

*А.А. АВРАМЕНКО*, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ", Харьков  
*А.А. ТИЩЕНКО*, аспирант, НТУ "ХПИ", Харьков  
*А.М. МАСЛЕННИКОВ*, аспирант, НТУ "ХПИ", Харьков

## **ВЫБОР МАТЕРИАЛА МАГНИТОПРОВОДА ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН С КАТЯЩИМСЯ РОТОРОМ**

Приведено результати дослідження матеріалів, які виготовлені із сталі та які заздалегідь пройшли хіміко-термічну обробку. За допомогою методу амперметра-вольтметра отримані дані для побудови залежності  $B = f_1(H)$  та  $\mu_r = f_2(H)$ . Визначені властивості матеріалу, при яких двигун з ротором, що котиться, розвиває максимальний момент.

Приведены результаты исследования материалов, изготовленных из стали, предварительно прошедших химико-термическую обработку. С помощью метода амперметра-вольтметра получены данные для построения зависимости  $B = f_1(H)$  и  $\mu_r = f_2(H)$ . Определены свойства материала, при которых двигатель с катящимся ротором развивает максимальный момент.

**Введение.** В электромашиностроении, а в частности при проектировании электродвигателей, важное место занимает удельная мощность. Поэтому имеют место различные инженерные решения, которые позволяют увеличить мощность двигателя в том же габарите.

Для двигателя с катящимся ротором важным параметром является развиваемый момент на валу двигателя, значение которого можно определить по формуле [1]:

$$M = \frac{B_{\delta}^2 S}{4\mu_0} D_p \sin \theta, \quad (1)$$

где  $S$  – площадь поверхности, которая создает силу притяжения, м;  $B_{\delta}$  – значение индукции в воздушном зазоре, Тл;  $\theta$  – угол между силой одностороннего притяжения и точкой обкатывания;  $D_p$  – диаметр ротора, м;  $\mu_0$  – магнитная постоянная,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м.

Из выражения (1) видно, что на крутящий момент двигателя основное влияние оказывает диаметр ротора, площадь поверхности, которая создает силу притяжения и индукция в воздушном зазоре. Если же говорить об увеличении мощности двигателя в том же габарите, то диаметр ротора является неизменным, а значит необходимо повышать значение магнитной индукции в воздушном

зазоре. Для этого существует два способа:

- увеличение тока в статорной обмотке до предельных значений ограниченных температурой разогрева изоляционных материалов;
- применение материалов, из которых изготавливается магнитопровод с повышенными значениями электромагнитных параметров ( $H_c$ ,  $B_r$ ,  $\mu_0$  и т.д.)

Выбор материала магнитопровода является непростой задачей, т.к. помимо магнитных свойств необходимо иметь заданные значения механических параметров. Это условие определяется тем, что статор находится в непосредственном механическом взаимодействии с ротором. Так же необходимо учитывать и характер магнитного поля, так, например, в машинах постоянного тока станина является частью магнитопровода и изготавливают ее из стали марки Ст.3, но при этом в асинхронном двигателе статор и ротор изготавливают шихтованным из дискретно вращающимся магнитным полем питание катушек статора осуществляется однополярными импульсами низкой частоты до 6 Гц и это позволяет сделать его конструкцию не шихтованной.

**Цель работы** – проведение экспериментальных исследований для определения материала, который по своим магнитным и механическим свойствам превысит свойства стали марки Ст.3, применяемой в конструкции электродвигателей с катящимся ротором.

**Описание эксперимента.** Для поиска подходящей марки стали был поставлен ряд экспериментов с целью определения их электромагнитных характеристик. В экспериментах использовали метод амперметра-вольтметра, принципиальная электрическая схема которого представлена на рис. 1.

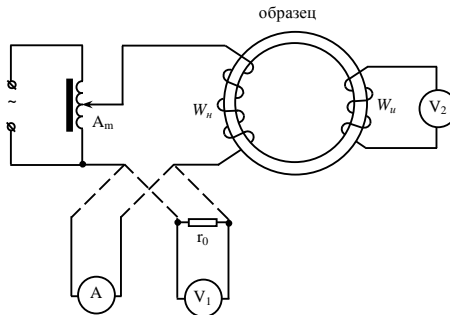


Рис. 1.

Для измерений на образец должны быть навиты две обмотки: первичная – намагничивающая  $W_n$  и вторичная – измерительная  $W_u$ . Для регулировки намагничивающего тока целесообразно применять автотрансформатор, который можно использовать до частот – 1000 Гц.

