

РАСЧЕТ АСИНХРОННОГО КОРОТКОЗАМКНУТОГО ДВИГАТЕЛЯ С ДВУХСЛОЙНЫМ РОТОРОМ

Голощяпов С. С., к.т.н., доцент, доцент кафедры эксплуатации судового электрооборудования и средств автоматики Херсонской государственной морской академии, e-mail: goloschaporv46@gmail.com;

Ищенко И. М., к.т.н., доцент, доцент кафедры эксплуатации судового электрооборудования и средств автоматики Херсонской государственной морской академии;

Тимофеев К. В., к.т.н., доцент, доцент кафедры эксплуатации судового электрооборудования и средств автоматики Херсонской государственной морской академии

Использование асинхронного электропривода на современных судах обуславливается его высокой надежностью, простотой в эксплуатации, высокими экономическими показателями. В то же время относительно невысокий пусковой момент и значительный пусковой ток затрудняет его применение в судовых энергетических системах и механизмах. Наиболее подходящими для указанных приводов являются асинхронные двигатели с улучшенными пусковыми характеристиками, которые можно разделить на две группы: двигатели, основанные на эффекте вытеснения тока в пазу ротора и двигатели на основе ферромагнитного ротора. В первой группе можно выделить глубокопазные и двигатели с двойной беличьей клеткой, широко применяемые в подъемных судовых механизмах. Ко второй группе относятся двигатели с ферромагнитными роторами: с массивным, массивным омедненным и с двухслойным ротором. Среди последних можно выделить двигатели с двухслойным ротором, которые удачно сочетают в себе высокие пусковые характеристики (большой пусковой момент и относительно невысокую кратность пускового тока) и хорошие рабочие характеристики в части к.п.д. и $\cos\phi$, присущие асинхронным двигателям с короткозамкнутой клеткой. Предлагаемая методика расчета параметров двигателей с двухслойным ротором позволяет оптимизировать толщину каждого из слоев ротора, рассчитывать пусковые и рабочие характеристики.

Ключевые слова: двухслойный ротор, скин-эффект, пусковой момент, пусковой ток, скольжение.

Введение. Двигатели с двухслойным ротором [1, 2] относятся к двигателям с улучшенными пусковыми характеристиками [3, 4] и представляют собой обычный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, в котором для улучшения пусковых характеристик на ротор насажена массивная ферромагнитная гильза. При этом известно, что в случае использования массивного ротора все электромагнитные процессы, в том числе и вращающий момент создаются в скин-слое ферромагнетика [5, 6, 7]. Несмотря на то, что вопросы теории и расчета асинхронных двигателей на основе массивного ферромагнитного ротора [8, 9, 10, 11] хорошо изучены, расчет двигателя, сочетающего в себе и короткозамкнутый и массивный ферромагнитный ротор, недостаточно освещен в современной литературе.

Актуальность. Многие 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 $\cos\phi$. Этим требованиям отвечают асинхронные двигатели с двухслойными роторами, сочетающие в себе высокие пусковые и достаточно хорошие рабочие энергетические характеристики.

Целью статьи является разработка относительно простой и доступной методики расчета пусковых и рабочих характеристик короткозамкнутых двигателей с двухслойным ротором, дающая возможность оперативно оптимизировать толщину ферромагнитной гильзы для получения необходимых пусковых и рабочих характеристик.

Основная часть. Основные положения, положенные в основу расчета таких двигателей, следующие.

Известно [5, 6], что максимальная индукция находится на поверхности массивного ротора. При удалении от поверхности она убывает экспоненциально и на глубине Δ_c становится меньше в e раз. Эта глубина называется толщиной скин-слоя

Согласно [6] толщина скин-слоя равна:

$$\Delta_c = c \sqrt{2 \frac{\epsilon_0}{\omega \mu_m} \rho} = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_m f}},$$

где c – скорость света, ϵ_0 - диэлектрическая постоянная, $\omega = 2\pi f$, ρ – удельное сопротивление, f – линейная частота, μ_m - относительная магнитная проницаемость.

