

## ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ДЛЯ СУДОВЫХ ЯКОРНО-ШВАРТОВНЫХ МЕХАНИЗМОВ

**С.В. Попов**

ORCID: **0009-0004-5274-2783** e-mail: **popovsev3@ya.ru**  
Волжский государственный университет водного транспорта  
*Нижний Новгород, Россия*

**О.А. Бурмакин**

ORCID: **0009-0003-4405-7674** e-mail: **boa\_71@mail.ru**  
Волжский государственный университет водного транспорта  
*Нижний Новгород, Россия*

**Ю.С. Малышев**

ORCID: **0000-0001-9008-1198** e-mail: **elektrikasp@mail.ru**  
Волжский государственный университет водного транспорта  
*Нижний Новгород, Россия*

Статья посвящена решению задач, возникающих при модернизации судовых электроприводов якорно-швартовых механизмов (ЯШМ), рассмотрена возможность замены сложного дорогостоящего электродвигателя на электродвигатель более простой конструкции. Проведен сравнительный анализ систем регулирования многообмоточными электродвигателями и системы преобразователь частоты-асинхронный двигатель. Представлены результаты анализа работы электропривода судовой лебедки, выполненного на базе многоскоростного электродвигателя. Рассмотрена возможность его работы на одной обмотке в различных режимах от частотного преобразователя. Предложен вариант замены многообмоточного электродвигателя на электродвигатель морского исполнения с одной обмоткой и проведен сравнительный анализ при их работе в составе электропривода лебедки. Рассмотрено применение однозонного и двухзонного регулирования скорости электродвигателя с целью получения необходимых характеристик электропривода, а именно, моментов и скоростей вращения при работе лебедки в различных режимах. Проанализирована возможность осуществления режима стоянки электродвигателя под током в системе преобразователь частоты — асинхронный двигатель в соответствии с требованиями Российского классификационного общества, а также приведено математическое обоснование. Даны рекомендации по выбору частотного электропривода с точки зрения тепловых режимов при двухзонном регулировании скорости и в режиме заторможенного ротора. Показаны результаты сравнительного анализа массогабаритных и стоимостных показателей электродвигателей различных исполнений, которые могут быть использованы для выбора оптимальных параметров электропривода в

зависимости от мощности электродвигателя. Выявлена зависимость целесообразности применения электродвигателей стандартного общепромышленного назначения при изменении диапазона регулирования скорости и момента нагрузки на валу. Обосновано применение системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель в электроприводах якорно-швартовых лебедок. Проведена предварительная оценка работы частотного электропривода лебедки на предмет срока его эксплуатации. Сделаны выводы о практической ценности результатов исследования, которые могут быть использованы как при модернизации, так и при проектировании электроприводов лебедочных механизмов.

**Ключевые слова:** многоскоростной электропривод, частотное управление, двухзонное регулирование, многообмоточный электродвигатель, система регулирования, регулируемый электропривод, стоянка под током, якорно-швартовая лебедка, электродвигатель судового исполнения, электродвигатель общепромышленного назначения.

**Для цитирования:** Попов С. В., Бурмакин О. А., Малышев Ю. С., Обоснование применения частотных электроприводов для судовых якорно-швартовых механизмов // Интеллектуальная Электротехника. 2024. № 3. С. 32-49. EDN: YKBJUG

## JUSTIFICATION OF THE USE OF FREQUENCY ELECTRIC DRIVES FOR SHIP ANCHOR AND MOORING MECHANISMS

**S.V. Popov**

ORCID: **0009-0004-5274-2783** e-mail: **popovsev3@ya.ru**

Volga State University of Water Transport

*Nizhny Novgorod, Russia*

**O.A. Burmakin**

ORCID: **0009-0003-4405-7674** e-mail: **boa\_71@mail.ru**

Volga State University of Water Transport

*Nizhny Novgorod, Russia*

**Y.S. Malyshev**

ORCID: **0000-0001-9008-1198** e-mail: **elektrikasp@mail.ru**

Volga State University of Water Transport

*Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** The article is devoted to solving problems that arise during the modernization of ship electric drives of anchor-mooring mechanisms; the possibility of replacing a complex, expensive electric motor with an electric motor of a simpler design is considered. A comparative analysis of control systems for multi-winding electric motors and the systems of frequency converter-induction motor was carried out. The article presents the

results of an analysis of the operation of the electric drive of a ship's winch, made on the basis of a multi-speed electric motor. The possibility of its operation on one winding in various modes from a frequency converter is considered. An option has been proposed to replace a multi-winding electric motor with a marine-style electric motor with one winding and a comparative analysis has been carried out when they operate as part of an electric winch drive. The use of single-zone and two-zone electric motor speed control is considered in order to obtain the necessary characteristics of the electric drive, namely, torques and rotation speeds when the winch operates in various modes. The possibility of implementing the electric motor parking mode under current in the frequency converter - asynchronous motor system in accordance with the requirements of the Russian Classification Society is analyzed, and a mathematical justification is given. Recommendations are given when choosing a frequency electric drive from the point of view of thermal conditions with two-zone speed control and in locked rotor mode. The results of a comparative analysis of the weight, size and cost indicators of electric motors of various designs are shown, which can be used to select the optimal parameters of the electric drive depending on the power of the electric motor. The dependence of the feasibility of using electric motors of standard general industrial use when changing the speed control range and the load torque on the shaft is revealed. The use of a frequency converter-asynchronous motor system in electric drives of anchor-mooring winches is justified. A preliminary assessment of the operation of the winch's frequency electric drive was carried out regarding its service life. Conclusions are made about the practical value of the research results, which can be used both in the modernization and in the design of electric drives for winch mechanisms.

