

УДК 621.313.323

## МЕТОДИКА ПОВЕРОЧНОГО РАСЧЁТА СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН С ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ РЕДУКЦИЕЙ

А.Б. Захаренко, С.А. Мартынова  
(ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»)

Для новых технических решений в области синхронных электрических машин с электромагнитной редукцией предложена математическая модель распределения магнитного потока, созданная на основе теории цепей, и методика поверочного расчёта. Предложенная методика учитывает конструктивные особенности синхронных магнитоэлектрических и реактивных машин.

**Ключевые слова:** методика, поверочный расчёт, электромагнитная редукция.

**Введение.** Электродвигатель с электромагнитной редукцией имеет по сравнению с высокооборотным электродвигателем и механическим редукторным весьма существенные преимущества. К ним относятся высокая точность позиционирования из-за отсутствия неизбежных в редукторе люфтов, упругих деформаций и трений, более высокая резонансная механическая частота, значительный пусковой момент в совокупности с приемлемыми энергетическими показателями. Эти особенности делают такую электрическую машину перспективной для применения в приводах космического назначения.

**Особенности конструкции.** Вышеперечисленные характеристики обеспечивает, как правило, многополюсная ( $2p \geq 8$ ) синхронная машина со сосредоточенной обмоткой якоря с возбуждением от постоянных магнитов (см. рис. 1) или реактивная. Особенностью такой машины является то, что основной рабочей гармоникой МДС является не первая, а одна из высших, например, четвёртая или пятая. Для этого должны выполняться основные соотношения между числом зубцов статора и полюсов ротора, которые приведены в [1]. Эти соотношения справедливы для синхронной магнитоэлектрической и реактивной машин.

Предложенная конструкция магнитоэлектрической машины выглядит следующим образом (рис. 1). Сердечник 1 статора (якоря) прикреплен к корпусу. Он выполнен из магнитомягкого материала и шихтован из электротехнической стали; корпус статора выполнен из немагнитного материала. На зубцах 2 статора размещена трёхфазная сосредоточенная (катушечная) обмотка 4. На рис. 1 показана трёхфазная обмотка ( $m=3$ ), буквами А, В, С

обозначены начала соответствующих фаз. Катушки обмотки 4 статора наматываются из обмоточного провода, например, медного эмаль-провода. Они последовательно соединяются в катушечные группы (на рис. 1 в катушечной группе каждой фазы по 3 катушки). Для увеличения надёжности катушечная группа, либо фаза в целом, может наматываться непрерывным проводом. Трёхфазная обмотка 4 статора соединена в звезду.

На немагнитном основании ротора (индуктора) закрепляются постоянные магниты 3. Ротор

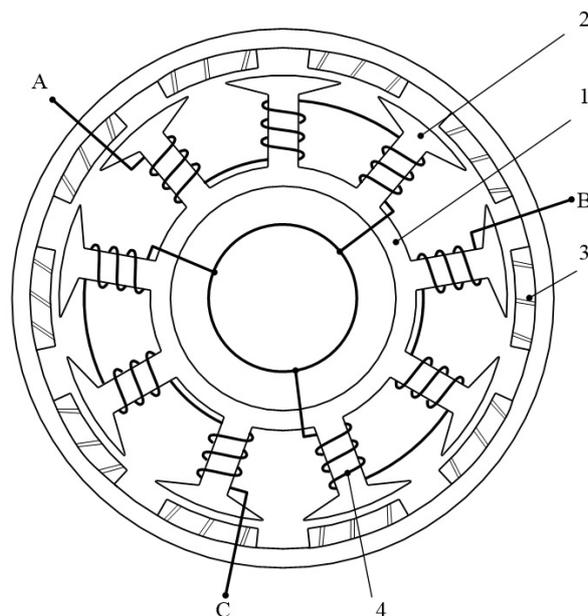


Рис. 1. Конструкция активной части трёхфазной многополюсной магнитоэлектрической машины со сосредоточенной обмоткой

(основание с закреплёнными на нём постоянными магнитами 3) жёстко закреплён на валу и вращается относительно корпуса статора благодаря подшипнику. Подшипник может быть выполнен в виде подшипника качения, например, шарикового.

Следует отметить, что для трёхфазной обмотки в [1] предложено, например, такое соотношение для числа зубцов статора  $Z=9k$ ,  $2p=8k$ , либо  $2p=10k$ , где  $k$  – целое положительное число. Поэтому описанная конструкция может быть «масштабирована» по числу зубцов и полюсов в  $k$  раз.

Как правило, на ранних стадиях оптимизации при рассмотрении значительного количества вариантов создание конечно-элементной модели для каждого из них приводит к серьёзным затратам времени, поэтому создание инженерной методики поверочного расчёта, основанной на теории цепей [2, 3], является наиболее перспективным.

