

## АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИВОДОВ СУДОВЫХ ПОДЪЕМНЫХ МЕХАНИЗМОВ

**Голощанов С. С., к.т.н., доцент кафедры експлуатації суднового електрообладнання та засобів автоматики Херсонської державної морської академії, e-mail: goloscharov46@gmail.com**

*Асинхронные машины используются в основном как двигатели. Благодаря повышенной надежности и простоте конструкции они широко применяются в промышленности и на судах морского флота, являясь основными потребителями электрической энергии. Несмотря на указанные преимущества, им присущи и недостатки, из которых наиболее существенными являются плохая регулируемость и малоудовлетворительные пусковые характеристики. И, если при использовании современной силовой электронной базы удастся создать привода с высокими регулировочными показателями, то относительно небольшой пусковой момент и весьма значительные пусковые токи являются серьезным препятствием для применения асинхронного привода в подъемных механизмах из-за ограниченной мощности судовой электростанции. Для получения удовлетворительных пусковых характеристик в основном, используются электропривода на основе глубокопазных и двухклеточных двигателей, однако они обладают относительно невысокими пусковыми моментами и значительными пусковыми токами, что обуславливает довольно большие и относительно длительные провалы бортового напряжения. Альтернативой таким двигателям может служить двигатель на основе массивного ферромагнитного ротора, обладающий значительным пусковым моментом при относительно малой кратности пускового тока. Анализ электромагнитных процессов такого двигателя показывает, что внутренняя часть ротора участия в создании вращающего момента не принимает, поэтому его целесообразно изготавливать в виде полого толстостенного ферромагнитного стакана. Компромиссным вариантом двигателя, обладающего повышенными пусковыми при неплохих рабочих характеристиках может служить двигатель с двухслойным ротором, представляющим собой классическую беличью клетку с насаженным на нее массивным ферромагнитным цилиндром, в котором пусковые характеристики определяются, в основном, ферромагнитным цилиндром, а рабочие – параметрами беличьей клетки. В статье уточняется методика определения динамического момента и на ее основе времени пуска двигателя а также приводится попытка оптимизации выбора толщины стенки ферромагнитного ротора в зависимости от возлагаемых на него требований в части пусковых и рабочих характеристик.*

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, ферромагнитный ротор, пусковой момент, пусковой ток, момент инерции, электромагнитное поле.

**DOI: 10.33815/2313-4763.2020.2.23.119-125**

**Вступление.** Трехфазные асинхронные машины с короткозамкнутым ротором составляют основу современного промышленного и судового электропривода. Отсутствие скользящих контактов, удобство обслуживания, надежность в эксплуатации, высокие технико-экономические показатели делают их незаменимыми в электроприводах судовых грузоподъемных механизмов, якорно-швартовых, рулевых и подруливающих устройствах [1, 2, 6].

**Актуальность.** В то же время следует отметить и недостатки таких двигателей, из которых наиболее существенными являются малоудовлетворительные регулировочные и пусковые характеристики [3, 8, 12, 13]. Поэтому актуальным является совершенствование их конструкций с целью получения, в частности, улучшенных пусковых характеристик.

Расчетный анализ показывает, что традиционные двигатели, имеющие характеристику вида рис.1, имеют относительно небольшой динамический момент, что обуславливает недопустимо большое время разгона привода. При этом двигатель при разгоне до скорости 75-90% от номинальной потребляет ток на уровне пускового, обуславливая относительно длительные провалы бортового напряжения [6, 7, 9].

Поэтому, как правило, в подъемных механизмах применяют глубокопазные или двухклеточные двигатели, обладающие повышенным пусковым моментом и относительно небольшим пусковым током. Однако и применение указанных типов двигателей полностью не решает указанных проблем, что диктует необходимость приема альтернативных решений [4, 5, 10, 11].

**Целью статьи** является совершенствование анализа динамических параметров приводов судовых подъемных механизмов для обеспечения возможно максимальной производительности при погрузочно-разгрузочных работах и уменьшения влияния пусковых режимов приводов на качество бортового напряжения судна.