**Keywords:** multi-speed electric drive, frequency control, two-zone regulation, multi-winding electric motor, control system, adjustable electric drive, electric parking, anchor-mooring winch, marine electric motor, general industrial electric motor.

**For citation:** S.V. Popov, O.A. Burmakin and Y.S. Malyshev, "Justification of the use of frequency electric drives for ship anchor and mooring mechanisms", *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 32-49, 2024. EDN: YKBJUG

## I. Введение

Суда речного и морского флота, как правило, оснащены палубными механизмами для выполнения операций постановки судна на рейд, швартовки и т.д. Такие механизмы в большинстве случаев имеют электропривод с местным управлением, реже — с дистанционным. Основу электроприводов швартовных и якорных лебедок составляют многоскоростные электродвигатели серии МАП – многополюсные асинхронные с короткозамкнутым ротором. Они относятся к специальным, поскольку предназначены для более тяжелых режимов работы по сравнению с электродвигателями общепромышленного исполнения. Так, например, они могут использоваться на морских судах неограниченного района плавания с большой частотой включений при тяжелых условиях пуска и торможения, воздействию волн и

ветра, а также длительной стоянке под током [1-5]. В зависимости от назначения, могут применяться одно-, двух- и трехскоростные электродвигатели, обмотки статора которых собираются в различные схемы для получения необходимых механических характеристик. Как правило, такие электродвигатели оснащаются электромагнитным дисковым тормозом.

На рис. 1 показаны механические характеристики многоскоростного электродвигателя, обмотки которого собираются в три различные схемы, формирующие разное количество пар полюсов на статоре. Следовательно, электропривод имеет три скорости вращения электродвигателя и соответствующие номинальные моменты. Характеристика 2 на рис. 1 считается «тяговой», поскольку имеет самое большое значение момента ( $M_{ном2}$ ).

Электродвигатель с короткозамкнутым ротором обладает высокой надежностью, однако система управления, построенная на базе командоконтроллера с многочисленными силовыми контактами, резко снижает надежность электропривода в целом. Сложность изготовления статорной обмотки приводит к завышенной стоимости электродвигателя (в 3-5 раз относительно общепромышленных). Это же относится и к ремонтным работам, связанным с перемоткой обмоток электродвигателя.

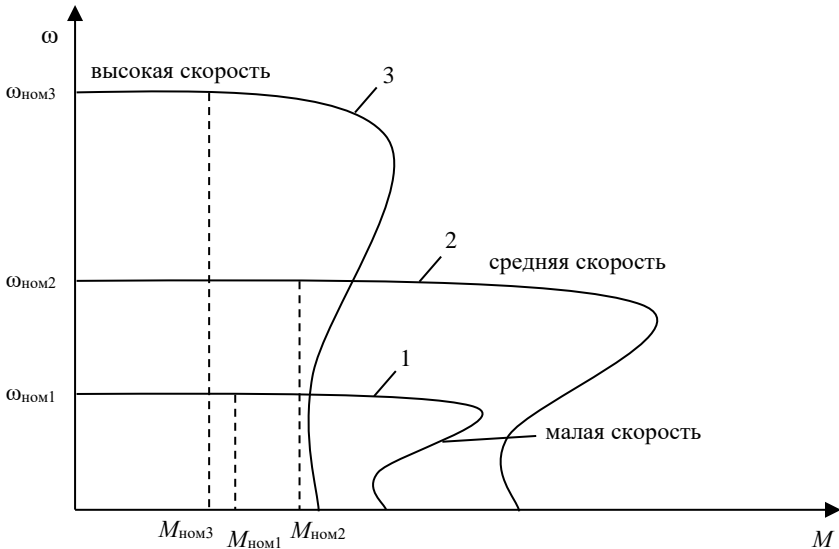


Рис. 1. Механические характеристики многоскоростного электродвигателя

Fig. 1. Mechanical characteristics of multi-speed electric motor

Основное обслуживание таких электроприводов сводится к замене силовых контактов или восстановлению их контактной поверхности. Главным недостатком описанного электропривода является прямой пуск электродвигателя и ступенчатый переход от одной скорости на другую, что приводит к броскам тока, а, следовательно, оказывает отрицательное влияние на судовую сеть.

## II. Методы и материалы

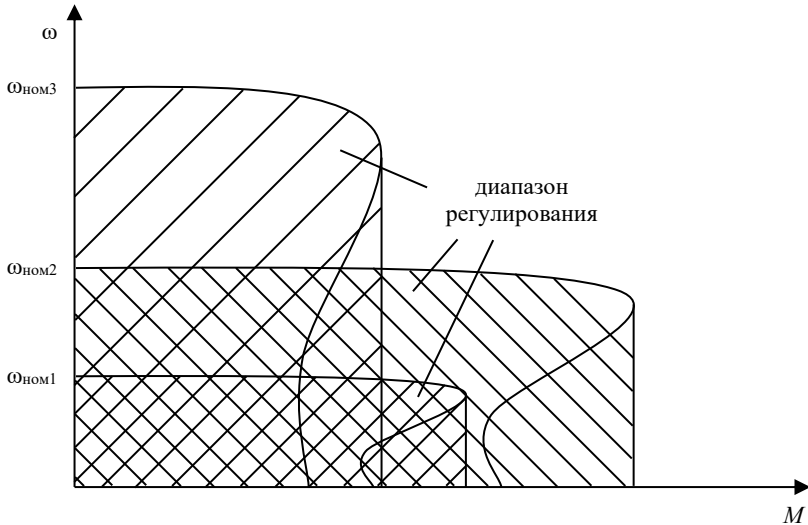
В последнее время среди электроприводов переменного трехфазного тока распространение получил электропривод на базе асинхронного двигателя с частотным преобразователем (ПЧ-АД) [6-10]. Применительно к палубным грузоподъемным механизмам электропривод по системе ПЧ-АД позволит решить несколько задач:

- реализовать плавный разгон и торможение механизма;
- снизить влияние на судовую сеть;
- сократить число коммутационных аппаратов;
- упростить систему управления и обеспечить более простое дистанционное управление;
- внедрить дополнительные функции по защите, контролю и диагностики системы.