#### Математическая модель и методика расчёта.

Воспользуемся математической моделью, основанной на схеме замещения магнитной цепи, построенной с учётом наиболее вероятных путей распространения магнитных потоков в магнитной системе (рис. 2). Следует отметить, что цепное представление интегральных величин, описывающих магнитное поле, является одним из традиционных подходов к расчёту, практическому проектированию и конструированию электрических машин.

Магнитная система электрической машины включает в себя воздушный зазор, зубцовую зону и ярма, постоянные магниты. Эту магнитную систему с протекающими в ней электромагнитными процессами заменяем расчётным эквивалентом – магнитной схемой замещения. Ветви схемы замещения содержат линейные и нелинейные магнитные сопротивления (или проводимости) и источники МДС.

Для практических поверочных расчётов цепная модель магнитной системы магнитоэлектрической машины может быть упрощена. Следует отметить, что при сосредоточенной обмотке статора индуктивная связь отдельных катушек обмотки достаточно низкая. Поэтому расчёт магнитной цепи оптимально проводить по упрощённой схеме замещения (рис. 3), соответствующей двум полюсам и двум зубцам магнитоэлектрической машины (см. рис. 1). На схеме введены следующие обозначения:  $F_{ma}$  – МДС постоянных магнитов;  $F_{za}$  – МДС обмотки статора;  $R_{\delta a}$  – магнитное сопротивление воздушного зазора;  $R_z$  – магнитное сопро-

тивление зубца статора;  $R_{ma}$  – магнитное сопротивление постоянного магнита;  $R_{sma}$  – магнитное сопротивление рассеяния индуктора;  $R_{ся}$  – магнитное сопротивление рассеяния зубца якоря;  $R_a$  и  $R_{aa}$  – магнитные сопротивления внутреннего и наружного ярем;  $\Phi_r$  и  $\Phi_{ra}$  – магнитные потоки внутреннего и наружного ярем;  $\Phi_{pez}$  – магнитный поток в воздушном зазоре.

Решение системы уравнений Кирхгоффа, записанной в соответствии со схемой замещения, относительно магнитного потока в воздушном зазоре  $\Phi_{pez}$  имеет вид:

$$\Phi_{pez} = \frac{\frac{2F_{ma} R_{sma}}{R_{sma} + 2R_{ma} + R_{aa}} - \frac{2F_{za} R_{ся}}{R_{ся} + 2R_z + R_a}}{R_{ся} + 2R_{\delta a} + R_{sma} - \frac{R_{ся}^2}{R_a + 2R_z + R_{ся}} - \frac{R_{sma}^2}{R_{sma} + 2R_{ma} + R_{aa}}}$$

Магнитная цепь (см. рис. 2) нелинейна, поэтому амплитудное значение магнитного потока в воздушном зазоре  $\Phi_{pez}$  вычисляется итерационным путём, как в методиках, описанных в [2, 3].

Следует отметить, что при отсутствии постоянных магнитов ( $F_{ma} = 0$ ,  $R_{ma}$  – нелинейно), получаем частный случай формулы для определения значения магнитного потока в воздушном зазоре  $\Phi_{pez}$  для синхронного реактивного электродвигателя, рассмотренного в [1].

$$\Phi_{pez} = \frac{-\frac{2F_{za} R_{ся}}{R_{ся} + 2R_z + R_a}}{R_{ся} + 2R_{\delta a} + R_{sma} - \frac{R_{ся}^2}{R_a + 2R_z + R_{ся}} - \frac{R_{sma}^2}{R_{sma} + 2R_{ma} + R_{aa}}}$$

По найденному потоку  $\Phi_{pez}$  вычисляется максимальное значение индукции в воздушном зазоре

$$B_{\delta} = \frac{\Phi_{pez}}{a_{\delta} \tau l_{\delta}},$$

где  $a_{\delta}$  – расчётный коэффициент полюсного перекрытия, равный отношению ширины постоянного магнита  $b_{\delta}$  к полюсному делению  $\tau$ ;  $l_{\delta}$  – расчётная длина магнитопровода в осевом направлении.