При достаточно большой частоте f толщина скин-слоя может быть очень малой. Из экспоненциального убывания плотности тока следует, что практически весь ток сосредоточен в слое толщиной в несколько Δ_c , так, уменьшение плотности тока в 100 раз происходит на глубине $\approx 4,6 \Delta_c$, если общая толщина проводника многократно превышает толщину скин-слоя.

Также толщина скин-слоя зависит от частоты (скольжения) и пропорциональна $1/\sqrt{f}$ [11].

Поле в ферромагнитном роторе создает вращающий момент, значение которого можно определить по методике, изложенной в [8]. Если толщина массивного ферромагнетика ограничена толщиной гильзы, оставшееся поле проникает в короткозамкнутый ротор и создает момент, присущий обычной асинхронной машине. Таким образом, результирующий момент двухслойного двигателя определяется суммой двух составляющих: первой, обусловленной частью поля, «завязшей» в ферромагнитной гильзе и второй, оставшейся и проникнувшей в беличью клетку ротора. Поскольку момент двигателя пропорционален величине его потока, можно считать, что описанные составляющие поля определяют соответствующие составляющие результирующего момента двигателя.

По литературным данным [3] толщина скин-слоя в массивном ферромагнитном роторе при частоте 50 Гц (пусковой режим) составляет 1–3 мм. Примем толщину скин-слоя 2 мм и рассчитаем долю поля при пуске ($s = 1$), проникнувшего в беличью клетку при различных значениях толщины ферромагнитной гильзы (табл. 1).

Таблица 1 – Зависимость величины поля, проникнувшего в беличью клетку ротора, от толщины ферромагнитной гильзы

Толщина гильзы, мм	2	3	4	5	6
Величина поля, проникнувшего в клетку ротора, д.е.	0,368	0,223	0,135	0,082	0,05

Очевидно, что уже на этом этапе проектирования можно выбрать толщину гильзы. Так, например, при толщине гильзы 4 мм часть момента, обусловленная короткозамкнутой клеткой, составляет 13,5%, остальные 86,5% приходятся на долю массивной гильзы. На основании данных, приведенных в табл. 1 можно утверждать, что при толщине гильзы более 5 мм момент от короткозамкнутой клетки ничтожно мал и определяется, в основном, гильзой. Поэтому максимальная толщина гильзы должна составлять не более 5 мм.

Учитывая, что толщина скин-слоя в зависимости от скольжения определяется зависимостью $\Delta_c = 2/\sqrt{s}$, рассчитаем его для ряда скольжений (табл. 2).

Величина потока, проникнувшего в клетку ротора при толщине гильзы $\Delta = 3$ мм определится как:

$$\Phi_p = \Phi_0 e^{-\frac{\Delta}{\Delta_c}} = \Phi_0 e^{-\frac{3}{\Delta_c}},$$

где Φ_0 – величина потока на поверхности ротора.

Тогда для того же ряда скольжений получаем (табл. 2).

Таблица 2 – Зависимость толщины скин-слоя и величины потока, проникнувшего в клетку ротора от скольжения

s	0,02	0,05	0,1	0,15	0,25	0,5	0,7	1
$\Delta_c = 2 / \sqrt{s}$	14,1	8,94	6,32	5,16	4	2,83	2,39	2
Φ_p , д.е.	0,808	0,715	0,622	0,559	0,472	0,346	0,285	0,223

В приведенной таблице означает, что, например, при скольжении $s = 0,5$ момент двигателя обусловлен на 34,6 % клеткой ротора и на 65,4 % ферромагнитной гильзой. Очевидно, что при пуске будет, в основном, создавать вращающий момент гильза, а в рабочем режиме – беличья клетка.

Как известно [11], для массивного ротора приведенное значение активного сопротивления ротора в функции скольжения равно r_2^1 / \sqrt{s} . При ограниченной толщине гильзы Δ этот параметр с учетом изменения скин-слоя при изменении скольжения определится как:

$$\frac{r_2^1}{\sqrt{s}} \left(1 - e^{-\frac{\Delta}{\Delta_c}} \right) = \frac{r_2^1}{\sqrt{s}} \left(1 - e^{-\frac{\Delta \sqrt{s}}{2}} \right),$$

с учетом того, что при $s = 1$ $\Delta = 2$ мм.

