

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ И УДЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПОЛЫМ НЕМАГНИТНЫМ ЯКОРЕМ

В регулируемых электроприводах широко используются малоинерционные электродвигатели постоянного тока с полым немагнитным якорем и возбуждением от постоянных магнитов [1, 2]. Такие достоинства этих двигателей, как высокое быстродействие, устойчивость к значительным перегрузкам, широкий диапазон регулирования скорости и высокий КПД способствовали их широкому применению в различных областях техники. Ранее, из-за достаточно сложной технологии и высокой стоимости, они применялись, в основном, в военной технике и высокотехнологических областях промышленности: вычисли-

тельной технике, робототехнике, радиолокационных и оптических устройствах.

В настоящее время, в связи с повышением требований к изделиям общепромышленной и бытовой техники, в них также стали применять электродвигатели постоянного тока с полым якорем.

Наряду с вышеперечисленными показателями является важным и обеспечение максимальной полезной мощности (или вращающего момента) в заданном объеме двигателя.

В связи с этим исследование возможностей повышения таких важнейших характеристик как быстродействие и удельная мощность

является актуальной задачей.

Один из важнейших параметров, определяющих быстродействие - величина углового ускорения, создаваемого двигателем с динамической нагрузкой на валу

$$\varepsilon = \frac{M_{дв}}{J_{дв} + J_{н}}, \quad (1)$$

где $M_{дв}$ - динамический момент двигателя;
 $J_{дв}$ - момент инерции двигателя;
 $J_{н}$ - момент инерции нагрузки.

Как показали ранее проведенные исследования, наиболее перспективной с точки зрения обеспечения максимального углового ускорения является конструкция с использованием полого немагнитного якоря, в котором необходимый объем активного слоя заполнен проводниками не полностью и имеет одинаковую толщину проводникового слоя в активной и лобовых частях [3].

Подобная конструкция дает дополнительные возможности для повышения быстродействия и удельной мощности. Эти возможности могут быть реализованы путем использования для создания дополнительного электромагнитного момента лобовых частей обмотки якоря.

Для этого необходимо, чтобы полюса магнитной системы располагались по продольной оси над всей поверхностью якоря.

Дальнейшие рассуждения иллюстрирует рис.1, на котором показана произвольно расположенная относительно полюсов секция обмотки якоря с лобовыми частями треугольной формы. Ширину секции принимаем равной полюсному делению τ .

Вращающее усилие $F_{лн}$, создаваемое лобовыми частями, зависит от положения секции относительно оси нейтрали. В зависимости от направления усилий в различных частях лобовой части разделим ее на 4 участка.

Вращающий момент создается тангенциальной составляющей усилия F_l , действующего на лобовую часть секции ($F_{лн}$).

Для упрощения рассмотрим половину секции, состоящую из двух половин активной части и двух лобовых частей. На участках I и IV усилия $F_{1а}$ и $F_{2а}$ одинаковы и действуют в одном направлении, на участках II и III усилия $F_{2а}$ и $F_{1а}$ направлены навстречу друг другу и взаимно компенсируются, поэтому рассмотрим лишь участок I.

Длина лобовой части на участке I при положении продольной оси секции на

расстоянии x относительно нейтрали:

$$l_{лн} = (\pi D_a / 4p - x) / \cos \alpha, \quad (2)$$

где p - количество пар полюсов;
 D_a - диаметр якоря.

Вращающее усилие $F_{лн}$, создаваемое лобовой частью секции на участке I

$$F_{лн} = F_l \sin \alpha \quad (3)$$

Отношение вращающего усилия, создаваемого лобовыми частями, к вращающему усилию активной части секции:

$$\frac{F_{лн}}{F_a} = \frac{2 \left(\pi \frac{D_a}{4p} - x \right) \cdot \sin \alpha}{\lambda \cdot D_a \cdot \cos \alpha}, \quad (4)$$

где $\lambda = \frac{l_a}{D_a}$;

l_a - длина активной части.

Относительное увеличение вращающего усилия, вызванное дополнительным вращающим усилием лобовой части, выразим коэффициентом $K_{лн}$ (для определенного положения секции):

$$K_{лн} = 1 + F_{лн} / F_a = 1 + 2 \operatorname{tg} \alpha (\pi / 4p - x / D_a) / \lambda. \quad (5)$$

При изменении положения секции под полюсом по координате X от 0 до $0,5\tau$ $F_{лн}$ будет меняться по линейному закону от 0 до максимума.

Среднее значение коэффициента увеличения вращающего усилия:

$$K_{лн \text{ ср.}} = 0,5 (K_{лн \text{ min}} - K_{лн \text{ max}}) = 1 + \pi \operatorname{tg} \alpha / 4p \lambda \quad (6)$$

Так, например, для четырехполюсного двигателя с отношением $\lambda = 2$ и углом изгиба лобовой части $\alpha = 45^\circ$, коэффициент увеличения вращающего усилия равен 1,2.

