

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА АСИНХРОННЫХ МАШИН С ФЕРРОМАГНИТНЫМ РОТОРОМ

Ищенко И.М., Вороненко С.В., Данык В.В.

Херсонская государственная морская академия

Повышение надежности, экономичности и энергетической (топливной) эффективности в настоящее время является наиболее важной проблемой совершенствования автономных электроэнергетических систем в судовой энергетике. Цель статьи – возможность повышения показателей машины за счет подбора ферромагнитного материала ротора с определенными параметрами, в том числе и с выбором плотности тока в роторе. При этом, выбор параметров машины будем проводить с учетом обеспечения предельных окружных скоростей ротора. Предложенная методика позволяет повысить точность расчета асинхронных машин, сократить объем вычислений с выявлением всех существующих аналитических связей неизвестных параметров. При расчете асинхронных машин с массивным ротором и нанесенным на нем покрытием данная методика позволяет определить оптимальные параметры материала покрытия для получения заданных характеристик машины.

Ключевые слова: судовые энергетические установки, валогенераторные установки, утилизационные турбогенераторы.

Введение. На современных судах все более широкое применение находят электроэнергетические системы с валогенераторными установками (ВГУ), что обусловлено такими их достоинствами, как повышение экономичности и надежности судовых энергетических установок (СЭУ), снижение себестоимости вырабатываемой электроэнергии, уменьшение эксплуатационных затрат и др. Кроме того, в настоящее время актуальным становится применение в качестве аварийного пропульсивного комплекса ВГУ, работающей в двигательном режиме. В связи с этим определенный интерес представляет использование в качестве ВГУ дифференциально-планетарной генераторной установки.

Повышение надежности, экономичности и энергетической (топливной) эффективности в настоящее время является наиболее важной проблемой совершенствования автономных электроэнергетических систем в судовой энергетике.

Актуальность исследований. Решение этой проблемы обеспечивается применением утилизационных турбогенераторов и валогенераторных установок.

Одним из возможных направлений повышения эффективности систем утилизации тепла выхлопных газов дизелей может быть применение комбинированных (гибридных) турбокомпрессоров наддува с электрической машиной. В качестве такой машины применена машина с постоянными магнитами. Электрические машины с постоянными магнитами, как известно, обладают рядом преимуществ, к основным из которых относятся: бесконтактность, простота эксплуатации, надежность и др. Однако им присущ и ряд существенных недостатков:

- высокая стоимость, особенно машин с магнитами большой энергии;
- сложность обеспечения требуемой механической прочности ротора;
- стоимость регулирования напряжения в генераторном режиме;
- практически невозможность обеспечить пуск в режиме двигателя непосредственно от источника электроэнергии.

Указанные недостатки практически отсутствуют в аналогичных системах с асинхронными машинами. При этом определенные преимущества можно получить в системах с асинхронными машинами с массивным ротором.

Как известно, асинхронные машины с массивным ферромагнитным ротором имеют такие достоинства как относительно высокая кратность пускового момента, низкая кратность пускового момента, высокая механическая прочность ротора и, соответственно, возможность надежно работать при высоких частотах вращения.

Существенным недостатком асинхронных машин с ферромагнитным ротором являются низкие энергетические показатели (КПД и коэффициент мощности), что обусловлено особенностью параметров вторичной цепи.

Целью статьи является рассмотрение возможности повышения показателей машины за счет подбора ферромагнитного материала ротора с определенными параметрами, в том числе и с выбором плотности тока в роторе. При этом выбор параметров машины будем проводить с учетом обеспечения предельных окружных скоростей ротора.

Основной материал. При определении главных размеров (диаметра расточки статора D и конструктивного коэффициента λ) пользуются соотношением:

$$\lambda D^3 = \frac{6,1 \cdot p \cdot P_n \cdot 10^7}{\alpha \cdot K_\phi \cdot K_{об1} \cdot 60 \cdot f_1 \cdot A \cdot B_\delta \cdot \eta \cdot \cos \varphi} \quad (1)$$

Номинальная мощность двигателя P_n , число пар полюсов p и частота f_1 являются величинами заданными. Для решения уравнения (1) предварительно принимаются значения:

- коэффициента полюсного перекрытия – α ;
- коэффициента формы поля – K_ϕ ;
- обмоточного коэффициента – $K_{об1}$;

в зависимости от P_n и p также выбирают:

- индукцию в воздушном зазоре – B_δ ;
- линейную нагрузку – A ;
- к.п.д. – η ;
- коэффициент мощности – $\cos \varphi$.

