

**Баранов Павел Рудольфович**

Pavel R. Baranov

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

National Research Tomsk Polytechnic University

Доцент кафедры «Электромеханические комплексы и материалы»

Associate Professor of department “Electromechanical systems and materials”

Кандидат технических наук

E-Mail: baranovp@tpu.ru

**Шараевский Андрей Андреевич**

Andrey A. Sharayevskiy

Магистрант гр. 5AM1Ж Национального исследовательского

Томского политехнического университета

Master student g. 5AM1Ž National Research Tomsk Polytechnic University

E-Mail: Aks40@mail.ru

Электрические машины и аппараты

## **Расчет электромагнитного привода дисковых тормозных устройств асинхронных двигателей с заданным быстродействием**

Calculation of the electromagnetic drive of induction motor disk brake mechanisms  
with the set operation speed

**Аннотация:** Для электромагнитного привода тормозного устройства получены соотношения, позволяющие рассчитывать параметры электромагнита с гарантированным быстродействием. Получены рекомендации для определения области исходных данных и независимых переменных при расчете электромагнитного привода.

**The Abstract:** The equations for the brake mechanism electromagnetic drive allowing to calculate electromagnet parameters with the guaranteed operation speed are received. Recommendations for definition of initial data and independent variables are obtained at calculation of the electromagnetic.

**Ключевые слова:** электромагнитный привод, быстродействие, время трогания, электромагнитный расчет, тормозное устройство асинхронных двигателей.

**Keywords:** electromagnetic drive, operation speed, start-off time, electromagnetic calculation, induction motor brake mechanism.

\*\*\*

Асинхронные двигатели со встроенными дисковыми тормозными устройствами, выполненные в виде единой конструкции (их еще называют «тормозные двигатели»), широко используются в подъемно-транспортном машиностроении, станкостроении и т.д. Основным достоинством таких двигателей является компактность и малый вес по сравнению с комплексами, содержащими отдельно двигатель и механический тормоз. В обозначении данной конструктивной модификации серийных двигателей, содержащих нормально замкнутый (закрытый) дисковый тормоз, содержится буква «Е» [1, 3, 6].

В связи с объединением в единую конструкцию двух противоположных по назначению технических объектов – «двигатель» и «тормоз», логично предположить, что чем продолжительнее наложение по времени рабочих циклов этих объектов, тем хуже технико-экономические показатели всего устройства. Например, в момент включения двигателя фрикционные поверхности тормоза какое-то время еще остаются замкнутыми, то затягиваются пусковые токи двигателя, фрикционные поверхности тормоза подвергаются повышенному износу. Это приводит к снижению допустимого числа пусков в единицу времени, более частому обслуживанию тормоза. С другой стороны, если между окончанием рабочего цикла одного объекта и началом рабочего цикла другого объекта пройдет достаточно большой промежуток времени, то это также влечет ухудшение технических показателей устройства. Например, запаздывание тормоза после отключения двигателя может привести к относительно длительному выбегу вала электропривода, т.е. недопустимой просадке груза в электротали, либо усугубление аварийной ситуации в обрабатываемом центре и т.д.

Поэтому идеальным тормозным двигателем, с точки зрения его эксплуатации, следует считать такой, в котором момент подачи напряжения на двигатель совпадает с началом размыкания фрикционной поверхности тормоза, а момент отключения – с моментом начала торможения. Приблизить реальный двигатель с тормозом к показателям идеального может только электромагнитный привод с гарантированным быстродействием.

Целью данной работы является разработка методики расчета электромагнитного привода, в которой параметры растормаживающего электромагнита увязаны с заданным быстродействием (временем трогания).

При выводе основных соотношений воспользуемся следующими известными допущениями [2, 3, 5]: противодействующее усилие якоря постоянно на протяжении всего рабочего хода; распределение индукции в воздушном зазоре равномерно; потоки рассеяния и выпучивания отсутствуют. Погрешность от введения таких допущений будет незначительна, так как растормаживающий электромагнит выполняется короткоходовым, величина воздушного рабочего зазора  $\delta$  обычно изменяется в диапазоне от 0,5 до 1,5 мм, а наружный диаметр магнитопровода превышает 100 мм.