Исходя из изложенного, можно представить схему замещения двигателя с двухслойным ротором (рис. 1).

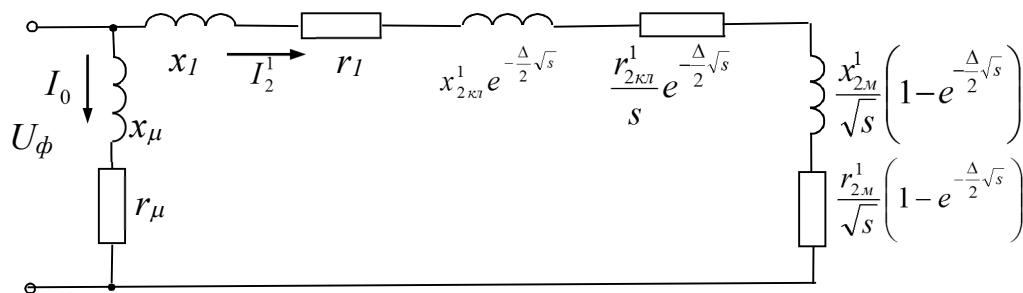


Рисунок 1 – Схема замещения асинхронного двигателя с двухслойным ротором:

x_1 и r_1 – индуктивное сопротивление рассеяния и активное сопротивление обмотки статора соответственно, $x_{2кл}^1$ и $r_{2кл}^1$ – приведенные индуктивное и активное сопротивление беличьей клетки соответственно, $x_{2м}^1$ и $r_{2м}^1$ – приведенные индуктивное и активное сопротивление гильзы соответственно, x_μ , r_μ – параметры намагничивающего контура, s – скольжение, Δ – толщина стенки ферромагнитной гильзы

Из схемы (рис. 1) видно, что при $\Delta \rightarrow 0$ параметры ротора, содержащие величины $x_{2м}^1$ и $r_{2м}^1$ обращаются в 0, а параметры, содержащие $x_{2кл}^1$ и $r_{2кл}^1$ вырождаются в параметры

обычного короткозамкнутого ротора. При $\Delta \rightarrow \infty$ цепь ротора будет содержать только величины, характеризующие массивный ротор, т.е. $x_{2,м}^1$ и $r_{2,м}^1$.

На основании изложенного, можно представить следующую методику расчета двигателя с двухслойным ротором.

На первом этапе по заданным параметрам и известным методикам рассчитывается асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, определяются основные его параметры $x_1, r_1, x_{2,кл}^1, r_{2,кл}^1$ и строятся его пусковые и рабочие характеристики.

После этого рассчитываются аналогичные характеристики двигателя с массивным ротором по методике, изложенной в [8].

Полученные характеристики складываются в долевом соотношении, определяемом толщиной гильзы согласно табл. 2.

В качестве примера рассмотрен расчет и построены характеристики двигателя с двухслойным ротором, выполненном на базе статора асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором со следующими параметрами:

- мощность двигателя с короткозамкнутой клеткой – 15кВт;
- $x_1 = 0,725$ Ом, $r_1 = 0,402$ Ом, $x_{2,кл}^1 = 1,02$ Ом, $r_{2,кл}^1 = 0,196$ Ом;

Параметры массивного ротора: $x_{2,м}^1 = 2,81$ Ом, $r_{2,м}^1 = 4,68$ Ом; толщина гильзы – 3 мм.

Расчет механической характеристики двигателя $M_{кл} = f(s)$ с короткозамкнутой клеткой определялся по формуле:

$$M_{кл} = \frac{mU_{\phi}^2 \frac{r_{2,кл}^1}{s}}{\omega_0 \left[(x_1 + x_{2,кл}^1)^2 + \left(r_1 + \frac{r_{2,кл}^1}{s} \right)^2 \right]},$$

где ω_0 – круговая скорость поля, $\omega_0 = \frac{2\pi f}{p}$, p – число пар полюсов, m – число фаз, $m = 3$, U_{ϕ} – фазное напряжение.