Таким образом, значения A , B_δ и $\cos \varphi$ задаются независимо друг от друга. Однако, величина коэффициента мощности $\cos \varphi$, пропорциональная кратности намагничивающего тока I_μ / I_{1n} , имеет жесткую связь с B_δ и A .

$$\sqrt{1 - \cos^2 \varphi} \approx \frac{I_\mu}{I_{1n}} = 1,134 \frac{p \cdot \delta \cdot K_n \cdot K_\delta}{K_{об1} \cdot D} \cdot \frac{B_\delta}{A} \cdot 10^{-4}, \quad (2)$$

где K_n – коэффициент насыщения; K_δ – коэффициент воздушного зазора; δ – величина воздушного зазора.

Приняв усредненные значения K_n , K_δ , δ , в результате совместного решения (1), (2) получим

$$B_\delta = \frac{1}{D} \cdot \sqrt{\frac{7,8 \cdot P_n \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi}}{\eta \cdot \lambda \cdot \cos \varphi}}, \quad (3)$$

$$A = \frac{p}{D^2} \cdot \sqrt{\frac{1,6 \cdot P_n \cdot 10^6}{\eta \cdot \lambda \cdot \cos \varphi \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi}}} \quad (4)$$

Из (3), (4) следует, что для заданных P_n , p и принятых значений $\cos \varphi$, λ , η как индукция в воздушном зазоре B_δ , так и линейная нагрузка A имеют однозначную связь с величиной диаметра D . Поэтому при определении главных размеров нельзя одновременно задаваться величинами A , B_δ , $\cos \varphi$, а достаточно для принятого $\cos \varphi$ задаться величиной либо индукции в воздушном зазоре B_δ , либо линейной нагрузки A . В случае заданного диаметра D величины B_δ , A определяются величиной коэффициента мощности $\cos \varphi$.

При электромагнитном расчете асинхронной машины с массивным ферромагнитным ротором является выбор плотности тока в токопроводящем слое (покрытии) ротора, который может быть выполнен с применением нанотехнологий.

Согласно [5], вторичный ток (ротора), приведенный к первичному, определяется формулой:

$$I_2' = \frac{U_1}{r_1 + jx_1 + \frac{r_2'}{s} (\pm 1 + j\frac{a_x}{a_r})},$$

где $a_r=1,4$, $a_x=0,84$ [3] из

$$R_c = \varphi_c \cdot a_r, \quad x_c = \varphi_c \cdot a_x.$$

Здесь

$$\varphi_c = \frac{4 \cdot m_1 \cdot l_1 \cdot W_1^2 \cdot k_{лс} \cdot \sqrt{\omega_1 \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \rho}}{\pi D \sqrt{2s}},$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление ферромагнитного ротора; μ_r – относительная магнитная проводимость на поверхности ротора при данном скольжении; W_1 – число витков фазы обмотки статора; $k_{лс}$ – коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления ротора за счет лобовых частей; l_1 – длина ротора; s – скольжение; m_1 – число фаз обмотки статора; D – диаметр ротора; μ_0 – магнитная постоянная; ω_1 – угловая частота.

Приведенное сопротивление ротора:

$$r_2' = r_2'' \cdot \sqrt{s},$$

где $r_2'' = \frac{1}{p} \cdot k_\beta \cdot 2 \cdot m_1 \cdot (w_1 \cdot k_{об})^2 \cdot \sqrt{\frac{\mu_0 \cdot \mu_k' \cdot \rho \cdot w_1}{2} \cdot \frac{I_{1н}}{U_n}}$.

По заданному номинальному скольжению определяем:

$$r_{2н}' = s_n \cdot \frac{U_n}{I_{1н}}.$$

Плотность тока в роторе получим, решая уравнение:

$$j_2 = \frac{s_n \cdot U_1 \cdot 10^2}{2p \cdot k_{об1} \cdot \omega_1 \left(l + \frac{0,75D}{p} \right)},$$

где s_n – номинальное скольжение; l, D – длина и диаметр ротора.

По величине I_2 и j_2 определяем

$$r_2 = \rho \left(l + 0,75 \frac{D}{p} \right) \frac{j_2}{I_2}.$$

При необходимости учета окружных скоростей ротора машины, а также ее механической постоянной времени обычно определяют механическую мощность из выражений:

$$P_{мех} = P_1 (1 - \delta),$$

$$T_j = \frac{J \omega_p^2}{P_{мех}},$$

где J – момент инерции ротора; ω_p – угловая скорость ротора, соответствующая допустимой линейной скорости:

$$T_j = \frac{J \omega_p^2}{P_{мех}},$$

$$J = \frac{M_p \cdot D^2}{8},$$

где M_p – масса ротора.