При подключении постоянного напряжения к обмотке электромагнита, при условии ненасыщенной магнитной системы, уравнение электрической цепи будет выглядеть:

$$U = Ri + L \frac{di}{dt}, \quad (1)$$

где  $U$  – напряжение сети постоянного тока;

$R$  – активное сопротивление обмотки;

$L$  – индуктивность обмотки при номинальном рабочем зазоре  $\delta$ ;

$i$  – переходное значение тока.

Решим уравнение относительно тока при нулевых начальных условиях:

$$i(t) = \frac{U}{R} (1 - e^{-t/T}), \quad (2)$$

где  $T$  – постоянная времени электромагнита при номинальном рабочем зазоре  $\delta$ , которую можно определить по формуле:

$$T = L/R. \quad (3)$$

При заданном быстродействии, либо значении времени трогания ( $t_{тр}$ ) и минимальном напряжении сети величину тока трогания (при этом токе сила электромагнитного притяжения равна противодействующей силе возвратных пружин электромагнита) можно определить:

$$I_{mp} = \frac{k_c U}{R} (1 - e^{-t_{mp}/T}). \quad (4)$$

Тогда величина магнитодвижущей силы (МДС) определится по аналогии:

$$F_{mp} = \frac{k_c U w}{R} (1 - e^{-t_{mp}/T}), \quad (5)$$

где  $w$  – число витков обмотки электромагнита.

Известно, что сопротивление обмотки можно определить по формуле:

$$R = \rho_\theta l w / s_{np}, \quad (6)$$

где  $\rho_\theta$  – удельное сопротивление материала обмоточного провода при рабочей температуре  $\theta$ ;

$l$  – средняя длина витка обмотки;

$s_{np}$  – сечение обмоточного провода.

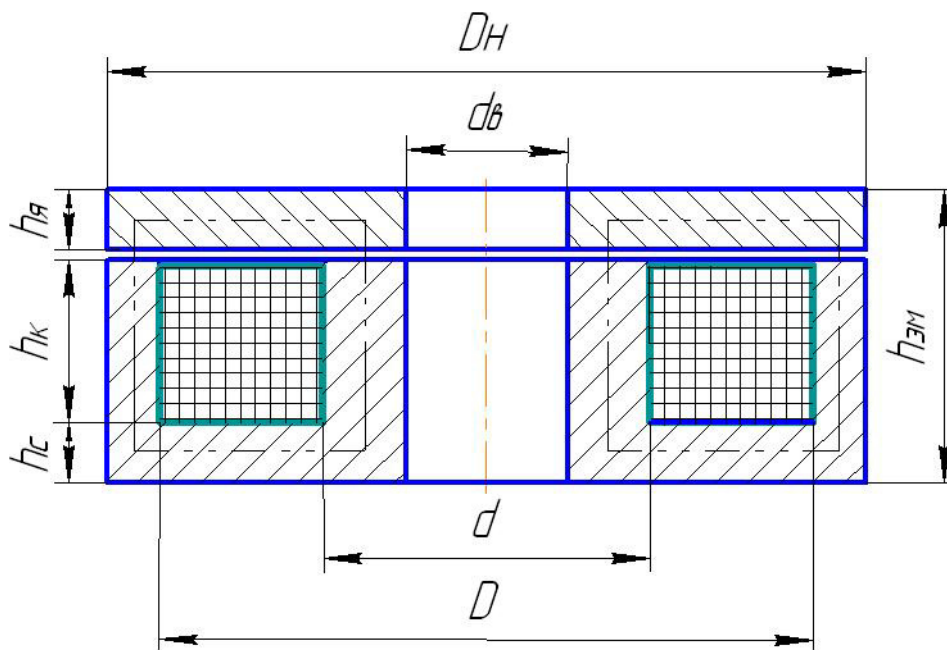
Тогда с учетом (5) и (6) можно получить:

$$F_{mp} = \frac{k_c U s_{np}}{\rho_\theta l} (1 - e^{-t_{mp}/T}). \quad (7)$$

В полученной формуле необходимо определить сечение проводника  $s_{np}$ , обеспечивающую заданное быстродействие при известном противодействующем усилии. Для этого необходимо получить выражения для значений  $l$ ,  $T$ ,  $F_{mp}$ .

