провода и количество витков катушки электромагнита при радиальном его расположении в составе мотор-колеса.

Расчет механических усилий

Для целей текущего проекта приняты следующие исходные условия:

- общая масса инвалидной коляски с человеком в ней $m = 150$ кг;
- максимальная скорость коляски $v = 5$ км/ч;
- средний коэффициент силы трения $k = 0,15$;
- напряжение аккумуляторов $U = 40$ В;
- диаметр покрышки колеса — 0,2 м;
- внутренний диаметр ротора — 0,1 м;
- зазор между статором и магнитами — 1 мм;
- ускорение разгона $a = 1$ м/с²;
- размеры электромагнита: длина — 20 мм, ширина — 10 мм, толщина — 25 мм;
- параметры магнита: длина — 25 мм, ширина — 12 мм, толщина — 5 мм, сила сцепления $F_{\text{маг}} = 5$ кг;
- диаметр провода обмотки катушки электромагнита — 0,8 мм.

Схема распределения механических сил указана на рис.1.

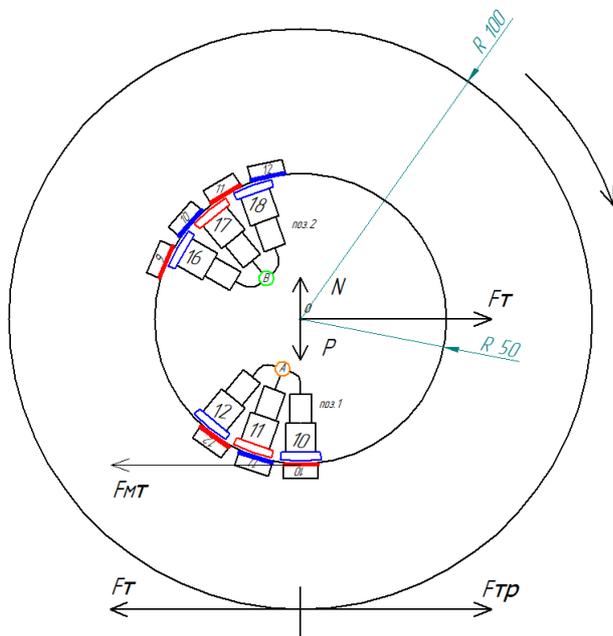


Рис.1. Схема распределения механических сил

Вес конструкции

$$P = m \cdot g,$$

где $g = 9,8$ м/с² — ускорение свободного падения. Таким образом, $P = 150 \cdot 9,8 = 1470$ Н.

Сила трения покоя, которую необходимо преодолеть для старта, равна

$$F_{\text{тр}} = P \cdot k.$$

Значит, $F_{\text{тр}} = 1470 \cdot 0,15 = 220$ Н.

Для разгона коляски до заданной скорости v с заданным ускорением a , требуется сила тяги F_T :

$$F_T = F_{\text{тр}} + F,$$

где $F = ma$ — сила, требующаяся для разгона коляски. Следовательно, $F_T = 220 + 150 \cdot 1 = 370$ Н.

Момент силы

$$M_T = F_T \cdot R_k,$$

где R_k — радиус колеса. Поэтому $M_T = 370 \cdot 0,1 = 37$ Нм.

Суммарная магнитная сила F_{MT} , действующая на ротор:

$$F_{\text{MT}} = \frac{M_T}{R_d},$$

где $R_d = 0,05$ м — радиус ротора двигателя.

Таким образом, $F_{\text{MT}} = 370/0,05 = 740$ Н.

Расчет электромагнитных усилий

Для получения требуемых характеристик электродвигателя необходимо вычислить усилие электромагнита, что напрямую зависит от количества витков в обмотке катушки.

В разрабатываемом двигателе, согласно справочнику обмотчика электродвигателей [1], выбираем схему из 18 катушек соленоидов и 20 постоянных магнитов из сплава неодима (Fe + Ni + Вo). Максимальная скорость вращения, выбираемая согласно справочнику [1], равна 300 об/мин. На рис.2 приведена схема расположения постоянных магнитов и электромагнитов.

В процессе движения происходит превращение химической энергии батареи аккумуляторов в энергию электрического тока и далее в механическую (кинетическую) энергию перемещения.

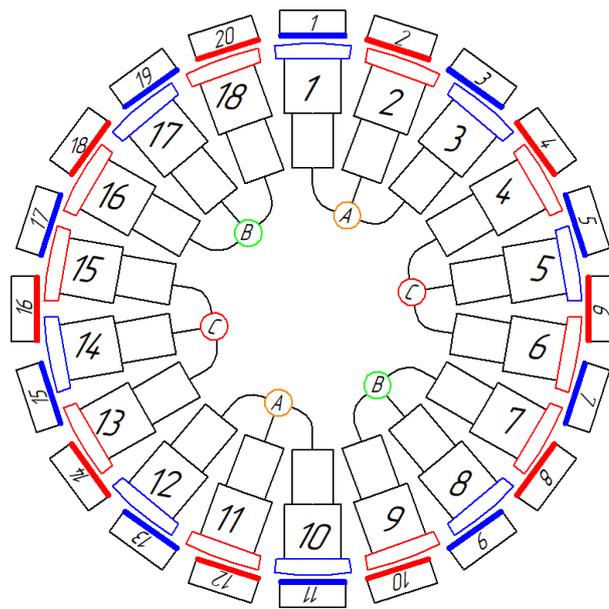


Рис.2. Схема расположения магнитов и электромагнитов

Формула расчета кинетической энергии W :