**Основная часть.** Значительный парк асинхронных двигателей (АД) составляют судовые грузоподъемные механизмы, производительность которых, помимо скорости подъема или опускания груза, определяется также временем пуска двигателя. По литературным данным [1, 2] время пуска определяется как разница величин пускового момента  $M_{пуск}$  двигателя и момента сопротивления  $M_c$ . При этом не принимается во внимание конфигурация кривой момента двигателя, что приводит к существенной ошибке. Ниже приводится методика определения времени разгона привода при произвольной форме кривой момента.

В общем случае уравнение движения привода:

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt},$$

где  $M$  – двигательный момент,  $M_c$  – момент сопротивления,  $J$  – приведенный к двигателю момент инерции механизма, включая и момент инерции ротора,  $\omega$  – скорость ротора,  $t$  – время.

Решая его, определяем время разгона (пуска) двигателя:

$$t_n = J \int_0^{\omega_{ном}} \frac{1}{M - M_c} d\omega.$$

учитывая, что угловая скорость  $\omega$  и скольжение  $s$  связаны соотношением  $\omega = \omega_0(1-s)$ ,  $d\omega = -\omega_0 ds$ ; здесь  $\omega_0$  – скорость поля, постоянная величина.

Тогда время разгона определится как:

$$t_n = J \int_1^{s_{ном}} \frac{\omega_0}{M - M_c} ds = J \omega_0 \cdot \frac{1}{S_{M-M_c}} \Big|_1^{s_{ном}},$$

где  $S_{M-M_c} \Big|_1^{s_{ном}} = M_{дин}$  – динамический момент, или площадь, заключенная под разностью кривых  $M$  и  $M_c$ .

С учетом этого время разгона определится как:

$$t_n = k_{mp} J \omega_0 \cdot \frac{1}{M_{дин}},$$

где  $k_{mp} = 1,1 \div 1,3$  – коэффициент, учитывающий момент инерции трансмиссии.

Кривая  $M = f(s)$  носит резко нелинейный характер, зачастую имея явно выраженный максимум. На этой кривой всегда можно определить четыре точки:

1. Режим идеального холостого хода:  $M = 0$ ,  $s = 0$ ;
2. Номинальный режим:  $M = M_{ном}$ ,  $s = s_{ном}$ ;
3. Режим максимального момента (критическая точка):  $M = M_{макс}$ ,  $s = s_{кр}$ ;
4. Пусковой режим:  $M = M_{пуск}$ ,  $s = 1$ .

Все эти точки определяются по паспортным данным двигателя и по каталогу; величину  $s_{кр}$  можно вычислить по формуле  $s_{кр} = s_n \cdot (k_m + \sqrt{k_m^2 - 1})$ ,  $k_m = M_{макс} / M_{ном}$ .

С достаточной степенью точности кривую  $M = f(s)$  можно заменить кусочно-ломаной прямой, проходящей через четыре указанные точки, как показано на рис. 1.

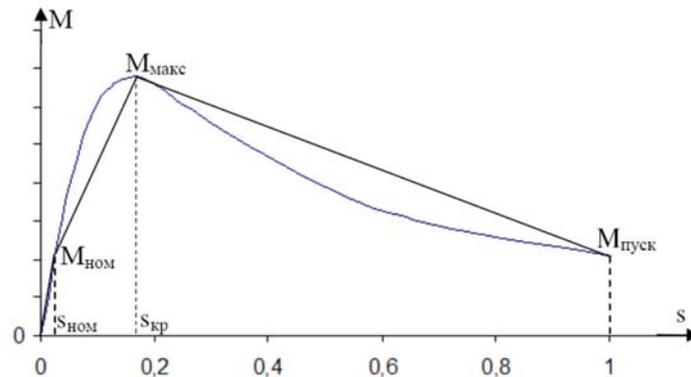


Рисунок 1 – Кусочно-линейная аппроксимация кривой момента  $M = f(s)$

Площадь, заключенная под кривой  $M = f(s)$  на участке  $s=1$  до  $s=s_{ном}$  определится как:

$$M \approx \frac{M_{пуск} + M_{макс}}{2} \cdot (1 - s_{кр}) + \frac{M_{макс} + M_{ном}}{2} \cdot (s_{кр} - s_{ном}).$$