Рассмотрим конструкцию растормаживающего электромагнита (рис. 1). Как и электродвигатель, он имеет цилиндрическую форму, бронированную конструкцию, два полюса. В радиальном направлении электромагнит ограничен лишь габаритами электродвигателя, а в осевом направлении размеры жестко ограничены условиями охлаждения. Для равномерного распределения тягового усилия и индукции в полюсах площади наружного и внутреннего полюса принимаются одинаковыми (обозначения геометрических размеров соответствуют аналогичным на рис. 1):

$$S_i = \frac{\pi}{4} (d^2 - d_a^2) = \frac{\pi}{4} (D_i^2 - D^2). \quad (8)$$



**Рис. 1.** Эскиз растормаживающего электромагнита в разрезе

Площадь одного полюса можно получить с помощью известной формулы максвелла [3,4]

$$S_{\Pi} = Q_{np} \mu_0 / B_{\delta}^2, \quad (9)$$

где  $Q_{np}$  – противодействующее усилие пружин электромагнита;

$\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума;

$B_{\delta}^2$  – магнитная индукция в воздушном зазоре.

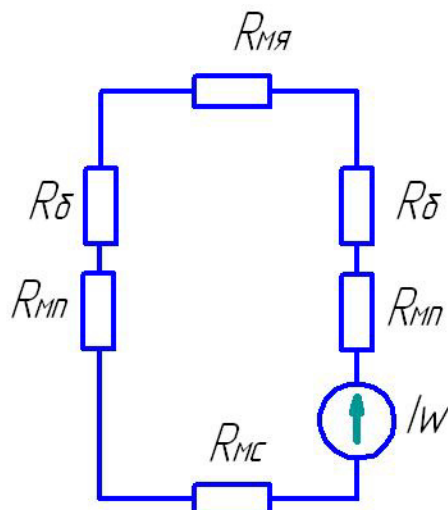
Габаритные размеры  $D_H$ ,  $d_b$ ,  $h_{ЭМ}$  определяются после конструкторской проработки базового асинхронного двигателя. Кроме того, определяется диапазон предпочтительных значений токов в номинальном режиме, которые определяют габариты и стоимость схемы управления и выпрямления. Тогда неизвестные размеры под катушку определяются по формуле:

$$d = \sqrt{d_a^2 + 4S_{\gamma} / \pi}; \quad D = \sqrt{D_i^2 - 4S_{\gamma} / \pi}. \quad (10)$$

При отсутствии потоков рассеяния, из известной формулы для потокосцепления с учетом выражений (3) и (6) можно получить соотношения для постоянной времени обмотки через электромагнитные параметры магнитной цепи:

$$T = \frac{B_{\delta} S_{\Pi} s_{np} w}{F_{mp} \rho_{\theta} l}. \quad (11)$$

В полученной формуле (11) присутствуют три неизвестные искомые величины: МДС трогания ( $F_{тр}$ ), параметры обмотки – сечение провода ( $s_{np}$ ), число витков обмотки ( $w$ ). Величину МДС при рабочем зазоре  $\delta$  можно определить с помощью расчета магнитной цепи при известном материале сердечника и якоря электромагнита, известных геометрических размерах и индукции в воздушном зазоре (рис. 1). Схема замещения магнитной цепи представлена на рис. 2.



**Рис. 2.** Схема замещения растормаживающего электромагнита при расчете магнитной цепи

Обозначение участков магнитной цепи на рис. 2 соответствуют аналогичным обозначениям участков на рис. 1.

Число витков обмотки можно определить по величине МДС удержания, необходимой для удержания якоря в притянутом положении якоря с остаточным зазором  $\delta_0$ . Схема замещения магнитной цепи аналогична, только величина воздушного зазора значительно уменьшилась. Считаем, что в номинальном режиме к обмотке приложено такое напряжение, достаточное для удержания якоря в притянутом положении. Тогда число витков равно:

$$w = F_y / I_y, \quad (12)$$

где  $I_y$  – ток в обмотке в номинальном режиме.