Однако положительный эффект использования такой конструкции двигателя не ограничивается лишь увеличением вращающего момента.

В лобовых частях обмотки якоря улучшаются условия теплопередачи от якоря к корпусу через полюса. За счет этого снижается при том же токе средняя температура обмотки якоря, уменьшается сопротивление обмотки и тепловые потери.

Таким образом, при тех же габаритах двигателя может быть уменьшена потребляемая мощность, либо увеличена полезная мощность при прежней потребляемой мощности.

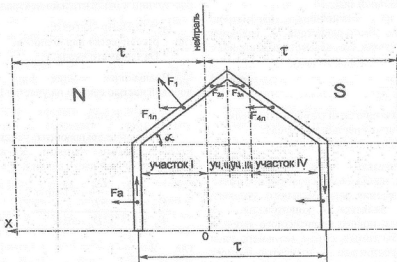


Рис.1

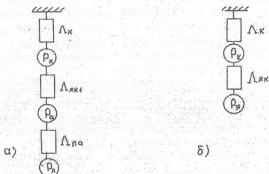


Рис.2. Поверхности теплоотдачи для конструкций

Для определения примерного количественного эффекта от улучшения условий теплопередачи проведены сравнительные тепловые расчеты двигателей с полным якорем традиционной конструкции и предлагаемой конструкции, рассматриваемой в данной статье.

На рис.2 приведены эквивалентные тепловые схемы двигателей с полным якорем традиционной (а) и предлагаемой (б) конструкций.

Системы уравнений, описывающих тепловые процессы в двигателе по тепловым схемам:

на рис. 2а

$$\begin{cases} P_{л} = \Lambda_{ла} (\Theta_{л} - \Theta_{а}), \\ P_{я} = P_{а} + P_{л} = \Lambda_{як1} (\Theta_{а} - \Theta_{к}), \\ P_{я} + P_{к} = \Lambda_{к} \Theta_{к}, \end{cases} \quad (7)$$

на рис. 2б

$$\begin{cases} P_{я} = \Lambda_{як} (\Theta_{я} - \Theta_{к}), \\ P_{я} + P_{к} = \Lambda_{к} \Theta_{к}, \end{cases} \quad (8)$$

где $\Theta_{к}, \Theta_{я}, \Theta_{а}, \Theta_{л}$ - превышения температуры корпуса, обмотки якоря в целом, обмотки якоря в активной части, обмотки якоря в лобовых частях соответственно; $P_{к}, P_{я}, P_{н}, P_{л}$ - тепловые потери в корпусе, в обмотке якоря в целом, в активной части обмотки якоря, в лобовых частях соответственно; $\Lambda_{к}, \Lambda_{як}, \Lambda_{а}, \Lambda_{л}$ - тепловые проводимости от корпуса в окружающую среду, от обмотки якоря к корпусу, от активной части обмотки якоря к корпусу, от лобовых частей к активной части обмотки якоря соответственно.

Системы уравнений приведены для варианта закрытого двигателя с естественным охлаждением [4].

В предлагаемой конструкции якоря благодаря одинаковым условиям теплоотдачи к корпусу распределение температуры по длине равномерное, в традиционной конструкции вследствие ухудшенных условий теплоотдачи от лобовых частей имеется перепад температур по длине якоря.

Поверхности теплоотдачи для рассматриваемых конструкций:

на рис. 2а

$$S_{\text{я1}} = \pi D_{\text{я}} l_{\text{я}}, \quad (9)$$

на рис.2б

$$S_{\text{я2}} = \pi D_{\text{я}} (2l_{\text{я}} \sin \alpha + l_{\text{я}}), \quad (10)$$

где $l_{\text{я}}$ - длина лобовой части секции.

Увеличение поверхности теплоотдачи приводит к соответствующему увеличению тепловой проводимости от якоря к корпусу.

Среднее превышение температуры обмотки якоря традиционной конструкции

$$\Theta_{\text{я}} = \frac{\Theta_{\text{я}} l_{\text{я}} + 2\Theta_{\text{я}} l_{\text{я}}}{l_{\text{я}} + 2l_{\text{я}}}, \quad (11)$$

Из систем уравнений (7) и (8), описывающих тепловые процессы в двигателе, и с учетом (11) получаем выражения для определения превышения температуры якоря двух рассматриваемых конструкций:

(по рис.2а)

$$\Theta_{\text{я}} = \frac{\left(\frac{P_{\text{я}}}{\Lambda_{\text{як1}}} + \frac{P_{\text{я}} + P_{\text{к}}}{\Lambda_{\text{р}}} \right) \cdot l_{\text{я}}}{I_{\text{я}} + 2I_{\text{я}}} + \frac{2 \cdot \left(\frac{P_{\text{я}}}{\Lambda_{\text{як2}}} + \frac{P_{\text{я}}}{\Lambda_{\text{як1}}} + \frac{P_{\text{я}} + P_{\text{к}}}{\Lambda_{\text{к}}} \right)}{I_{\text{я}} + 2I_{\text{я}}}, \quad (12)$$

