

РАСЧЕТ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ОМЕДНЕННЫМ МАССИВНЫМ ФЕРРОМАГНИТНЫМ РОТОРОМ

Ищенко И. М., к.т.н., доцент, профессор кафедры эксплуатации судового электрооборудования и средств автоматики Херсонской государственной морской академии, e-mail: ecezakaf@gmail.com;

Голощапов С. С., к.т.н., доцент кафедры эксплуатации судового электрооборудования и средств автоматики Херсонской государственной морской академии, e-mail: ecezakaf@gmail.com

Повышение эксплуатационных показателей существующих электроприводов является одной из наиболее важных задач современной судовой энергетики. Двигатели с массивными роторами, отличаясь своей простотой в изготовлении и дешевизной, в то же время требуют улучшения эксплуатационных показателей. Один из вариантов с возможностями использования достижений современных нанотехнологий – омеднение поверхности ротора. Предлагаемая методика расчета параметров двигателей с массивными омедненными роторами позволяет относительно просто оптимизировать толщину покрытия ротора, в частности, и геометрию машины в целом, рассчитать ее пусковые и рабочие характеристики.

Ключевые слова: массивный ротор, напряженность магнитного поля, магнитная проницаемость, скольжение.

Введение. Преимуществами двигателей с массивными роторами являются высокая кратность пускового момента с одновременным снижением пускового тока, повышенная прочность ротора, что позволяет существенно повысить рабочие скорости двигателя.

Однако такие двигатели, по сравнению с традиционными, имеют относительно низкие энергетические показатели – к.п.д. и $\cos\varphi$, что препятствует их широкому использованию.

Наиболее эффективный способ улучшения энергетических показателей двигателей с массивными роторами при сохранении их положительных особенностей – покрытие поверхности ротора тонким слоем высокопроводящего материала (обычно медью). Омеднение ферромагнитного ротора позволяет уменьшить как активное, так и индуктивное сопротивление вторичной цепи, улучшив рабочие характеристики двигателя.

Актуальность. Многие современные электроприводы судового оборудования (брашпили, якорно-швартовые устройства, грузовые лебедки и т.п.) зачастую требуют от двигателей улучшенных пусковых характеристик. В то же время, в связи с кратковременным режимом работы, не обязательными являются высокие эксплуатационные параметры: к.п.д. и $\cos\varphi$. Этим требованиям отвечают асинхронные двигатели с массивными роторами с улучшенными энергетическими показателями.

Целью статьи является разработка относительно простой методики расчета характеристик и эксплуатационных параметров двигателя с омедненным массивным ротором, оптимизации толщины медного покрытия.

На практике двигатели с массивным ротором изготавливают на базе готового статора серийной асинхронной машины путем замены обычного ротора с беличьей клеткой на массивный. При этом параметры статора берутся из каталога либо рассчитываются как для обычного двигателя с беличьей клеткой. Так как мощность двигателя с массивным ротором составляет 40–50 % от мощности традиционного двигателя, при длительном режиме работы необходимо за исходный взять двигатель удвоенной мощности. Если же двигатель предназначен для кратковременного режима работы (например, двигатель брашпиля), такой запас по мощности не требуется.

Расчет параметров массивного ротора:

1. Задаем величину эквивалентного приведенного тока ротора I_2^1 .
2. Рассчитываем м.д.с., действующую на массивный ротор:

$$F = 2,7 \frac{w_1 k_{w1}}{p} I_2^1,$$

где w_1 – число витков обмотки статора, k_{w1} – обмоточный коэффициент обмотки статора, p – число пар полюсов двигателя.

3. Определяем расчетную величину действующего значения напряженности магнитного поля на поверхности массивного ротора:

$$H_e = \frac{F}{\sqrt{2} k_H \tau},$$

где $k_H \approx 0,63$ – коэффициент, учитывающий неравномерный характер распределения магнитной индукции вдоль полюсного деления, τ – полюсное деление двигателя.