Напряженность магнитного поля рассчитывается по току, измеренному амперметром (А на рис. 1), или по напряжению, измеренному на образцовом сопротивлении  $r_0$  вольтметром ( $V_1$  на рис. 1).

Форма и все геометрические параметры исследуемого кольцевого образца приведены на рис. 2.

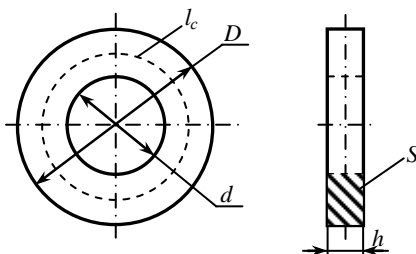


Рис.2.

Расчет витков измерительной обмотки (при измерении Э.Д.С. вольтметром средних значений) проводится по формуле [3]:

$$W_u = \frac{U_{\text{cp}}}{4,44 f S B_m}, \quad (2)$$

где  $f$  – частота напряжения питания, Гц;  $S$  – сечение образца,  $\text{м}^2$ ,  $S = \frac{D-d}{h}$ ,  $D$  – внешний диаметр образца, м;  $d$  – внутренний диаметр образца, м;  $h$  – высота образца, м;  $B_m$  – значение индукции, которое необходимо измерить, Тл;  $U_{\text{cp}}$  – напряжение, измеряемое прибором, В.

Для расчета числа витков намагничивающей обмотки можно использовать формулу [3]:

$$W_n = \frac{H_m l_{\text{cp}}}{I \sqrt{2}} \quad (3)$$

где  $H_m$  – максимальное значение эквивалентной синусоиды напряженности магнитного поля, А/м;  $I$  – действующее значение намагничивающего тока, А;  $l_{\text{cp}}$  – средняя длина магнитной линии (в

замкнутой магнитной цепи), м,  $l_{cp} = \frac{\pi(D-d)}{\ln(D/d)}$ .

Процесс измерений методом амперметра-вольтметра заключается в следующем. В намагничивающей цепи устанавливают последовательные значения тока, пропорциональные напряженности намагничивающего поля, и с помощью вольтметра  $V_2$  определяют соответствующие им Э.Д.С. во вторичной цепи. По формулам (2) и (3) рассчитывают значения  $B_m$  и  $H_m$  и строят зависимость  $B = f_1(H)$ .

Значение относительной магнитной проницаемости  $\mu_r$  получают из формулы [3]:

$$\mu_r = \frac{B_m}{\mu_0 H_m}. \quad (4)$$

По ряду значений относительной магнитной проницаемости можно построить график зависимости  $\mu_r = f_2(H)$ .

Для проведения экспериментальных исследований были подготовлены образцы, выполненные из стали марок Ст.45, Ст.40X и Ст.20 и представляющие собой кольца, вырезанные из заготовок шестигранного прутка, внешний диаметр  $D$  которых равен 14 мм, внутренний диаметр  $d = 7$  мм, высота  $h = 10$  мм. Образцы были разбиты на три группы:

- 1) сырая сталь (без обработки);
- 2) закаленная сталь;
- 3) закаленная сталь с последующим отпуском.

Закалке подвергались образцы Ст.45 и Ст.40X, а Ст.20 перед закалкой была подвержена цементации в течении 10 часов. Образцы подвергались закалке в воде при предварительном нагреве до 850-870°C с выдержкой 30 минут. Отпуск для всех образцов группы производился при температуре 200°C в течении одного часа.

Обмотки были выполнены из провода ПЭВ-2,  $\varnothing = 0,38$  мм (намагничивающая) и ПЭВ-2,  $\varnothing = 0,15$  мм (измерительная). Количество витков намагничивающей обмотки  $W_n = 100$  витков; измерительной –  $W_n = 20$  витков.

Эксперименты проводились при частоте намагничивающего тока  $f = 50$  Гц.

В результате эксперимента получены графики зависимости  $B = f_1(H)$  (рис. 3 а, в, д) и  $\mu_r = f_2(H)$  (рис.3 б, г, е) для образцов, выполненных из вышеприведенных марок стали:

- Ст.45 (рис. 3, а, б);
- Ст.40X (рис.3, в, г);

– Ст.20 (рис. 3, д, е).

На графиках рис. 3 обозначены: 1 – сырой образец; 2 – закаленный образец для Ст. 45 и Ст. 40X, а для Ст. 20 – образец, прошедший режим цементации; 3 – закаленный образец с последующим отпуском.