Поскольку электродвигатель составляет значительную часть цены палубного механизма, целесообразна модернизация системы управления классического электропривода в сторону частотного с сохранением существующего электродвигателя. Исходя из этого, необходимо выбрать одну обмотку многоскоростного электродвигателя, которая будет рабочей и подключена к ПЧ.

На рис. 2 показаны механические характеристики трех обмоток электродвигателя серии МАП (рис. 1) и зоны регулирования при их отдельной работе от ПЧ. Очевидно, что работа электродвигателя на обмотках статора с характеристиками 1 и 3 не обеспечивает необходимый тяговый момент, который обеспечит обмотка с характеристикой 2. Однако номинальная скорость  $\omega_{ном2}$  характеристики 2 в два раза ниже номинальной скорости  $\omega_{ном3}$  характеристики 3.

Применение частотного электропривода позволяет регулировать частоту напряжения на статоре выше 50 Гц, что может привести к раскручиванию ротора электродвигателя выше синхронной скорости. Недостаток такого способа заключается в снижении момента электродвигателя с ростом частоты напряжения. В этом случае граничная характеристика двухзонного регулирования скорости частотного электропривода будет иметь вид, показанный на рис. 3. Максимальная скорость  $\omega_{макс}$ , которая может быть получена для многоскоростного электродвигателя, ограничена допустимой рабочей скоростью подшипников и жесткостью конструкции ротора [7, 11].



**Рис. 2. Механические характеристики и диапазон при частотном регулировании для разных обмоток многоскоростного электродвигателя**

**Fig. 2. Mechanical characteristics and frequency control range for different windings of a multi-speed electric motor**

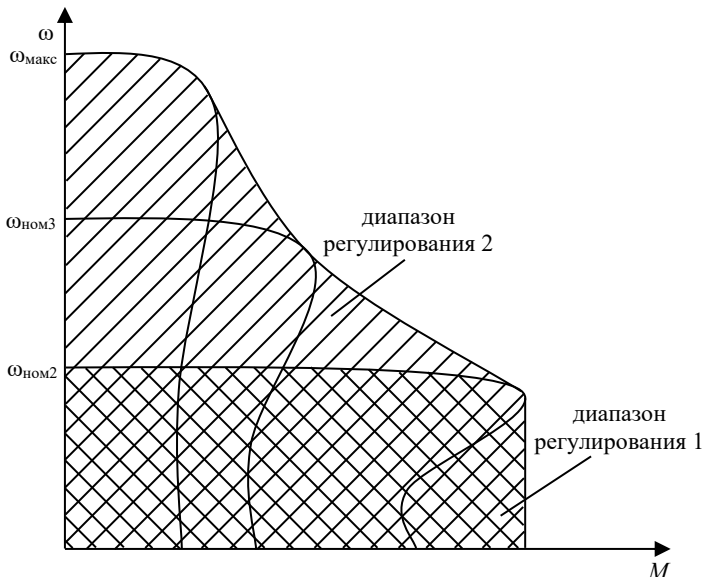
Основным недостатком такого варианта электропривода является завышенные массогабаритные показатели электродвигателя серии МАП. Более перспективным вариантом будет электропривод, построенный на базе односкоростного электродвигателя в морском исполнении (ОЭД) и частотного преобразователя. При работе электропривода в диапазоне от 0 до 50 Гц для получения номинальной скорости  $\omega_{ном3}$  механической характеристики 3 необходимо повысить мощность электродвигателя. Это следует из:

$$P_{\text{ОЭД}} = M_{\text{ном2}} \cdot \omega_{\text{ном3}}, \quad (1)$$

где  $P_{\text{ОЭД}}$  – мощность односкоростного электродвигателя морского исполнения,  $M_{\text{ном2}}$  – номинальный момент двигателя при работе на обмотке средней скорости электродвигателя серии МАП,  $\omega_{\text{ном3}}$  – номинальная скорость вращения электродвигателя при работе на обмотке высокой скорости электродвигателя серии МАП.

Поскольку максимальная мощность многоскоростного электродвигателя  $P_{\text{мап2}}$  определяется при работе на обмотке средней скорости  $\omega_{\text{ном2}}$ :

$$P_{\text{мап2}} = M_{\text{ном2}} \cdot \omega_{\text{ном2}}, \quad (2)$$



**Рис. 3. Механические характеристики и диапазоны при двухзонном частотном регулировании для одной обмотки (средней скорости) электродвигателя**

**Fig. 3. Mechanical characteristics and ranges for two-zone frequency regulation for one winding (average speed) of an electric motor**

тогда кратность увеличения мощности односкоростного электродвигателя будет определяться из соотношения:

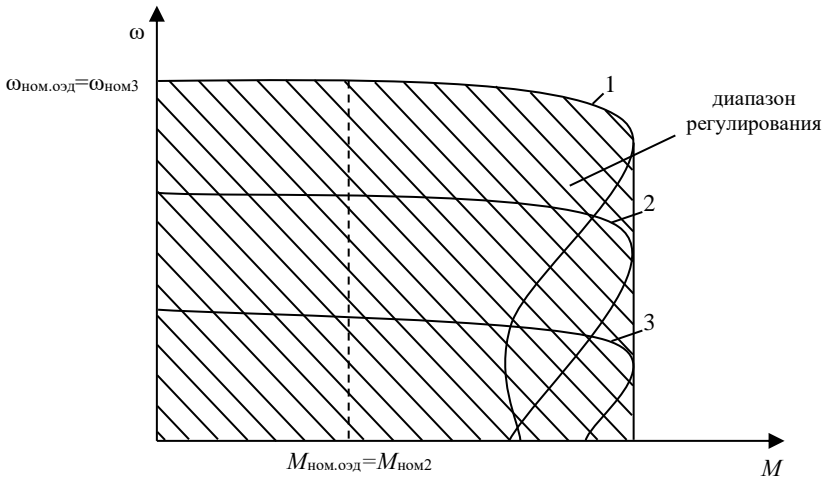
$$P_{\text{оэд}} / P_{\text{мап2}} = \omega_{\text{ном3}} / \omega_{\text{ном2}} \quad (\text{при } M_{\text{ном.оэд}} = M_{\text{ном2}}), \quad (3)$$

где  $M_{\text{ном.оэд}}$  – номинальный момент односкоростного электродвигателя.