Расчет механической характеристики двигателя $M_z = f(s)$ с массивным ротором определялся по формуле:

$$M_z = \frac{mU_{\phi}^2 \frac{r_{2,з}^1}{\sqrt{s}}}{\omega_0 \left[\left(x_1 + \frac{x_{2,з}^1}{\sqrt{s}} \right)^2 + \left(r_1 + \frac{r_{2,з}^1}{\sqrt{s}} \right)^2 \right]}.$$

Далее на основании того, что толщина гильзы равна 3 мм, по данным табл. 2 определяем результирующий момент M как сумму обоих моментов в соотношениях:

$$M = 0,223M_{кл} + 0,777M_z \text{ – для } s = 1,$$

$$M = 0,285M_{кл} + 0,715M_z \text{ – для } s = 0,7,$$

$$M = 0,346M_{кл} + 0,654M_z \text{ – для } s = 0,5$$

и т. д.

На рис. 2 представлены расчетные кривые моментов короткозамкнутой клетки 1, массивного ферромагнитного ротора 2 и результирующий момент двигателя с двухслойным ротором 3 (гильза 3 мм) и 4 (гильза 2 мм).

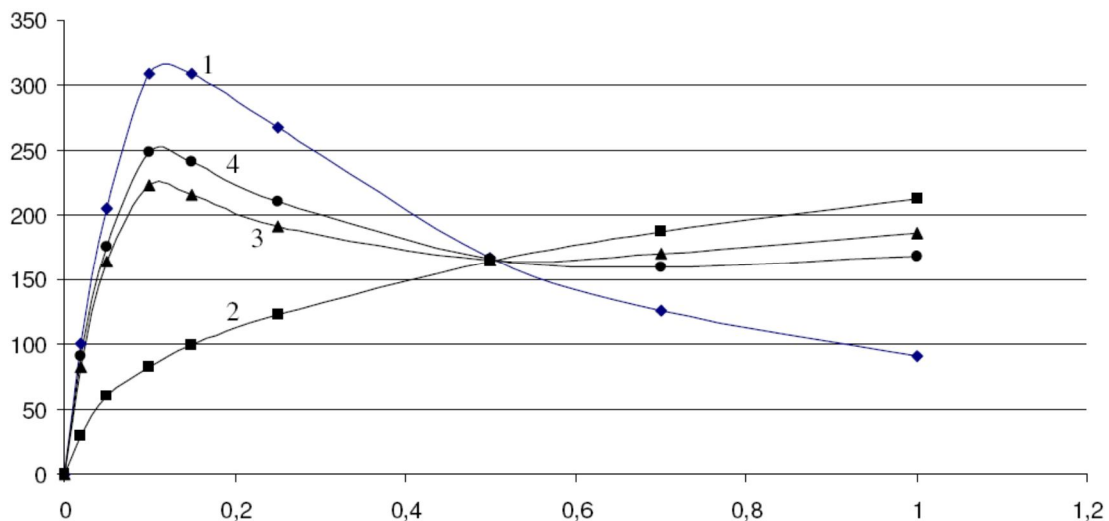


Рисунок 2 – Расчетные кривые моментов

Пусковой ток ($s = 1$) в случае применения обычного двигателя мощностью 15 кВт равен:

$$I_{n,кл} \approx \frac{U_{\phi}}{\sqrt{(x_1 + x_{2кл}^1)^2 + (r_1 + r_{2кл}^1)^2}} = 119 \text{ А при } U_{\phi} = 220 \text{ В.}$$

Пусковой ток двигателя с двухслойным ротора можно определить, исходя из схемы замещения (рис. 1):

$$I_n \approx \frac{U_{\phi}}{\sqrt{[x_1 + x_{2кл}^1 e^{-\Delta/2} + x_{2,м}^1 (1 - e^{-\Delta/2})]^2 + [r_1 + r_2^1 e^{-\Delta/2} + r_{2,м}^1 (1 - e^{-\Delta/2})]^2}} = 42,7 \text{ А.}$$

При толщине гильзы 2 мм пусковой ток составляет 49 А.

Как видно из приведенных расчетов, применение двухслойного ротора позволяет существенно повысить пусковой момент (почти в 2 раза) при одновременном трехкратном снижении пускового тока, что важно для судовой энергетики, работающей в условиях ограниченной мощности.