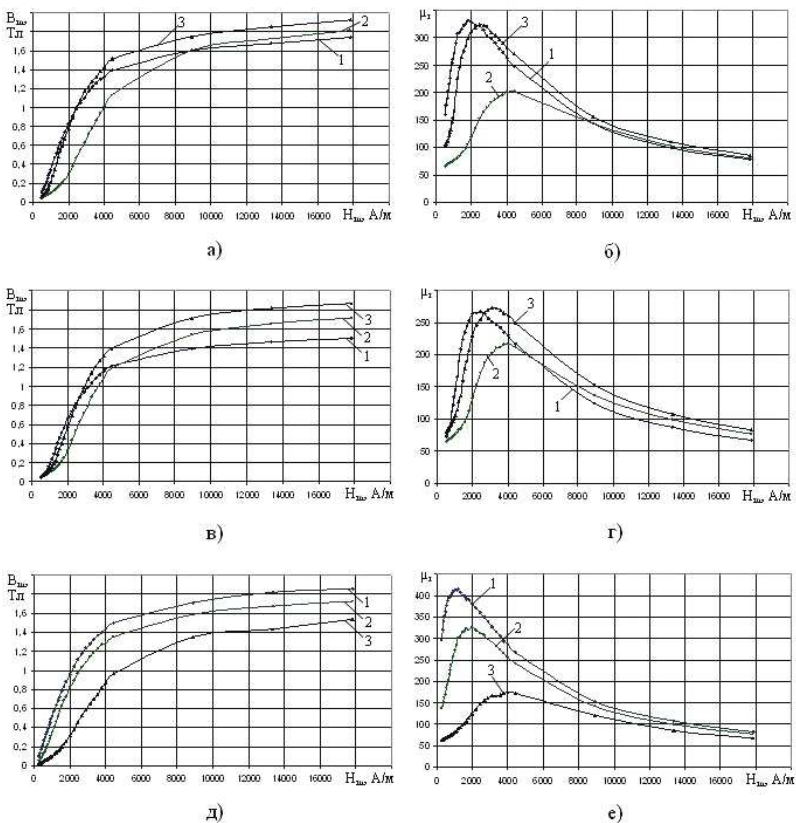


Рис. 3.

На основе экспериментальных данных рассчитанный крутящий момент на валу двигателя увеличился на 2 % и 8 % соответственно для марки стали Ст. 40X и Ст. 45 после закалки и отпуска. Полученные данные свидетельствуют о том, что есть необходимость дальнейшего изучения свойств указанных марок стали и корректировки расчета

вращающего момента на валу двигателя с учетом их не только магнитных свойств, а и механических.

Результаты расчета экспериментальных данных для крутящего момента двигателя при использовании разных марок сталей: Ст. 45, Ст. 40Х и Ст.20 для магнитопровода при  $H_m = 17839$  А/м приведены в таблице 1.

Таблица 1

Марка стали	Тип обработки	$B_m$ , Тл	Момент, о.е.
Ст. 20	Без обработки	1,857	1
	Цементация	1,729	0,87
	Закалка и отпуск	1,53	0,68
Ст. 40Х	Без обработки	1,5	0,65
	Закалка	1,714	0,85
	Закалка и отпуск	1,871	1,02
Ст. 45	Без обработки	1,743	0,88
	Закалка	1,814	0,95
	Закалка и отпуск	1,929	1,08
Ст. 3 (базовая)	Без обработки	1,857	1

**Вывод.** Режим закалки придает деталям повышенную микротвердость, а отпуск снижает внутренние напряжения в детали. После такой обработки повышается износостойкость, а значит, увеличивается ресурс работы двигателя. Влияние внутренних напряжений на магнитные свойства сталей можно увидеть при сравнении экспериментальных данных, которые свидетельствуют об улучшении магнитных свойств закаленных деталей после отпуска.

**Список литературы:** 1. Борзяк Ю.Г. и др. – Электродвигатели с катящимся ротором / Ю.Г. Борзяк, М.А. Зайков, В.П. Наний. – К.: Техника, 1982. – 120 с. 2. Юхимчук В.Д. Технология производства электрических машин: Уч. пос. / В 2-х кн.: Кн. 1. – Харьков.: Тимченко, 2006. – 560 с. 3. Кифер И.И. Испытания ферромагнитных материалов. – М.: Энергия, 1982. – 360 с.

*Поступила в редколлегию 20.09.2010*