Естественная механическая характеристика 1 и диапазон регулирования электродвигателя повышенной мощности показаны на рис. 4. Искусственные характеристики 2 и 3 получены при регулировании по закону частотного управления  $U/f = \text{const}$ .

Сократить стоимость и снизить массогабаритные показатели позволяет применение электродвигателя, предназначенного для работы от ПЧ (АДЧР). Электродвигатели типа АДЧР увеличивают скорость вращения за счет повышения частоты питающего напряжения при постоянстве напряжения равного номинальному. Они выполняются с усиленной изоляцией обмоток и имеют лучшие энергетические характеристики по сравнению с об-

щепромышленными [7, 11]. На рис. 5 показаны механические характеристики электродвигателя, где максимальный момент обеспечивается в первой зоне регулирования на естественной характеристике (50 Гц), а повышенная скорость (до 100 Гц) при снижении критического момента. Следует отметить, что в таком случае достигается скорость вращения вдвое выше номинальной. По данным производителей электродвигателей [7, 11], для электрических машин с установленными стандартными подшипниками скорость вращения может достигать 3000 об/мин. Кроме того, двухзонное регулирование позволит использовать электродвигатель меньшей мощности по сравнению с однозонным, поскольку работа электроприводов ЯШМ на повышенных скоростях осуществляется с моментами ниже номинального.



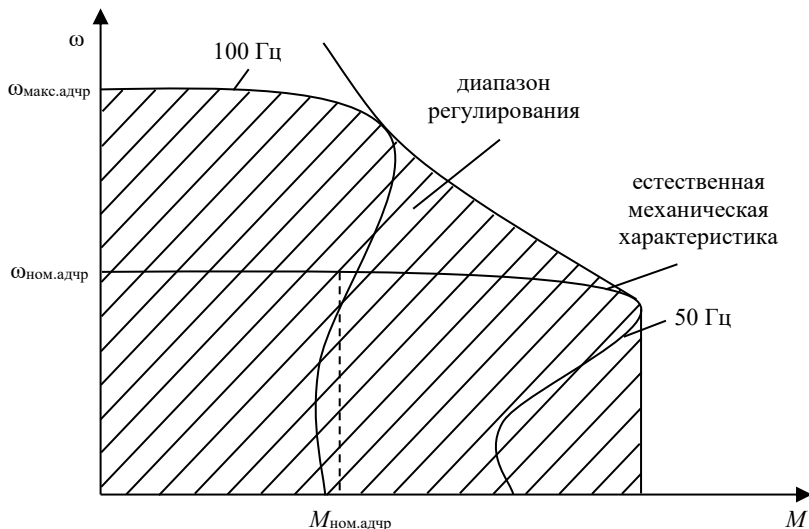
**Рис. 4. Механические характеристики односкоростного электродвигателя морского исполнения повышенной мощности**

**Fig. 4. Mechanical characteristics of a high-power marine single-speed electric motor**

Отличительной особенностью работы якорно-швартовных механизмов является режим стоянки под током. При заторможенном роторе, номинальных частоте сети и напряжении по обмоткам статора будет протекать пусковой ток (в 6-8 раз выше номинального значения), а на валу создаваться пусковой момент (в 2,2-2,4 раза выше номинального значения). В соответствии с правилами Российского Классификационного Общества электроприводы якорно-швартовных устройств должны обеспечивать режим стоянки с пусковым моментом в течение не менее 30 сек. Если многоскорост-



ные электродвигатели серии МАП изготавливаются с учетом таких тепловых режимов, то электродвигатели стандартного исполнения не могут обеспечить такой режим работы в течение продолжительного времени. Следовательно, в случае необходимости обеспечения режима стоянки под током необходимо завязать мощность электродвигателя.



**Рис. 5. Механические характеристики электродвигателя типа АДЧР при двухзонном регулировании**

**Fig. 5. Mechanical characteristics of an ADFR type electric motor with two-zone regulation**

Для определения оптимальной мощности электродвигателя стандартного исполнения необходимо выполнить тепловой расчет, который обеспечит работу в режиме стоянки под током.

### III. Результаты

Стандартные электродвигатели способны работать в режиме перегрузки определенное время в зависимости от кратности тока перегрузки  $I_{\text{пер}}$ . Примерный вид такой времятоковой характеристики, составленной по данным заводов изготовителей электродвигателей, представлен на рис. 6 [1, 2, 12].