Если же кривая  $M = f(s)$  имеет монотонный вид, что имеет место в двигателях с массивными ферромагнитными роторами (рис. 2), то площадь под кривой будет равна

$$M \approx \frac{M_{пуск} + M_1}{2} \cdot (1 - s_1) + \frac{M_1 + M_{ном}}{2} \cdot (s_1 - s_{ном}).$$

При этом выбор координат точки  $(M_1, s_1)$  не критичен:  $s_1 = 0,15 \div 0,3$ .

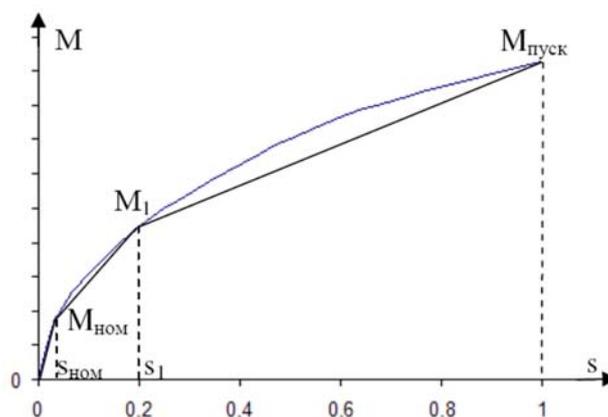


Рисунок 2 – Кусочно-линейная аппроксимация кривой, имеющей  $M = f(s)$  монотонный характер

Альтернативой таким двигателям может служить двигатель с массивным ферромагнитным ротором, который имеет механическую характеристику, представленную на рис. 2. Омеднение ротора способствует повышению его рабочего и пускового моментов [4]. Также для улучшения рабочих характеристик двигателя возможно

применение двухслойного ротора, когда на обычный ротор с беличьей клеткой насажена массивная ферромагнитная гильза.

Анализ электромагнитных процессов, происходящих в массивном ферромагнитном роторе [5, 17], позволяет определить глубину проникновения электромагнитного поля в тело ротора на частоте 50 Гц и прийти к заключению, что поле вглубь ротора при пуске проникает всего лишь на 1–3 мм, имея максимальное значение на поверхности и убывая по экспоненциальному закону. При этом под глубиной проникновения понимается глубина, на которой поле уменьшается в  $e$  раз по сравнению с полем на поверхности.

Также глубина проникновения зависит от частоты  $f$  и пропорциональна  $1/\sqrt{f}$  [5]. Исходя из этого, при скольжении  $s = 0,05$  частота поля в роторе равна 2,5 Гц, а глубина проникновения составит примерно 4,5–13,5 мм. Поэтому можно сделать вывод, что внутреннее тело ротора в электромагнитном процессе участия не принимает, что позволяет его исключить, облегчив сам ротор и снизив, таким образом, момент инерции ротора, что уменьшает время его разгона. А, поскольку, поле внутри ротора отсутствует, нет необходимости во внутреннем ферромагнитном статоре, который обычно присутствует в двигателях с полым ротором. При этом сам ротор конструктивно может представлять собой полый толстостенный ферромагнитный стакан.

Примем глубину проникновения поля  $\Delta_{c50} = 2$  мм на частоте 50 Гц, тогда на частоте 2,5 Гц  $\Delta_{c2,5} = \Delta_{c50} \sqrt{\frac{50}{2,5}} = 8,94$  мм. Рассчитаем долю поля, создающего момент в ферромагнитном стакане, в зависимости от толщины последнего при пуске ( $s=1$ ) и при  $s=0,05$

Таблица 1 – Пусковых характеристики толщины тела ротора

Толщина тела ротора, мм		2	6	8,94	10	14	18
Величина поля, создающего момент, д.е.	при $s=1$	0,63	0,95	0,99	0,99	1	1
	при $s=0,05$	0,2	0,49	0,63	0,67	0,79	0,87

Из приведенной таблицы видно, что для получения хороших пусковых характеристик толщина тела ротора может не превышать 6 мм. Если же, кроме хороших пусковых необходимо получить и удовлетворительные тяговые характеристики, толщину стенки ротора необходимо увеличить примерно вдвое.