4. Исходя из уравнений Неймана Л. Р. [1] для единичного комплексного сопротивления $Z_{(1)}$ участка массивного магнитопровода:

$$Z_{(1)} = \dot{A} \sqrt{\frac{\gamma}{\mu_e}};$$

$$R_{(1)} = \operatorname{Re} \dot{A} \sqrt{\frac{\gamma}{\mu_e}};$$

$$X_{(1)} = \operatorname{Im} \dot{A} \sqrt{\frac{\gamma}{\mu_e}},$$

где γ – удельная электрическая проводимость материала магнитопровода ротора, μ_e – значение магнитной проводимости материала магнитопровода, найденное из основной кривой намагничивания по действующему значению H_e напряженности магнитного поля:

$$\dot{A} = 1,13 + j1,85,$$

по кривым рис. 1–5 [2] и рассчитанной напряженности поля H_e определяем модуль комплексного значения единичного магнитного сопротивления $Z_{(1)}$ при 20 °С.

Полученное значение $Z_{(1)}$ раскладываем на действительную $R_{(1)}$ и мнимую $X_{(1)}$ части с соотношением $\frac{R_{(1)}}{X_{(1)}} = \frac{1,13}{1,85} \approx 0,6$, т.е. получаем:

$$Z_{(1)} = R_{(1)} + jX_{(1)}.$$

5. Приводим сопротивление $Z_{(1)}$ к расчетной рабочей температуре $t \approx 130^\circ \text{C}$:

$$Z_{(1)t} = \frac{R_{(1)} + jX_{(1)}}{\sqrt{1 + \alpha(t - 20)}} = R_{(1)t} + jX_{(1)t},$$

где $\alpha \approx 0,005$ – температурный коэффициент сопротивления стали.

6. По величине относительной длины машины:

$$\Lambda = \frac{l}{\tau},$$

где l – длина активной части двигателя, и из [2] по рис. 1–15 определяем коэффициент k_{Λ} , учитывающий влияние относительной длины массивного ротора на его эквивалентные параметры.

7. Рассчитываем эквивалентные приведенные параметры массивного ротора при заданной частоте как:

$$z_2^1 = r_2^1 + jx_2^1 = \frac{j\pi \cdot m \cdot \sqrt{f} \cdot (w_1 \cdot k_{w1})^2}{(R_{(1)t} + jX_{(1)t}) \cdot k_{\Lambda} \cdot p},$$

где f – частота сети, m – число фаз.

Поскольку глубина проникновения электромагнитного поля в тело ротора обратно пропорциональна \sqrt{f} [3], зависимость параметров r_2^1 и x_2^1 от скольжения S определяется формулами:

$$r_{2s}^1 = \frac{r_2^1}{\sqrt{S}}, \quad x_{2s}^1 = \frac{x_2^1}{\sqrt{S}} = 0,6r_{2s}^1.$$

Параметры r_2^1 и $x_2^1 \approx 0,6r_2^1$ принимаются как приведенные к статору значения активного и реактивного сопротивления ферромагнитной части ротора. Указанное соотношение между активной и реактивной составляющей полного сопротивления массивного ротора не зависит ни от частоты его перемагничивания (т.е. от скольжения), ни от магнитного состояния материала массивного ротора [2, 3].

Уточненное значение тока I_2^1 определяется как:

$$I_2^1 = \frac{U_{\phi}}{\sqrt{(x_1 + x_{2s}^1)^2 + (r_1 + r_{2s}^1)}}.$$

Если полученное значение значительно отличается от принятого в п.1, необходимо учесть следующее.

Рассчитанные таким образом r_2^1 и $x_2^1 \approx 0,6r_2^1$ соответствуют тому значению расчетной магнитной проницаемости μ_e на поверхности массивного ротора, которое имеет место при величине приведенного тока ротора I_2^1 , которым задались в п.1.