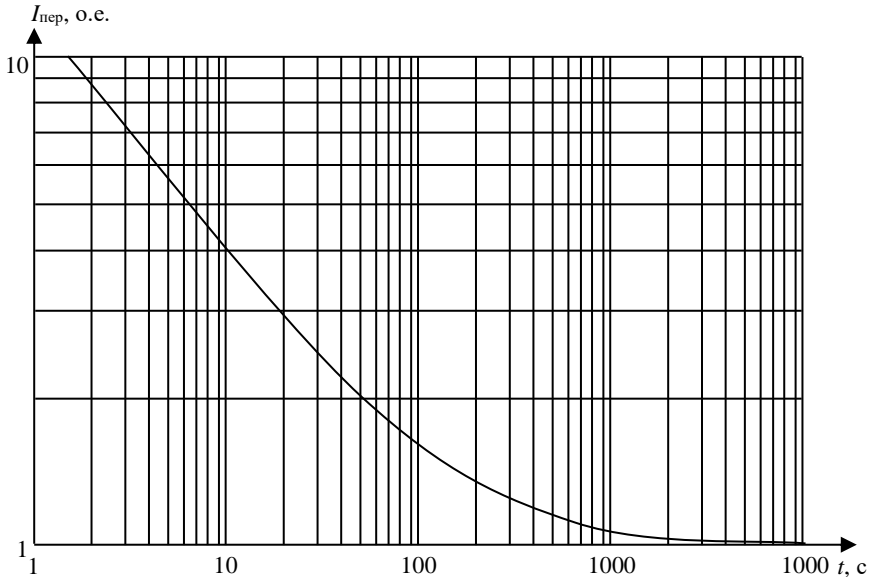
Исходя из характеристики при прямом пуске ( $I_{\text{пер}} = 7 I_{\text{ном}}$ ), допустимое время работы в режиме стоянки под током электродвигателя стандартного исполнения составляет 2 с. Отсюда следует, что мощность такого элек-

тродвигателя должна быть существенно завышена, а коэффициент завышения мощности электродвигателя  $K$ , при условии работы электродвигателя в режиме стоянки под током 30 с, может быть определен из соотношения:

$$7 I_{\text{НОМ}} = 2,5 (I_{\text{НОМ}} K),$$

тогда

$$K = 7 I_{\text{НОМ}} / 2,5 I_{\text{НОМ}} = 2,8.$$



**Рис. 6. Допустимая времятоковая характеристика для электродвигателей стандартного исполнения**

**Fig. 6. Permissible time-current characteristic for standard electric motors**

Если рассмотреть работу электродвигателя в режиме стоянки под током при частотном регулировании, то соотношение моментов и мощностей электродвигателей типа АДЧР будет иным. Во-первых, при пуске заторможенного электродвигателя от частотного преобразователя в режиме векторного управления возможно ограничение момента, в данном случае на уровне пускового (относительно электродвигателя серии МАП). При этом на статоре будет сформировано пониженное напряжение низкой частоты, а ток, при условии постоянства магнитного потока, будет иметь значение выше номинального.

Из теории частотно-токового управления следует, что электромагнитный момент  $M_{\text{эм}}$  асинхронного двигателя [13-15]:

$$M_{эм} = \frac{m}{2} p \frac{L_m}{L_r} \text{Im}(I_s \Psi_r), \quad (4)$$

где  $m$  – число фаз,  $p$  – число пар полюсов,  $L_m$  – взаимная индуктивность обмотки статора и ротора (индуктивность намагничивающего контура),  $L_r$  – собственная индуктивность обмотки ротора,  $I_s$  – вектор тока статора,  $\Psi_r$  – вектор потокоцепления ротора,  $\text{Im}$  – операция взятия мнимой части комплексного числа.

При условии постоянства потокоцепления  $\Psi_r = \text{const}$  принимаем  $\Psi_{rx} = \Psi_r$  и  $\Psi_{ry} = 0$ .

Ток статора  $I_s$  определяется из двух составляющих:

$$I_s = \sqrt{I_{sx}^2 + I_{sy}^2}, \quad (5)$$

где  $I_{sx}$  – составляющая тока статора по оси  $x$  (реактивная),  $I_{sy}$  – составляющая тока статора по оси  $y$  (активная).

Из соотношений асинхронного двигателя

$$\begin{cases} \Psi_{rx} = L_m I_{sx} \\ M_{эм} = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} I_{sy} \Psi_r \end{cases}, \quad (6)$$

следует, что при  $\Psi_r = \text{const}$  необходимо чтобы  $I_{sx} = \text{const}$ .

Отсюда  $M_{эм}$  будет зависеть от активной составляющей тока статора  $I_{sy}$ . Допустим, что для электродвигателя при номинальной нагрузке  $\cos\varphi=0,8$ , тогда значения составляющих тока будут распределены в относительных единицах как  $I_{sx} = 0,6$  и  $I_{sy} = 0,8$ .

Если кратность пускового момента электродвигателя серии МАП составляет  $\lambda=2,2$ , то ток статора электродвигателя, работающего от ПЧ с векторным управлением, при условии создания момента, схожего с пусковым моментом электродвигателя серии МАП, будет определяться из (5):

$$I_s = I_{ном} \sqrt{0,6^2 + (2,2 \cdot 0,8)^2} = 1,86 \cdot I_{ном}. \quad (1)$$

Из характеристики рис. 6 можно определить, что при перегрузке по току равной  $2 I_{ном}$  максимальное время работы будет составлять около 60 с, значит, требование по минимальному времени работы электропривода, в режиме стоянки под током, будет выполняться.

Во-вторых, тепловой расчет для электродвигателя производится по номинальному току с номинальной частотой вращения, что обеспечивает необходимый расход воздуха для обдува штатным вентилятором. Требуемый расход воздуха  $Q_{Тв}$  определяется из суммарной мощности потерь в электродвигателе:

$$Q_{Тв} = \frac{k \cdot \sum P}{1100 \cdot \Delta Q_{в}} \text{ [м}^3\text{/с]}, \quad (7)$$

где  $k$  – коэффициент, зависящий от высоты оси вращения электродвигателя, мм;  $\sum P$  – суммарная мощность потерь, Вт;  $\Delta Q_{в}$  – превышение температуры воздуха внутри машины над температурой окружающей среды, °С.