Важной особенностью двигателей с массивным ферромагнитным ротором, выполненном в виде толстостенного стакана является малый момент инерции, уменьшение которого вызывает пропорциональное уменьшение времени разгона двигателя при старте, что особенно важно при его применении в судовых подъемных механизмах. Как правило, асинхронные двигатели подъемных механизмов выполняются с увеличенным соотношением длины ротора к его диаметру, что снижает момент инерции ротора.

Если спроектировать двигатель на основе статора мощностью 30 кВт, то при соотношении длина-диаметр ротора 2:1 и обычных электромагнитных нагрузках длина его ротора будет равна около 30 см при диаметре 15 см. Масса ротора с беличьей клеткой будет равна:

$$m = \frac{\pi D^2}{4} l d = \frac{\pi \cdot 15^2}{4} \cdot 30 \cdot 7,8 \cdot 10^{-3} = 41,35 \text{ кг,}$$

где  $D = 15$  см – диаметр ротора,  $l = 30$  см – его длина,  $d = 7,8$  г/см<sup>3</sup> – удельный вес стали.

Момент инерции  $J$  такого ротора равен

$$J = m \frac{D^2}{8} = 41,35 \cdot \frac{15^2}{8} \cdot 10^{-4} = 0,116 \text{ кгм}^2.$$

В случае массивного ферромагнитного полого ротора с толщиной стенки 6 мм его масса будет равна 6,35 кг, а момент инерции – 0,033 кгм<sup>2</sup>. При толщине стенки 12 мм масса составит 12,2 кг, момент инерции – 0,0584 кгм<sup>2</sup>. Таким образом, только за счет уменьшения момента инерции ротора время разгона двигателя может быть снижено в первом случае в 3,5 раза во втором в 2 раза.

Также, следует отметить, что массивный ротор такого двигателя обладает повышенной механической прочностью, что позволяет его использовать на сверхвысоких скоростях вращения (десятки и сотни тысяч оборотов в минуту).

Основной же особенностью двигателя с массивным ротором является его повышенный пусковой момент при одновременном снижении пускового тока, что особенно важно при ограниченной мощности судовой электростанции.

Для подъемных механизмов на судах применяются двигатели с двойной беличьей клеткой, которые также имеют повышенный пусковой момент при относительно небольшой кратности пускового тока. Однако, если в двигателях с двойной клеткой кратность пускового момента достигает 2,5–3 при кратности пускового тока 5–6, то в двигателях с массивным ротором этот параметр можно довести до уровня 4–5, при кратности тока 4–5, что также положительно сказывается на пусковых характеристиках.

Таким образом, применение указанных двигателей в судовых подъемных механизмах позволяет значительно улучшить их динамические параметры при одновременном снижении бросков нагрузки в питающей сети как по величине, так и по длительности.

**Выводы.** Приведенный расчет динамического момента позволяет уточнить определение времени разгона асинхронного электропривода с произвольной формой кривой момента, что дает возможность оптимизировать вид механической характеристики. Применение асинхронного двигателя с массивным полым ротором в судовых подъемных механизмах позволит улучшить не только электромагнитные параметры двигателя, снизив кратность пускового тока и повысив пусковой момент, что сокращает время разгона привода, уменьшает провалы напряжения бортовой сети и их длительность, но и механические характеристики – момент инерции ротора, что также способствует уменьшению времени разгона и его длительности и снижает материалоемкость и вес двигателя. Представленная методика расчета может быть принята за основу и при анализе параметров двигателя с двухслойным ротором, сочетающем в себе высокие динамические и рабочие показатели.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чекунов К. А. Судовые электроприводы и электродвижение судов. Ленинград : Судостроение, 1989. 464 с.
2. Савенко А. Е. Судовые электроприводы : учеб. пособие. Керчь : ФГБОУВО «Керченский государственный морской технологический университет», 2019. 220 с.
3. Hughes A., Drury B. Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications. Newnes, 2013. 440 p.
4. Ищенко И. М., Голощاپов С.С. Расчет асинхронного двигателя с омедненным массивным ферромагнитным ротором. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії : науковий журнал*. Херсон : Херсонська державна морська академія, 2017. № 1 (16). С. 121–125.
5. Куцевалов В. М. Вопросы теории и расчета асинхронных машин с массивными роторами. Москва – Ленинград : Энергия, 1966. 304 с