Выводы. Предложенная методика позволяет повысить точность расчета параметров и характеристик асинхронных машин с двухслойными роторами, сократить объем вычислений с учетом всех существующих физических явлений и факторов, присутствующих в двухслойных роторах, определить оптимальные материалы и толщину ферромагнитной гильзы. В перспективе становится возможным разработка методики расчета асинхронных двигателей со значительно уменьшенным моментом инерции на базе ротора с омедненным ферромагнитным стаканом для подъёмных механизмов, работающих в условиях частого пуска и реверса.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вербовой А.П. Экспериментальные исследования асинхронных двигателей с массивными ферромагнитными роторами / А. П. Вербовой, П. Ф. Вербовой, А.М Сьянов. НАН Украины. Ин-т электродинамики; №793. – К., 1996.
2. Применение АД с улучшенными пусковыми характеристиками. Режим доступа: <http://www.radioingener.ru/primenenie-ad-s-uluchshennymi-puskovymi-kharakteristikami/#more-5188> – Назва з екрана
3. Постников И. М. Проектирование электрических машин / И. М. Постников. – К. : Гос. изд-во техн. литер. УССР. –1960. – 910 с.

4. Копылов И.П. Проектирование электрических машин. Учебник для вузов. / И. П. Копылов, Ф. А. Горяинов, Б. К. Клоков – М.: Энергия, 1993. – 384 с.
5. Скин-эффект Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki>. Назва з екрана
6. Носов Г. В. параметры скин-слоя массивных ферромагнитных проводников в установившемся режиме при синусоидальном электромагнитном поле / Г. В. Носов, Д. Ю. Косилова // Современные проблемы науки и образования. – Томск : Томский политехнический институт. 3013. – №3. Режим доступа: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id>. Назва з екрана
7. Нейман Л. Р. Поверхностный эффект в ферромагнитных телах / Л. Р. Нейман. – М. – Л. : Госэнергоиздат, 1949. – 189 с.
8. Ищенко И.М. Расчет асинхронного двигателя с омедненным массивным ферромагнитным ротором / И. М. Ищенко, С. С. Голощапов // Науковий вісник Херсонської державної морської академії : науковий журнал. – Херсон : Херсонська державна морська академія. 2017. – С. 121–125.
9. Лищенко А.И. Асинхронные машины с массивным ферромагнитным ротором / А.И. Лищенко, В.А. Лесник. – К.: Наукова думка, 1984. – 168 с.
10. Сьянов А.М. Классификация асинхронных двигателей по конструкции массивных ферромагнитных роторов / А. М. Сьянов, А. П. Вербовой, А.М НАН Украины. Ин-т электродинамики. Режим доступа : <http://www.electrician.com.ua/posts/669> – Назва з екрана
11. Куцевалов В.М. Вопросы теории и расчета асинхронных машин с массивными роторами / В. М. Куцевалов. – М. – Л. : Энергия, 1966. – 304 с.