$$W = m \cdot \frac{v^2}{2} = 150 \cdot \frac{1,4^2}{2} = 147 \text{ Вт.}$$

Энергия Q электрического тока, приводящего электродвигатель мотор-колеса коляски с человеком в движение:

$$Q = L \cdot \frac{I^2}{2},$$

где I — сила тока, L — индуктивность.

По закону сохранения энергии $W = Q$, тогда

$$m \cdot \frac{v^2}{2} = L \cdot \frac{I^2}{2}.$$

Асинхронный электродвигатель мотор-колеса приводят во вращение три фазы импульсного прямоугольного напряжения «А, В, С», формируемого контроллером. Для целей текущего проекта принимаем формирование фаз по типу «звезда» (см. рис.3).

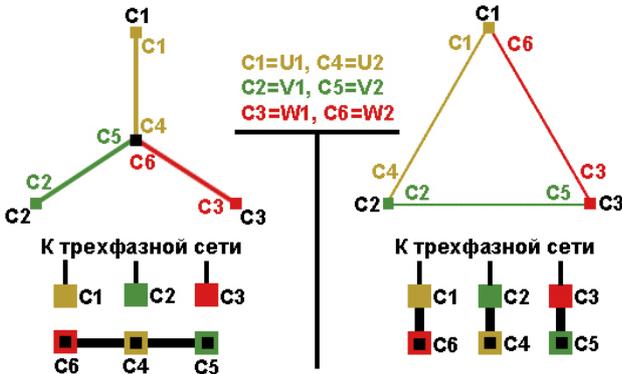


Рис.3. Соединение обмотки в звезду и треугольник

Сформированные напряжения фаз через согласующие транзисторные ключи контроллера поступают на катушки статора, формируя в них вращающееся по часовой стрелке в плоскости вращения электромагнитное поле. Это поле, взаимодействуя с магнитным полем постоянных магнитов ротора, приводит во вращение ротор.

На рис.4 приведена схема соединения обмоток катушек соленоидов каждой фазы [1].

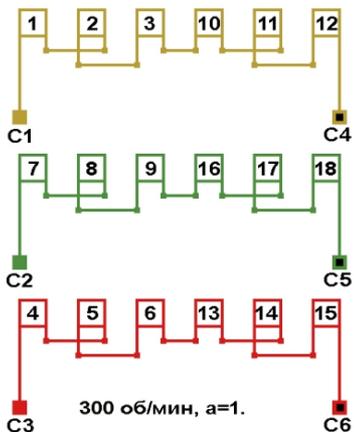


Рис.4. Схема соединения обмоток катушек соленоидов

При соединении обмоток «треугольником» сила тока в каждый момент времени распределяется на две активные фазы, т. е. две цепи из шести электромагнитов, соединяемые выходным согласующим сопротивление нагрузки устройством, выполненном на мощных полевых транзисторах. Таким образом, суммарное количество запитанных обмоток одновременно равно 12.

Рассмотрим фазы А и В. При трогании с места напряжение на обмотках (между точками С1 и С2) $U = 40$ В. Таким образом, номинальная сила тока I_n , энергия вращения $W = Q$, а также сила $F_{мб}$, действующая на колесо, распределяются на 12 обмоток электромагнитов.

Для одной катушки, соответственно, имеем

$$Q_1 = \frac{W}{12} = \frac{147}{12} = 12,85 \text{ Вт.}$$

Согласно справочнику ПУЭ [2], сила тока I , проходящая через проводники диаметром 0,8 мм, не должна превышать 10 А. В соответствии с законом Ома,

$$I = \frac{U_1}{R_1},$$

где R_1 — сопротивление одной обмотки, $U_1 = \frac{U}{12} = \frac{40}{12} = 3,33$ В — напряжение на одной обмотке.

Исходя из заданных условий, рассчитаем

$$R_1 = \frac{U}{I} = \frac{3,33}{10} = 0,33 \text{ Ом.}$$

Для расчета длины проводника на одной обмотке применим формулу:

$$R_1 = \frac{\rho \cdot M_1}{S},$$

где $\rho = 0,017$ (Ом·мм²)/м — удельное сопротивление меди, $S = \pi \cdot r^2 = 0,5$ мм² — площадь сечения проводника диаметром 0,8 мм, M_1 — длина проводника. Отсюда $M_1 = \frac{R_1 \cdot S}{\rho} = 0,33 \cdot 0,5 / 0,017 = 9,7$ м.

Таким образом, длина проводника для катушки округленно равна 10 метрам.