Получим выражение для постоянной времени электромагнита, используя выражения (11), (12), а также (8) соответственно:

$$T = \frac{B_\delta S_\Pi F_y s_{np}}{\rho_\theta l F_{mp} I_y}. \quad (13)$$

Решим, полученную ранее формулу (7) относительно времени трогания  $T$  и приравняем полученное выражение с выражением (11):

$$\frac{B_\delta S_\Pi F_y s_{np}}{\rho_\theta l F_{mp} I_y} = \frac{t_{mp}}{\ln\left(\frac{k_c U s_{np}}{k_c U s_{np} - F_{mp} \rho_\theta l}\right)}. \quad (14)$$

Уравнение (14) содержит одно неизвестное  $s_{np}$  и относится к разряду трансцендентных, которые, как известно [7], решений в общем виде не имеет. Предлагается два способа решения уравнения (14): графический метод, либо метод применения специальных программ для компьютера, определяющих неизвестное значение численным методом.

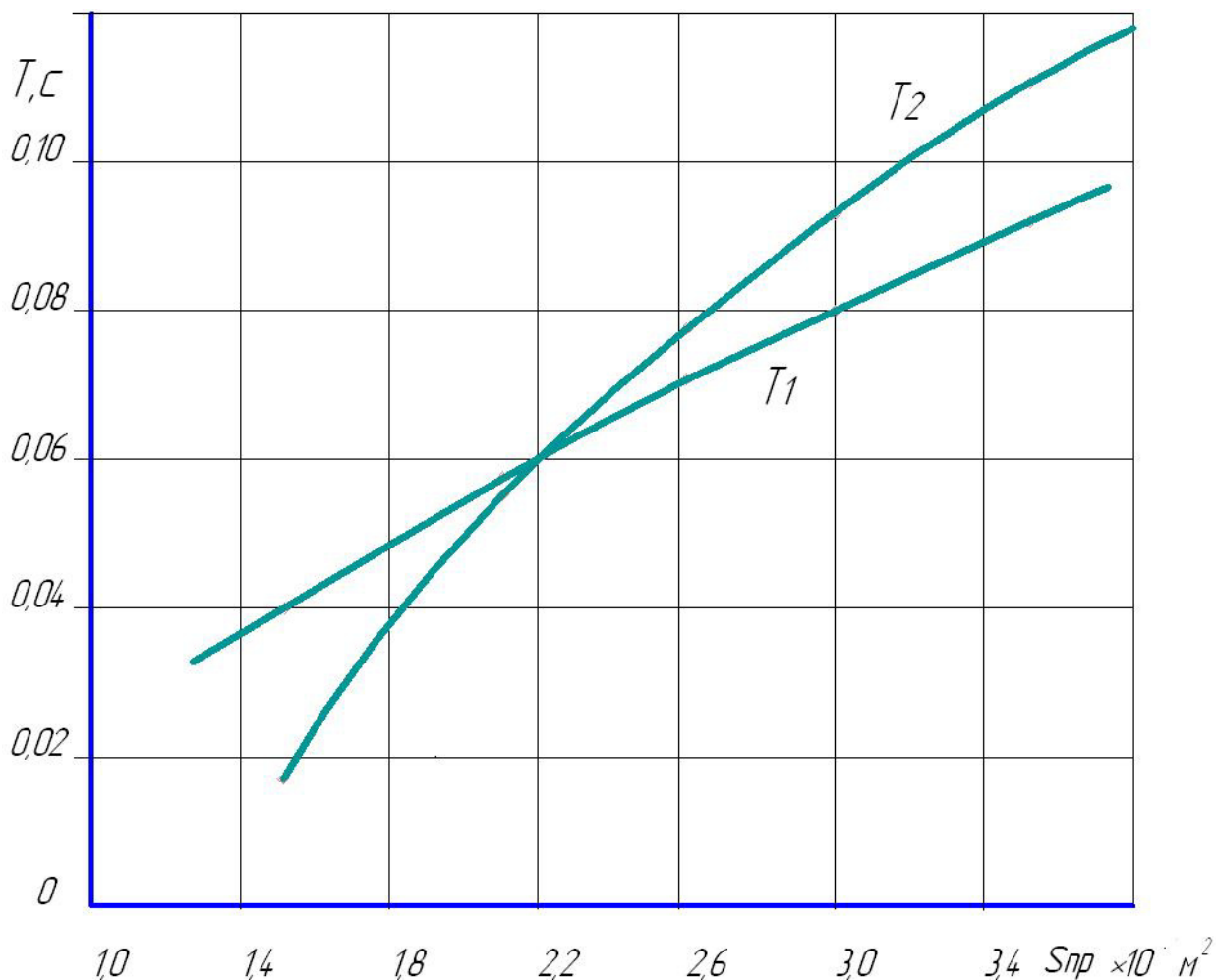
При решении уравнения (14) следует определить область исходных данных, при которых с помощью указанного уравнения можно получить вещественные значения сечения провода обмотки:

$$s_{np} > \frac{F_{mp} \rho_\theta l}{k_c U}.$$

После определения величин  $s_{np}$  и  $T$  округляем сечение провода до ближайшего табличного значения ( $s_{npm}$ ). Для уточнения числа витков получим соответствующую формулу с учетом (13) и (12):

$$w = \frac{T \rho_{\theta} l F_{mp}}{B_{\delta} S_{II} s_{npm}}$$

Полученное значение числа витков и сечения провода обмотки обеспечит требуемое быстродействие электромагнита ( $t_{тр}$ ). Рис. 3 иллюстрирует графическое решение, выполненного для расчета обмоточных параметров электромагнитного привода асинхронного двигателя мощностью 15 кВт.



**Рис. 3.** Графическое определение сечения обмоточного провода электромагнита

Для наглядности, на рис. 3 представлены две зависимости  $T_1 = f(s_{np})$  и  $T_2 = f(s_{np})$ , которые описывают левую и правую часть уравнения (14) соответственно. Пересечение этих кривых в точке с координатами:  $T = 0,06$  с (постоянная времени),  $s_{np} = 2,2 \text{ мм}^2$  (сечение провода), дает значение параметров электромагнита, обеспечивающие заданное быстродействие.

Более точное и оперативное решение таких уравнений обеспечивают программы MathCad, MatLab и другие прикладные программы.

После определения обмоточных параметров обмотки рассчитывается осевая высота катушки  $h_k$  (рис. 1). Для этого необходимо разместить витки в окне сердечника, учитывать

технологические размеры в радиальном и осевом направлении, который в электрических аппаратах имеет наименование «распушовка».

Рассчитанный вариант электромагнита необходимо проверить на нагрев. Методика такого расчета зависит от режима работы асинхронного двигателя с тормозным устройством.

### Выводы

1. Теоретическую основу предложенной методики расчета составляют выражения, полученные для расчета параметров растормаживающих электромагнитов и элементов схемы управления. Выражения получены с учетом специфики конструкции асинхронного двигателя со встроенным тормозом, заданного быстродействия электромагнитного привода.

2. Даны рекомендации и получены выражения для определения области исходных данных и независимых переменных при расчете электромагнитного привода, удовлетворяющих требованиям быстродействия и специфики конструкции.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Алиханян К.А. Проектирование асинхронных двигателей со встроенным электромагнитным тормозом // Электротехника. – 1984.- № 7. – С. 55-56.

2. Баранов П.Р., Гринберг В.С. Выбор схемы включения двухобмоточного электромагнита // Электричество. – 1986. - № 4. – С. 47-49.

3. Соленков В.В., Гринберг В.С., Гусельников Э.М. Расчет электромагнита с форсировкой для электродвигателей со встроенным тормозом // Электрооборудование автоматизированных установок. – Томск: Изд-во ТГУ, 1980. – С. 59-63.

4. Сливинская А.Г. Электромагниты и постоянные магниты. - М.: Энергия, 1972.- 247с.

5. Тер-Акопов А.К. Динамика быстродействующих электромагнитов. – М. –Л.: Энергия, 1965. – 168 с.

6. Унифицированная серия асинхронных двигателей Интерэлектро //Радин В.И., Лондин Й. , Розенкноп В.Д. и др.; Под ред. В.И. Радина. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 416 с.

7. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. – М.: Наука, 1986. – 544 с.

**Рецензент:** Курец Валерий Исаакович, доктор технических наук, профессор кафедры электрических сетей и электротехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.