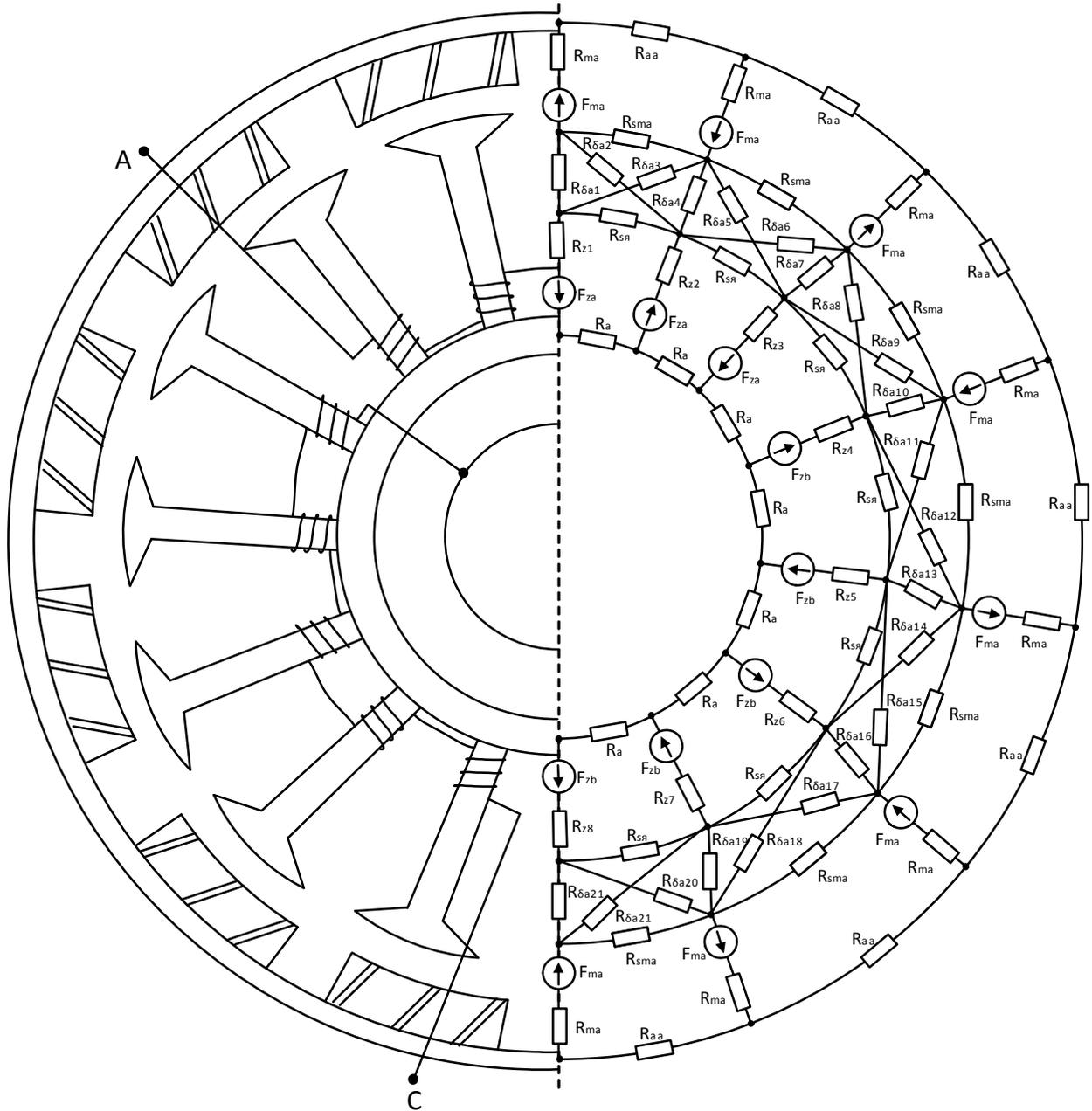


Рис. 2. Эскиз (слева) и цепная модель магнитной системы (справа) магнитоэлектрического двигателя со сосредоточенной обмоткой якоря:  $F_m$  – МДС постоянных магнитов;  $F_{za}$ ,  $F_{zb}$  – МДС катушек обмотки статора для фаз А и В;  $R_{\delta a1} \dots R_{\delta a21}$  – сопротивления воздушного зазора;  $R_{z1} \dots R_{z8}$  – сопротивления зубцов статора;  $R_{ma}$  – сопротивление постоянного магнита;  $R_{s\alpha}$  – сопротивление рассеяния наружной части статора;  $R_{sma}$  – сопротивление рассеяния постоянных магнитов ротора;  $R_{aa}$ ,  $R_a$  – сопротивления ярем ротора и статора

ЭДС рассчитывают по традиционной формуле:

$$E = \frac{\pi\sqrt{2}\Phi_{рез}fw_{\Phi}k_w}{k_{\Phi}}, \tag{1}$$

где  $k_w$  – обмоточный коэффициент;  $w_{\Phi}$  – число последовательно соединённых витков в фазе;  $f$  – частота;  $k_{\Phi}$  – коэффициент формы поля.