Таким образом, расчет асинхронной машины с массивным ферромагнитным ротором целесообразно проводить в предложенном порядке.

По выбранной величине магнитной индукции в воздушном зазоре (B_δ) и принятым λ , η и $\cos \varphi$ определяем диаметр D . По полученному D определяем A . Далее, на основании выбранного материала, нанесенного на поверхность ротора (по μ_r , ρ), определяем ток и плотность тока в роторе при заданном скольжении, а также другие параметры двигателя.

Выводы. Предложенная методика позволяет повысить точность расчета асинхронных машин, сократить объем вычислений с выявлением всех существующих аналитических связей неизвестных параметров. При расчете асинхронных машин с массивным ротором и нанесенным на нем покрытию данная методика позволяет определить оптимальные параметры материала покрытия для получения заданных характеристик машины.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТРАТУРЫ

1. Михайлов В. А. Автоматизированные электроэнергетические системы судов / В. А. Михайлов. – Л. : Судостроение, 1977. – 510 с.
2. Фрейдзон И. Р. Судовые автоматизированные электроприводы и системы / И. Р. Фрейдзон – Л. : Судостроение, 1988. – 468 с.
3. Плавнорегулируемые трансформаторы, асинхронные и бесконтактные синхронные машины / М. М. Красношарпа и др. – М. : Радио и связь, 1992. – 184 с.
4. Судовые энергетические установки / Г. А. Артемов и др. – Л. : Судостроение, 1987. – 480 с.
5. Специальные электрические машины / А. И. Бертинов и др. – М. : Энергоиздат, 1982. – 552 с.

REFERENCES

1. Mikhayilov V. A. Avtomatizirovannihe ehlektroehnergeticheskie sistemih sudov / V. A. Mikhayilov. – L. : Sudostroenie, 1977. – 510 s.
2. Freyjdzon I. R. Sudovihe avtomatizirovannihe ehlektroprivodih i sistemih / I. R. Freyjdzon – L. : Sudostroenie, 1988. – 468 s.
3. Plavnoreguliruemihe transformatorih, asinkhronnihe i beskontaktnihe sinkhronnihe mashinih / M.M. Krasnoshapka i dr. – M. : Radio i svyazj, 1992. – 184 s.
4. Sudovihe ehnergeticheskie ustanovki / G.A. Artemov i dr. – L. : Sudostroenie, 1987. – 480 s.
5. Specialjnihe ehlektricheskie mashinih / A. I. Bertinov i dr. – M. : Ehnergoizdat, 1982. – 552 s.

Іщенко І.М., Вороненко С.В., Даник В.В. ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ АСИНХРОННИХ МАШИН З ФЕРОМАГНІТНИМИ РОТОРОМ

Підвищення надійності, економічності та енергетичної (паливної) ефективності в даний час є найбільш важливою проблемою вдосконалення автономних електроенергетичних систем в судновій енергетиці. Мета статті – можливість підвищення показників машини за рахунок підбору феромагнітного матеріалу ротора з певними параметрами, у тому числі і з вибором щільності струму в роторі. При цьому вибір параметрів машини будемо проводити з урахуванням забезпечення граничних окружних швидкостей ротора. Запропонована методика дозволяє підвищити точність розрахунку асинхронних машин, скоротити обсяг обчислень з виявленням всіх існуючих аналітичних зв'язків невідомих параметрів. При розрахунку асинхронних машин з масивним ротором і нанесеним на ньому покритті дана методика дозволяє визначити оптимальні параметри матеріалу покриття для отримання заданих характеристик машини.

Ключові слова: суднові енергетичні установки, валогенераторні установки, утилізаційні турбогенератори.

Ischenko I.M., Voronenko S.V., Danik V.V. CALCULATION FEATURES ASYNCHRONOUS MACHINES WITH FERROMAGNETIC ROTOR

Improving the reliability, efficiency and energy (fuel) efficiency is currently the most important problem of improving autonomous electric power systems in the marine energy sector. Purpose of the article - the ability to improve the performance of the machine by selecting a ferromagnetic material of the rotor with certain parameters, including the one for the current density in the rotor. At the same time, the choice of parameters of the machine will be carried out with a view to ensuring the limiting rotational speeds of the rotor. The proposed method improves the accuracy of calculation of asynchronous machines, reduce the amount of computation to identify all existing analytical relations unknown parameters. In the calculation of asynchronous machines with a massive rotor and the coating applied to it this method allows to determine the optimal parameters of the coating material to obtain the desired characteristics of the machine.

Keywords: *ship power plants, valogeneratormye installation recovery turbo.*

© Іщенко І.М., Вороненко С.В., Даник В.В.

Статтю прийнято
до редакції 20.04.15