REFERENCES

1. Verbovoj A.P. Experimental studies of asynchronous motors with massive ferromagnetic rotors / A.P. Verbova, P.F. Verbova, A.M. Syanov. NAS of Ukraine. Institute of Electrodynamics; No. 793. - K., 1996.
2. Application of AD with improved starting characteristics.
3. Access mode: <http://www.radioingener.ru/primenenie-ad-su-uluchshennymi-puskovymi-karakteristikami/#more-5188> – Screen name
4. Postnikov IM Designing of electrical machines / IM Postnikov. - K.: Gos. publishing house in technical. letter. USSR. -1960. - 910 sec.
5. Kopylov I.P. Designing of electrical machines. Textbook for high schools. / I.P. Kopylov, F.A. Goryainov, B.K. Klokov - M. : Energia, 1993. - 384 p.
6. Skin effect Access mode: <https://en.wikipedia.org/wiki>. The name of the screen
7. Nosov G.V. parameters of the skin layer of massive ferromagnetic conductors in steady state under a sinusoidal electromagnetic field / G.V. Nosov, D.Yu., Kosilova // Modern problems of science and education. Tomsk: Tomsk Polytechnic Institute. 3013. - №3. Access mode: <http://www.science-education.ru/en/article/view?id>. The name of the screen
8. Neiman L.R. Surface effect in ferromagnetic bodies / LR Neiman. - M. - L.: State Power Engineering Publishing House, 1949. - 189 p.
9. Ishchenko IM Calculation of an asynchronous motor with copper-plated massive ferromagnetic rotor. Ishchenko, S.S. Holoschapov // Scientific Herald of Kherson State Maritime Academy: science journal. - Kherson: Kherson State Power Academy. 2017. - P. 121-125.
10. Lishchenko A.I. Asynchronous machines with massive ferromagnetic rotor / A.I. Lishchenko, V.A. Forester. - K. : Naukova dumka, 1984. - 168 with.
11. AM Syanov. Classification of asynchronous motors by the design of massive ferromagnetic rotors / AM. Syanov, A.P. Verbova, A.M. NAS of Ukraine. Institute of Electrodynamics. Access mode: <http://www.electrician.com.ua/posts/669> - The name of the screen
12. Kutsevalov V.M. Questions of the theory and calculation of asynchronous machines with massive rotors / V.M. Kutsealov. - M. - L. : Energia, 1966. 304 p

Голощاپов С. С., Іщенко І. М., Тимофеев К. В. РОЗРАХУНОК АСИНХРОННОГО КОРОТКОЗАМКНЕНОГО ДВИГУНА ІЗ ДВОШАРОВИМ РОТОРОМ

Використання асинхронного електропривода на сучасних судах обумовлюється його високою надійністю, простотою в експлуатації, високими економічними показниками. У той же час відносно невисокий пусковий момент і значний пусковий струм утрудняє його застосування в суднових енергетичних системах і механізмах. Найбільш підходящими для зазначених приводів є асинхронні двигуни з поліпшеними пусковими характеристиками, які можна розділити на дві групи: двигуни, засновані на ефекті витиснення струму в пазу ротора й двигуни на основі феромагнітного ротора. У першій групі можна виділити глибокопазні й двигуни з подвійною білячою кліткою, широко застосовувані в підйомних суднових механізмах. До другої групи відносяться двигуни з феромагнітними роторами: з масивним, масивним обмідненим і із двошаровим ротором. Серед останніх можна виділити двигуни із двошаровим ротором, які вдало поєднують у собі високі пускові характеристики (великий пусковий момент і відносно невисоку кратність пускового струму) і гарні робочі характеристики в частині к.к.д. і $\cos\phi$, властиві асинхронним двигунам з короткозамкненою кліткою. Пропонована методика розрахунків параметрів двигунів із двошаровим ротором дозволяє оптимізувати товщину кожного із шарів ротора, розраховувати пускові й робочі характеристики.

Ключові слова: двошаровий ротор, скін-ефект, пусковий момент, пусковий струм, ковзання.

Goloshchapov S.S., Ischenko I. M., Timofeev K. V. CALCULATION OF ASYNCHRONOUS SHORT-CONTAINED ENGINE WITH TWO-ROLLER ROTOR

The use of asynchronous electric drive on modern ships is due to its high reliability, ease of use, high economic performance. At the same time, a relatively low starting torque and a significant starting current makes it difficult to use it in ship's power systems and mechanisms. The most suitable for these drives are asynchronous engines with improved start characteristics, which can be divided into two groups: engines based on the effect of squeezing the current into the groove of the rotor and engines based on the ferromagnetic rotor. In the first group it is possible to allocate deep-and-double engines and engines with a double whitening cage, widely used in lifting ship mechanisms. The second group includes engines with ferromagnetic rotors: with a massive, massive membrane and a two-layer rotor. Among the latter one can distinguish engines with a two-layer rotor, which successfully combine high starting characteristics (high torque and relatively low multiplicity of starting current) and good performance in the part of efficiency and power factor, characteristic of asynchronous motors with a short-circuited cell. The proposed method of calculating the parameters of engines with a two-layer rotor allows to optimize the thickness of each of the rotor's layers, to calculate the starting and performance characteristics.

Keywords: two-layer rotor, skin effect, starting torque, starting current, slip.