6. Мезин Е. К. Судовые электрические машины : учебник. Ленинград : Судостроение, 1985. 320 с.
7. Олейников А. М., Мартынов В. Н. Судовые электрические машины. Севастополь: СевНТУ, 2010. 316 с.
8. Кацман М. М. Электрические машины : учебник Москва : Изд. Центр «Академия», 2013. 496 с.
9. Вольдек А. И., Попов В. В. Электрические машины. Машины переменного тока. Санкт Петербург : Питер, 2008. 350 с.
10. Гольдберг О. Д., Свириденко И. С. Проектирование электрических машин. Москва : Высш. шк., 2006. 430 с.
11. Копылов И. П., Клоков Б. К., Морозкин В. П., Токарев Б. Ф. Проектирование электрических машин. Москва : Издательство Юрайт, 2011. 767 с.
12. Bird J. Electrical circuit theory and technology. Elsevier, 2002. 984 p.
13. Hall D. T. Practical marine electrical knowledge. London, Witherby & Co Ltd, 1999. 132 p.
14. Постников И. М. Проектирование электрических машин. Киев : Гос. изд-во техн. л-ры, 1960. 910 с.

## REFERENCES

1. Chekunov K. A. (1989). *Sudovihe ehlektroprivodih i ehlektrodvizhenie sudov*. Leningrad : Sudostroenie.
2. Savenko A. E. (2019). *Sudovihe ehlektroprivodih : ucheb. posobie*. Kerchj : FGBOUVO «Kerchenskiyj gosudarstvenniyj morskoyj tekhnologicheskijj universitet.
3. Hughes A., Drury B. (2013). *Electric Motors and Drives: Fundamentals Types and Applications* Newnes.
4. Ithenko I. M., Golothapov S. S. (2017). Raschet asinkhronnogo dvigatelya s omednennim massivnim ferromagnitnim rotorom. *Naukoviyj visnik Khersonskoi derzhavnoi morskoi akademii : naukoviyj zhurnal*. Kherson : Khersonska derzhavna morskja akademiya, 1 (16), 121–125.
5. Kucevalov V. M. (1966). *Voprosih teorii i rascheta asinkhronnikh mashin s massivnimi rotorami*. Moskva – Leningrad : Ehnergiya.
6. Mezin E. K. (1985). *Sudovihe ehlektricheskie mashinih : uchebnik*. Leningrad : Sudostroenie.
7. Oleynikov A. M., Martihnov V. N. (2010). *Sudovihe ehlektricheskie mashinih*. Sevastopol j: SevNTU.
8. Kacman M. M. (2013). *Ehlekttricheskie mashinih : uchebnik*. Moskva : Izd. Centr «Akademiya».
9. Voljdek A. I., Popov V. V. (2008). *Ehlekttricheskie mashinih. Mashinih peremennogo toka*. Sankt Peterburg : Piter.
10. Goljdberg O. D., Sviridenko I. S. *Proektirovanie ehlektricheskikh mashin*. Moskva : Vihssh. shk., 2006. 430 s.
11. Kopihlov I. P., Klovok B. K., Morozkin V. P. & Tokarev B. F. (2011). *Proektirovanie ehlektricheskikh mashin*. Moskva : Izdatel'jstvo Yurayjt.
12. Bird J. (2002). *Electrical circuit theory and technology*. Elsevier.
13. Hall D. T. (1999). *Practical marine electrical knowledge*. London, Witherby & Co Ltd.
14. Postnikov I. M. (1960). *Proektirovanie ehlektricheskikh mashin*. Kiev : Gos. izd-vo tekhn. l-rih.