(по рис.2б)

$$\Theta_{\text{я}} = \frac{P_{\text{я}}}{\Lambda_{\text{як}}} + \frac{P_{\text{я}} + P_{\text{к}}}{\Lambda_{\text{к}}}. \quad (13)$$

Тепловыделение в двигателях с полым немагнитным якорем определяется электрическими потерями в обмотке якоря и потерями холостого хода (в основном это потери на трение в подшипниках и щеток о коллектор). Последние составляют примерно около 10% суммарных потерь.

Выражения (12) и (13) могут быть представлены в виде, более удобном для сравнения, для случая, когда $l_{\text{я}} = 2l_{\text{я}}$ и $P_{\text{к}} = 0,5P_{\text{я}}$:

$$\Theta_{\text{я}} = P_{\text{я}} (1/\Lambda_{\text{як1}} + 1,1/\Lambda_{\text{к}} + 0,25/\Lambda_{\text{як}}) \quad (14)$$

$$\Theta_{\text{я}} = P_{\text{я}} (1/\Lambda_{\text{як}} + 1,1/\Lambda_{\text{к}}) \quad (15)$$

Из выражений (14), (15) следует, что в предлагаемой конструкции превышение температуры обмотки якоря будет меньше, чем в традиционной за счет увеличения тепловой проводимости от обмотки якоря к корпусу, отсутствия перепада температур между активной и лобовыми частями обмотки якоря.

Поскольку допустимое превышение температуры обмотки якоря определяется классом нагревостойкости изоляции проводников, то номинальный ток (а значит и вращающий момент) могут быть соответственно увеличены, что в свою очередь означает повышение быстродействия (углового ускорения двигателя с нагрузкой) и удельного вращающего момента (на единицу объема двигателя).

Из выражений (14) и (15) относительное уменьшение превышения температуры обмотки якоря ($\Theta_{\text{я отн}}$) в предлагаемой конструкции по сравнению с традиционной равно:

$$\Theta_{\text{я отн}} = \frac{\left(\frac{1}{\Lambda_{\text{як}}} + \frac{1,1}{\Lambda_{\text{к}}} \right)}{\left(\frac{1}{\Lambda_{\text{як1}}} + \frac{1,1}{\Lambda_{\text{к}}} + \frac{0,25}{\Lambda_{\text{як}}} \right)} \quad (16)$$

Для двигателя со следующими размерами: диаметр якоря 25 мм, активная длина якоря 50 мм, длина лобовой части 12,5 мм, диаметр корпуса 50 мм, длина корпуса 120 мм - $\Theta_{\text{я отн}} = 0,8$, т.е. превышение температуры уменьшается на 20%.

Превышение температуры обмотки полого якоря в основном определяется электрическими потерями, поэтому для заданного класса нагревостойкости допустимого превышения температуры номинальный ток двигателя (и, соответственно, номинальный вращающий момент) могут быть увеличены

пропорционально $\sqrt{\left(\frac{1}{\Theta_{\text{я отн}}} \right)}$, т.е. для данного

примера на 12%, а с учетом дополнительного момента, создаваемого лобовыми частями, более чем на 30%.

Выводы

1. Быстродействие и удельная мощность электродвигателя постоянного тока с полым немагнитным якорем могут быть повышены за счет использования для создания вращающего момента лобовых частей обмотки якоря, имеющих толщину

обмоточного слоя, одинаковую с активной частью якоря, а также за счет улучшения условий теплопередачи от якоря корпусу.

2. Количественные показатели относительного увеличения быстродействия и удельной мощности должны определяться для конкретного двигателя и зависят от выбранных геометрических размеров якоря и формы лобовых частей обмотки якоря.

Литература

1. Г.В.Лазарев, В.Г.Лановой, Я.В.Рыбка и др. Исполнительные электродвигатели стабилизированных платформ подвижных объектов. "Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт". Сборник научных трудов. Тематический выпуск:

Проблемы усовершенствования электрических машин и аппаратов. Теория и практика. Харьков: НТУ "ХПИ", 2002, №14.-С.28-42.

2. Т.Кенио, С.Нагамори. Двигатели постоянного тока с постоянными магнитами, Энергоатомиздат, 1989. 184с., ил.
3. В.Н.Клименко. Оптимальное проектирование двигателей для периферийного оборудования ЭВМ. "Регулируемые асинхронные двигатели". Киев: Наукова думка, 1988. С.122-128.
4. Г.А.Сипайлов и др. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах с естественным охлаждением. М.: Высшая школа, 1989.-239с.