Поскольку в режиме стоянки под током, когда ротор заторможен, штатный вентилятор работать не будет, необходимо обеспечить внешний обдув за счет установки дополнительного вентилятора, имеющего независимое электропитание. Параметры вентилятора определяются из условия, что обеспечиваемый наружным вентилятором расход воздуха будет больше требуемого  $Q_{в} > Q_{Тв}$ .

Безусловно, требуемый расход воздуха  $Q_{Тв}$  будет зависеть от температуры окружающего воздуха и режима работы электропривода – число включений. Следует отметить, что действительный расход воздуха штатного вентилятора определяется из:

$$Q_{в} = \frac{0,6 \cdot D_a^3 \cdot n_1}{100} \text{ [м}^3\text{/с]}, \quad (8)$$

где  $D_a$  – наружный диаметр электродвигателя (стандарт), мм;  $n_1$  – синхронная скорость вращения магнитного поля статора, об/мин.

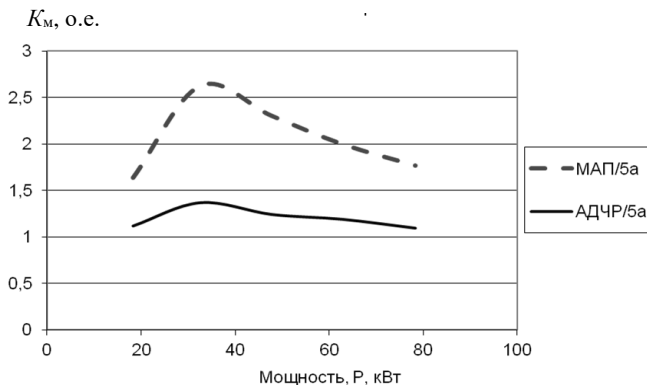
Отсюда следует, что при работе частотного электропривода на пониженных скоростях, когда частота напряжения на обмотке статора будет меньше 50 Гц, расход воздуха будет снижаться и при некотором значении скорости вращения его будет недостаточно для охлаждения [12, 15].

Однако обмотки электродвигателя могут быть изготовлены с различным классом нагревостойкости изоляции, а значит при использовании обмоток класса  $F$ , значение допустимой рабочей температуры может быть повышено, обеспечивая необходимый запас.

#### IV. Обсуждение

Сравнительный анализ зависимостей массогабаритных и стоимостных показателей [2, 16] от мощности электропривода позволил получить следующие результаты.

1. Более быстрый рост массогабаритных показателей стандартного электродвигателя по сравнению с многоскоростным (рис. 7), существенное влияние на который оказывает разница скоростей вращения тяговой характеристики и характеристики с высокой скоростью. Кроме того, при определенном соотношении скоростей массогабаритные показатели стандартного электродвигателя становятся больше, чем у многоскоростного.

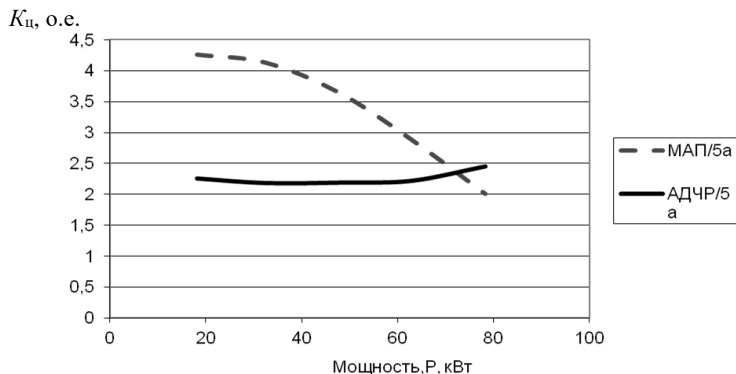


**Рис. 7. Зависимость изменения соотношений массогабаритных показателей в зависимости от мощности электродвигателей стандартного промышленного исполнения, типа АДЧР и многоскоростного серии МАП**

**Fig. 7. Dependence of changes in the ratios of weight and size indicators depending on the power of electric motors of standard industrial design, ADFR type and multi-speed MAP series**

Согласно рис. 7, при мощности электропривода до 35 кВт наблюдается рост относительной разности массогабаритных показателей, а затем ее снижение, связанное с увеличением массы дополнительного навесного оборудования (электромагнитный тормоз, внешний вентилятор) относительно массы электродвигателя. Разница масс двигателей электроприводов – АДЧР и электродвигателей общепромышленного назначения менее существенна, так как связана преимущественно с исполнением изоляции.

2. Оценка ценовых показателей (рис. 8) выявила рост относительной стоимости дополнительного навесного электрооборудования, устанавливаемого на стандартные электродвигатели морского исполнения, что ведет к снижению относительной стоимости электроприводов с многоскоростными двигателями серии МАП и к ее увеличению для электроприводов с АДЧР.



**Рис. 8. Зависимость изменения соотношений стоимостных показателей в зависимости от мощности электродвигателей стандартного промышленного, типа АДЧР и многоскоростного серии МАП**

**Fig. 8. Dependence of changes in the ratios of cost indicators depending on the power of electric motors of standard industrial design, ADFR type and multi-speed MAP series**

Из зависимостей, показанных на рис. 8, следует, что замена многоскоростного электродвигателя на стандартный с некоторого момента является нецелесообразной.