Согласно формуле расчета силы электромагнита $F_{эм}$ [3],

$$F_{эм} = -\frac{(I \cdot \omega)^2 \cdot (\mu_0 \cdot S)}{d^2},$$

где I — сила тока, А; ω — число витков катушки; $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6}$ Гн/м — магнитная проницаемость ферромагнетика сердечника [4], S — площадь сечения электромагнита, м²; d — зазор между магнитом и электромагнитом, м. Отсюда $\omega = \frac{1}{I \sqrt{\frac{F_{эм} \cdot d^2}{\mu_0 \cdot S}}}$,

$$S = 0,02 \cdot 0,01 = 0,0002 \text{ м}^2.$$

При максимальном удалении катушки от магнита параметр $d = 1,6$ мм (см. рис.5).

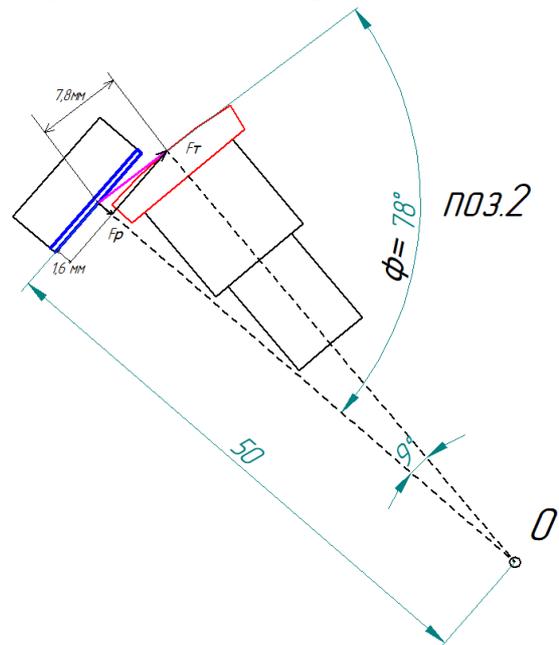


Рис.5. Схема расположения элементов при максимальном удалении электромагнита от магнита

Сила магнитной тяги F_{MT} состоит из суммы сил каждой из 12 катушек. Следовательно, сила, требующаяся от взаимодействия катушки и магнита:

$$F_{\text{MT1}} = \frac{F_{\text{MT}}}{12} = 61 \text{ Н.}$$

Сила сцепления магнита — 5 кг, что соответствует $F_{\text{MT}} = 5 \cdot 9,8 = 49 \text{ Н}$. В результате на долю электромагнита остается $F_{\text{ЭМ1}} = F_{\text{MT1}} - F_{\text{Маг}} = 61 - 49 = 12 \text{ Н}$,

отсюда $\omega = \frac{1}{10} \sqrt{\frac{12 \cdot (1,6 \cdot 10^{-3})^2}{0,00000126 \cdot 0,0002}} = 27$ витков.

Таким образом, аналитический расчет показывает, что для катушки электромагнита с заданными геометрическими параметрами при заданном напряжении на аккумуляторе минимальное достаточное количество витков проволоки равно 27, длина провода равна 10 метрам.

Выводы

Приведенный алгоритм расчета позволяет определить механические и электромагнитные усилия, необходимые для приведения мотор-колеса в движение, а также оценить количество расходного материала (медной проволоки) для изготовления катушки электромагнита.

Заключение

Применение описанных в данной статье методик расчета взаимодействия электромагнитов и магнитов позволяет создать различные конфигурации

электродвигателей и мотор-колес для решения широкого спектра задач.

Развитие данной технологии в России позволит выйти на конкурентоспособный уровень в сфере создания персонального электротранспорта, робототехнических средств и других устройств, использующих электродвигатели.

1. Лихачев В.Л. Справочник обмотчика асинхронных электродвигателей. М.: СОЛОН-Пресс, 2004. 240 с.
2. Правила устройства электроустановок. М.: Моргнига, 2018. 464 с.
3. Цопов Г.И., Сергеев В.А., Овсянников В.Н. Проектирование и расчет электромагнитного устройства низкого напряжения: учебно-методическое пособие. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013. 53 с.
4. Таблицы физических величин. Справочник / Под ред. И.К.Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.

References

1. Likhachev V.L. Spravochnik obmotchika asinkhronnykh elek-trodvigatelay [Handbook of the winder of asynchronous electric motors]. Moscow, SOLON-Press Publ., 2004. 240 p.
2. Pravila ustroystva elektroustanovok [Rules for the installation of electrical installations]. Moscow, Morkniga Publ., 2018. 464 p.
3. Tsopov G.I., Sergeev V.A., Ovsyannikov V.N. Proyektirovaniye i raschet elektromagnitnogo ustroystva nizkogo napryazheniya: uchebno-metodicheskoye posobiye [Design and calculation of a low voltage electromagnetic device: a teaching aid]. Samara, Samara Polytech Publ., 2013. 53 p.
4. Tablitsy fizicheskikh velichin. Spravochnik [Tables of physical quantities. Handbook]. Ed. I.K. Kikoin. Moscow, Atomizdat Publ., 1976. 1008 p.