Для всех других значений этого тока параметры массивного ротора могут быть получены путем пересчета по формуле:

$$r_2^{11} = r_2^1 \left(\frac{I_2^1}{I_2^{11}} \right)^{\frac{3}{7}}, \quad x_2^{11} \approx 0,6r_2^{11}.$$

где r_2^{11} и x_2^{11} – значения параметров массивного ротора, соответствующие току I_2^{11} .

8. Учет медного покрытия ротора.

При омедненном роторе во вторичном контуре схемы замещения появляется параллельно r_{2s}^1 и x_{2s}^1 вторая ветвь, соответствующая активному и реактивному сопротивлению медного покрытия. Если пренебречь индуктивным сопротивлением покрытия и учесть, что $x_2^1 \approx 0,6r_2^1$, то получим эквивалентные активные и индуктивные сопротивления омедненного ротора, приведенные к обмотке статора:

$$r_{2\vartheta}^1 = \frac{r_{2s}^1 \cdot r_{\Delta s}^1 (1,36r_{2s}^1 + r_{\Delta s}^1)}{1,36(r_{2s}^1)^2 + 2r_{2s}^1 \cdot r_{\Delta s}^1 + (r_{\Delta s}^1)^2};$$

$$x_{2\vartheta}^1 = \frac{0,6r_{2s}^1 \cdot (r_{\Delta s}^1)^2}{1,36(r_{2s}^1)^2 + 2r_{2s}^1 \cdot r_{\Delta s}^1 + (r_{\Delta s}^1)^2}$$

где

$$r_{\Delta s}^1 = \frac{r_{\Delta}^1}{s};$$

$r_{\Delta}^1 = \frac{4m \cdot l \cdot (w_1 \cdot k_{w1})^2}{\pi D} k_n \frac{\rho_m}{\Delta_m}$ – приведенное активное сопротивление медного покрытия,

m – число фаз; $k_n = 1 + \frac{2\tau}{\pi \cdot l}$ – коэффициент, учитывающий влияние торцевых частей

омедненного ротора, D – диаметр расточки статора, ρ_m – удельное сопротивление меди при температуре $t \approx 130^\circ C$, Δ_m – толщина медного покрытия.

9. Расчет пусковых и рабочих характеристик.

После этого рассчитываются и строятся пусковые и рабочие характеристики:

$$M = f(s);$$

$$M = \frac{mU_{\phi}^2 r_{2\vartheta}^1}{\omega_0 [(x_1 + x_{2\vartheta}^1)^2 + (r_1 + r_{2\vartheta}^1)^2]},$$

где U_{ϕ} – фазное напряжение, x_1 и r_1 – индуктивное и активное сопротивление обмотки статора соответственно и

$$I_2^1 = f(s);$$

$$I_2^1 = \frac{U_{\phi}}{\sqrt{(x_1 + x_{2\vartheta}^1)^2 + (r_1 + r_{2\vartheta}^1)^2}};$$

$$I = f(s), \cos \varphi = f(s).$$

При этом можно принять $I \approx I_2^1 + I_{0\mu}$, где $I_{0\mu}$ – намагничивающий ток (реактивная составляющая тока холостого хода).

Приведенная схема замещения (рис. 1) иллюстрирует изложенную методику.