## V. Заключение

Проведенный анализ позволяет сделать вывод о целесообразности замены многоскоростного электродвигателя, применяемого для якорно-швартовных механизмов, на стандартный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором, работающий в системе ПЧ-АД. Обоснованы принципы выбора электродвигателя и использование двухзонного регулирования, которое можно обеспечить с помощью преобразователя частоты. Показано, что ограничение скорости электропривода в зоне постоянства мощности определяется допустимой скоростью подшипников. Даны пояснения, что при использовании частотного электропривода обязательным условием для обеспечения режима работы на малых скоростях и, в большей степени, режима стоянки под током является использование вентилятора с независимым питанием от обмотки статора электродвигателя. Сделаны расчеты тока статора при заторможенном роторе электродвигателя, которые доказывают, что при частотном регулировании ток статора не будет превышать двух номинальных значений. Из практических времятоковых характеристик стандартных электродвигателей следует, что в режиме стоянки под током машина не будет перегреваться в течение требуемого времени работы.

Сравнительный анализ массогабаритных показателей многоскоростных, специальных морского исполнения и стандартных электродвигателей показал, что, с точки зрения снижения массогабаритных показателей, целесообразно использовать электродвигатели серии АДЧР и стандартного исполнения (необходимо индивидуальное рассмотрение степени защиты конкретного механизма).

Известно, что импульсное напряжение отрицательно влияет на параметры изоляции статорной обмотки, сокращая срок службы электродвигателя в целом. Граничные значения напряжений в зависимости от частоты импульса указаны в ГОСТ IEC 60034-25 [17]. Повышенная частота напряжения на обмотке статора (до 100 Гц) для работы во второй зоне скоростей вращения электродвигателя будет усугублять это влияние. Однако, учитывая периодичность использования якорно-швартовных механизмов и общую наработку электродвигателя при частоте напряжения выше 50 Гц, можно сделать вывод о правильности предположения снижения мощности электродвигателя при частотном двухзонном регулировании.

© Попов С.В., 2024

© Бурмакин О.А., 2024

© Малышев Ю.С., 2024

*Поступила в редакцию 19.07.2024*

*Принята к публикации 20.08.2024*

*Received 19.07.2024*

*Accepted 20.08.2024*

### **Библиографический список**

- [1] Савенко А.Е. Судовые электроприводы. Керчь: КГМТУ, 2019. – 220 с.
- [2] Попов С.В., Бурмакин О.А., Малышев Ю.С. Сравнительный анализ регулируемых электроприводов судовых лебедок // Науч.-практ. конф. «Морские технологии: проблемы и решения-2024», Апрель 22-26, 2024, Керчь, Россия. 2024. С. 95-99.
- [3] Вольский А.Б., Новоселов К.А. Модернизация электропривода брашпиля // Труды Крыловского Государственного Научного Центра. 2023. № 3 (405). С. 135-142. DOI: 10.24937/2542-2324-2023-3-405-135-142
- [4] Токарев П.Н. Стоянка судна на якоре в стесненных путевых условиях // Научные проблемы водного транспорта. 2024. № 78 (1). С. 234-244. DOI: 10.37890/jwt.vi78.442
- [5] Ивановская А.В., Жуков В.А., Попов В.В. Исследование динамики приводов грузоподъемных устройств рыболовецкого судна // Вестник Государственного Университета Морского и Речного Флота им. Адмирала С.О. Макарова. 2021. № 13 (6). С. 875-886. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-875-886

- [6] Козлов Д.Г., Хляка С.В., Колпакова О.А. Частотно-регулируемый электропривод переменного тока // Межд. науч.-практ. конф. «Наука и образование на современном этапе развития: Опыт, проблемы и пути их решения для АПК», Ноябрь 30, 2023, Воронеж, Россия: Воронежский ГАУ, 2023. С. 104-110.
- [7] Мансуров Д.О. Анализ частотно-регулируемых асинхронных машин // III Всерос. науч.-практ. конф. «Энергетика, управление и автоматизация: Инновационные решения проблем», Санкт-Петербург, Россия. 2024. С. 152-156.
- [8] Романенко Н.Г., Головкин С.В., Сатенов К.Н., Жуманазаров М.П. Применение преобразователя частоты в качестве источника питания судового электрооборудования // Вестник Астраханского Государственного Технического Университета. Серия: Морская техника и технология. 2016. № 1. С. 77-84.
- [9] Вершинин В.И., Махонин С.В., Паршиков В.А., Хомяк В.А. Области применения способа динамического торможения в частотно-регулируемых электроприводах судовых механизмов // Труды Крыловского Государственного Научного Центра. 2018. № 386 (4). С. 149-160. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-4-386-149-160
- [10] Умяров Д.В. Обеспечение электромагнитной совместимости электроприемников в энергетических системах судов с электродвижением на этапе проектирования // Интеллектуальная Электротехника. 2019. № 3 (15). С. 36-48. DOI: 10.46960/2658-6754\_2019\_3\_36
- [11] Круговой А.Н. Работа асинхронных электродвигателей на повышенных угловых скоростях // Автоматизация и измерения в машино-приборостроении. 2023. № 4 (24). С. 28-33.
- [12] Мясников Г.С., Федосеев К.Р., Рябовол Н.С., Белов О.А. Исследование тепловых процессов асинхронного электродвигателя в продолжительном режиме работы с вариативной нагрузкой // Шестая национальная (всероссийская) науч.-тех. конф. «Техническая эксплуатация водного транспорта: Проблемы и пути развития», Ноябрь 09-10, 2023, Петропавловск-Камчатский, Россия. 2024. С. 58-62.
- [13] Рудаков В.В., Столяров И.М., Дартау В.А. Асинхронные электроприводы с векторным управлением. Л.: Энергоатомиздат: Ленингр. отд-ние, 1987. – 134 с.
- [14] Самосейко В.Ф., Гуськов В.О. Алгоритм векторного управления асинхронным электроприводом с оценкой сопротивления ротора // Вестник Государственного Университета Морского и Речного Флота им. Адмирала С.О. Макарова. 2021. № 13 (3). С. 419-429. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-419-429
- [15] Эпштейн И.И. Автоматизированный электропривод переменного тока. М.: Энергоиздат, 1982. – 192 с.
- [16] Каталог ООО «Русэлпром» // Электрические машины. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ruselprom.ru/support/informatsionnye-materialy/tekhnicheskaya-dokumentatsiya/> (дата обращения 05.05.2024).
- [17] ГОСТ ИЕС/TS 60034-25-2017. Машины электрические вращающиеся. Часть 25. Электрические машины переменного тока, используемые в системах силового привода. Руководство по применению. Введ. 2019-06-01. М.: Стандартинформ, 2019. – 66 с.