**Голощанов С. С. АНАЛІЗ ДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРИВОДІВ СУДНОВИХ ПІДЙОМНИХ МЕХАНІЗМІВ**

*Асинхронні машини використовуються в основному як двигуни. Завдяки підвищеній надійності і простоті конструкції вони широко застосовуються в промисловості і на судах морського флоту, будучи основними споживачами електричної енергії. Незважаючи на зазначені переваги, їм притаманні і недоліки, з яких найбільш істотними є погана керованість і замалозадовільні пускові характеристики. І, якщо при використанні сучасної силової електронної бази вдається створити приводи з високими регульовальними показниками, то відносно невеликий пусковий момент і вельми значні пускові струми є серйозною перешкодою для застосування асинхронного приводу в підйомних механізмах через обмежену потужність суднової електростанції. Для отримання задовільних пускових характеристик в основному, використовуються електроприводи на основі глибокопазного і двоклітинного двигунів, однак вони мають відносно невисокі пускові моменти і значні пускові струми, що обумовлює досить великі і відносно тривалі провали бортової напруги. Альтернативою таким двигунам може служити двигун на основі масивного феромагнітного ротора, що володіє значним пусковим моментом при відносно малій кратності пускового струму. Аналіз електромагнітних процесів такого двигуна показує, що внутрішня частина ротора участі в створенні крутного моменту не приймає, тому його доцільно виготовляти у вигляді порожньої товстостінної феромагнітної склянки. Компромісним варіантом двигуна, який володіє підвищеними пусковими при непоганих робочих характеристиках може служити двигун з двошаровим ротором, що являє собою класичну білячу клітку з насадженим на неї масивним феромагнітним циліндром, в якому пускові характеристики визначаються, в основному, феромагнітним циліндром, а робочі - параметрами білячої клітини. У статті уточнюється методика визначення динамічного моменту і на її основі час пуску двигуна а також наводиться спроба оптимізації вибору товщини стінки феромагнітного ротора в залежності від покладених на нього вимог в частині пускових і робочих характеристик.*

**Ключові слова:** асинхронний двигун, феромагнітний ротор, пусковий момент, пусковий струм, момент інерції, електромагнітне поле.

**Goloschapov S. S. ANALYSIS OF DYNAMIC PARAMETERS OF SHIP LIFTING MECHANISMS**

*Asynchronous machines are used primarily as motors. Due to their increased reliability and simplicity of design, they are widely used in industry and on ships of the marine fleet, being the main consumers of electrical energy. Despite these advantages, they also have disadvantages, of which the most significant are poor controllability and poor starting characteristics. And, if using a modern power electronic base it is possible to create drives with high control parameters, then a relatively small starting torque and very significant starting currents are a serious obstacle to the use of an asynchronous drive in lifting mechanisms due to the limited capacity of the ship power plant. To obtain satisfactory starting characteristics, electric drives are mainly used on the basis of deep-pit and two-cell engines, however, they have relatively low starting torques and significant starting currents, which causes rather large and relatively long dips in the onboard voltage. An alternative to such motors can be a motor based on a massive ferromagnetic rotor, which has a significant starting torque at a relatively small multiplicity of the starting current. Analysis of the electromagnetic processes of such an engine shows that the inner part of the rotor does not take part in the creation of the torque, therefore it is advisable to manufacture it in the form of a thick-walled hollow ferromagnetic glass. An engine with a double-layer rotor, which is a classic squirrel cage with a massive ferromagnetic cylinder mounted on it, in which starting characteristics are determined mainly by a ferromagnetic cylinder, and the operating characteristics - by the parameters of a squirrel cage, can serve as a compromise version of an engine with increased starting characteristics with good performance characteristics. The article clarifies the method for determining the dynamic torque and, on its basis, the engine start-up time, as well as an attempt to optimize the choice of the wall thickness of the ferromagnetic rotor, depending on the requirements imposed on it in terms of starting and operating characteristics.*

**Keywords:** induction motor, ferromagnetic rotor, starting torque, starting current, moment of inertia, electromagnetic field.

© Голощанов С. С.

Статтю прийнято  
до редакції 16.10.20