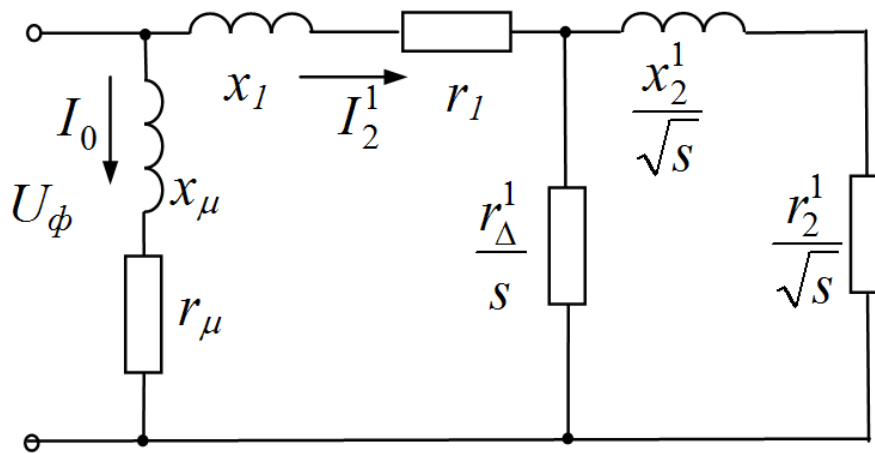


Рисунок 1 – Схема замещения двигателя с омедненным массивным ферромагнитным ротором

Выводы. Предложенная методика позволяет повысить точность расчета параметров и характеристик асинхронных машин с омедненными ферромагнитными роторами, сократить объем вычислений с учетом всех существующих физических явлений и факторов, присутствующих в массивных ферромагнитных роторах, определить оптимальные материалы и толщину медного покрытия.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нейман Л. Р. Поверхностный эффект в ферромагнитных телах / Л. Р. Нейман. – М. – Л. : Госэнергоиздат, 1949. – 189 с.
2. Куцевалов В. М. Вопросы теории и расчета асинхронных машин с массивными роторами / В. М. Куцевалов. – М. – Л. : Энергия, 1966. – 304 с.
3. Постников И. М. Проектирование электрических машин / И. М. Постников. – К. : Гос. изд-во техн. литер. УССР, 1960. – 910 с.

REFERENCES

1. Neuman L. R. Superficial effect in the ferromagnetic bodies / L. R. Neuman. – M. – L. : Gosenergoizdat, 1949. – 189 p.
2. Kutsevalov V. M. Questions of theory and calculation of asynchronous machines with the massive rotors / V. M. Kutsevalov. – M. – L. : Energy, 1966. – 304 p.
3. Postnikov I. M. Planning of electric machines / I. M. Postnikov – K. : State publish of technical literature Ukraine, 1960. – 910 p.

Іщенко І. М., Голощанов С. С. РОЗРАХУНОК АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ОБМІДНЕНИМ МАСИВНИМ ФЕРОМАГНІТНИМ РОТОРОМ

Підвищення експлуатаційних показників електроприводів є одним з найбільш важливих завдань сучасної суднової енергетики. Двигуни з масивними роторами, відрізняючись своєю простотою у виготовленні й дешевизною, у той же час вимагають поліпшення експлуатаційних показників. Один із варіантів з можливостями використання досягнень сучасних нанотехнологій – оміднення поверхні ротора. Запропонована методика розрахунків параметрів двигунів з масивними обмідненими роторами дозволяє відносно просто оптимізувати товщину покриття ротора, зокрема, й геометрію машини в цілому, розрахувати її пускові й робочі характеристики.

Ключові слова: масивний ротор, напруженість магнітного поля, магнітна проникність, ковзання.

Ischenko I. M., Goloschapov S. S. CALCULATING OF ASYNCHRONOUS ENGINE WITH COPPER COVERAGING MASSIVE FERROMAGNETIC ROTOR

The increase of operating indexes of existent electromechanics is one of the most essential tasks of modern ship energy. Engines with massive rotors, differing in the simplicity in making and cheapness, at the same time require the improvement of operating indexes. One of variants with possibilities of drawing on accomplishments of modern nanotechnologies is copper surface coveraging of rotor. The offered methodology of calculation of parameters of engines with massive copper coveraging rotors allows to optimize the thickness of coverage of rotor in particular and geometry of machine on the whole in a relatively simple way, to count its starting and working characteristics.

Keywords: massive rotor, tension of magnetic-field, permeance, skidding.

© Іщенко І. М., Голощяпов С. С.

Статтю прийнято
до редакції 27.03.17