Из формулы (1) легко определить частоту идеального холостого хода  $f_0$ , полагая  $E = U$ , так что расчёт рабочих характеристик можно провести в диапазоне

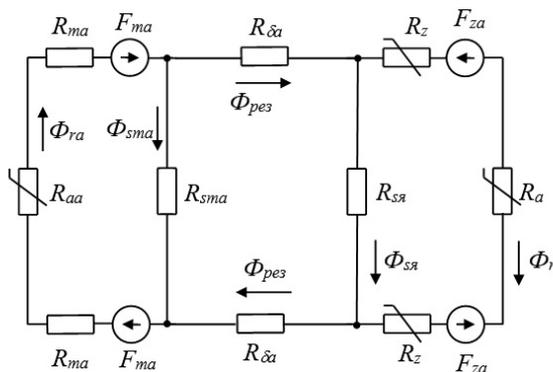


Рис. 3. Схема замещения магнитной цепи

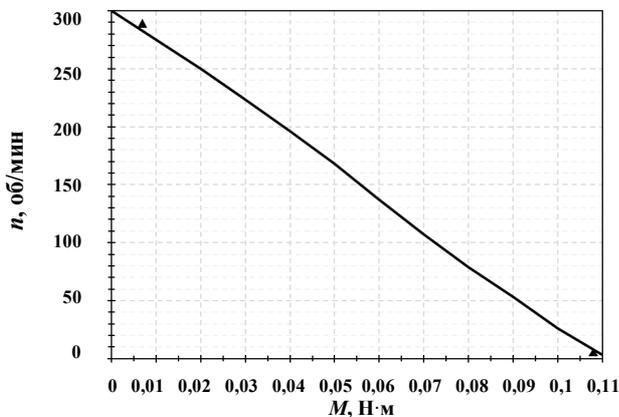


Рис. 4. Механическая характеристика магнитоэлектрического двигателя со сосредоточенной обмоткой якоря: ▲ – экспериментальные данные; — – расчётные данные

частот  $f = 0 \div f_0$ . Ток якоря определяется после расчёта параметров обмотки, приведённого в [4]. Далее определяется вращающий момент, мощности, потери и КПД, как описано в статье [3] для найденного диапазона изменения частоты питания.

С использованием описанной методики поверочного расчёта построена механическая характеристика  $n = f(M)$  одного из вариантов магнитоэлектрического двигателя со сосредоточенной обмоткой якоря с максимальным моментом 0,11 Н·м (рис. 4), предназначенного для привода направленной антенно-фидерной системы космического

назначения. Результаты моделирования расходятся с экспериментальными данными для точек холостого хода и короткого замыкания не более чем на 5%, что подтверждает адекватность созданной методики поверочного расчёта.

### Выводы

1. Синхронные магнитоэлектрические и реактивные машины с электромагнитной редукцией, обладающие высокой точностью позиционирования, высокой резонансной механической частотой, значительным пусковым моментом в совокупности с приемлемыми энергетическими показателями, являются перспективными для применения в приводах космического назначения.

2. Предложена математическая модель распределения магнитного потока в активной части синхронных магнитоэлектрического и реактивного электродвигателей со сосредоточенной обмоткой якоря, основанная на схеме замещения магнитной цепи.

3. Сочетание простоты, высокого быстродействия и достаточной точности предложенной математической модели позволяет рекомендовать адекватную методику, построенную на её основе, для применения на начальном этапе оптимизационных расчётов при автоматизированном проектировании магнитоэлектрической машины со сосредоточенной обмоткой якоря.

### Литература

1. Мартынова С. А., Захаренко А. Б., Дульцев А. А. Конструкция синхронного реактивного электродвигателя. Патент на полезную модель РФ № 145561 по заявке № 2014116840, опубликовано 20.09.2014, бюллетень № 26, 2 с.
2. Захаренко А. Б., Авдонин А. Ф. Оптимизация проектирования тихоходного вентильного двигателя с двумя индукторами для привода мотор-колеса // Электротехника. – 1999. – № 12. – С. 6 – 13.
3. Лопухина Е. М., Семенчуков Г. А., Авдонин А. Ф., Захаренко А. Б. Новый тихоходный вентильный двигатель с постоянными магнитами для мотор-колёс // Электричество. – 2000. – № 6. – С. 54 – 60.
4. Лопухина Е. М., Семенчуков Г. А. Автоматизированное проектирование электрических машин малой мощности. – М.: Высшая школа, 2002. – 511 с.

Поступила в редакцию 17.12.2014

Андрей Борисович Захаренко, д-р техн. наук,  
начальник отдела, т. (495) 366-26-44.  
Светлана Андреевна Мартынова, аспирант, инженер, т. (495) 366-28-22.  
E-mail: vniiem@vniiem.ru.