## References

- [1] A.E. Savenko, *Sudovye ehlektroprivody [Marine electric drives]*. Kerch: KGMTU, 2019 (in Russian).
- [2] S.V. Popov, O.A. Burmakin and YU.S. Malyshev, “Sravnitel'nyi analiz reguliruemyykh ehlektroprivodov sudovykh lebedok [Comparative analysis of adjustable electric drives for ship winches]”, in proc. *Scientific-practical conference “Morskaya tekhnologii: problemy i resheniya-2024 [Marine technologies: problems and solutions-2024]”*, Apr. 22-26, 2024, Kerch, Russia, pp. 95-99 (in Russian).
- [3] A.B. Vol'skii and K.A. Novoselov, “Modernization of the windlass electric drive”, *Transactions of the Krylov State Research Centre*, vol. 3, no. 405, pp. 135-142, 2023. DOI: 10.24937/2542-2324-2023-3-405-135-142
- [4] P.N. Tokarev, “The anchorage in cramped travel conditions”, *Russian Journal of Water Transport*, vol. 78, no. 1, pp. 234-244, 2024. DOI: 10.37890/jwt.vi78.442
- [5] A.V. Ivanovskaya, V.A. Zhukov and V.V. Popov, “Studying dynamics of hoisting apparatus drives of a fishing vessel”, *Vestnik Gosudarstvennogo Universiteta Morskogo i Rechnogo Flota Imeni Admirala S.O. Makarova*, vol. 13, no. 6, pp. 875-886, 2021. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-875-886
- [6] D.G. Kozlov, S.V. Khlyaka and O.A. Kolpakova, “Frequency-controlled AC electric drive”, in proc. *International scientific-practical conference “Nauka i obrazovanie na sovremennoy etape razvitiya: Opyt, problemy i puti ih resheniya dlya APK [Science and education at the present stage of development: Experience, problems and ways of their solution for the agro-industrial complex]”*, Nov. 30, 2023, Voronezh, Russia, pp. 104-110 (in Russian).
- [7] D.O. Mansurov, “Analiz chastotno-reguliruemyykh asinkhronnykh mashin [Analysis of frequency-controlled asynchronous machines]”, in proc. *III All-Russian scientific-practical conference “Energetika, upravlenie i avtomatizatsiya: Innovatsionnye resheniya problem [Power engineering, control and automation: Innovative solutions to problems]”*, 2024, St. Petersburg, Russia, pp. 152-156 (in Russian).
- [8] N.G. Romanenko, S.V. Golovko, K.N. Satenov and M.P. Zhumanazarov, “Use of the frequency converter as a power supply of marine electric equipment”, *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*, no. 1, pp. 77-84, 2016.
- [9] V.I. Vershinin, S.V. Makhonin, V.A. Parshikov and V.A. Khomyak, “Application of dynamic braking in frequency-controlled drives of ship machinery”, *Transactions of the Krylov State Research Centre*, vol. 386, no. 4, pp. 149-160, 2018. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-4-386-149-160
- [10] D.V. Umyarov, “Ensuring electromagnetic compatibility of electric receivers in power systems of vessels with electric motion at design stage”, *Smart Electrical Engineering*, vol. 3, no. 15, pp. 36-48, 2019. DOI: 10.46960/2658-6754\_2019\_3\_36
- [11] A.N. Krugovoi, “Operation of asynchronous electric motors at elevated angular velocities”, *Automation and Measurement in Mechanical Engineering and Instrument Engineering*, vol. 4, no. 24, pp. 28-33, 2023.
- [12] G.S. Myasnikov, K.R. Fedoseev, N.S. Ryabovol and O.A. Belov, “Research of thermal processes of an asynchronous electric motor in continuous operation with variable load”, in proc. *Sixth National (All-Russian) scientific-technical conference*

- “Tekhnicheskaya ekspluatatsiya vodnogo transporta: Problemy i puti razvitiya [Technical operation of water transport: problems and ways of development]”*, Nov. 09-10, 2023, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, pp. 58-62 (in Russian).
- [13] V.V. Rudakov, I.M. Stolyarov and V.A. Dartau, *Asinkhronnye ehlektroprivody s vektornym upravleniem [Asynchronous electric drives with vector control]*. Leningrad: Ehnergoatomizdat: Leningrad branch, 1987 (in Russian).
- [14] V.F. Samoseiko and V.O. Gus'kov, “Algorithm for asynchronous electric drive vector control with rotor resistance estimation”, *Vestnik Gosudarstvennogo Universiteta Morskogo i Rechnogo Flota Imeni Admirala S.O. Makarova*, vol. 13, no. 3, pp. 419-429, 2021. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-419-429
- [15] I.I. Ehpshstein, *Avtomatizirovannyi ehlektroprivod peremennogo toka [Automated AC Electric Drive]*. Moscow: Ehnergoizdat, 1982 (in Russian).
- [16] Каталог ООО “Rusehlprom” // Ehlektricheskie mashiny [Catalog ООО “Rusehlprom” // Electrical machines]. [Online]. Available at: <https://www.ruselprom.ru/support/informatsionnye-materialy/tekhnicheskaya-dokumentatsiya/> [Accessed: May 05, 2024] (in Russian).
- [17] Rotating electrical machines. Part 25. AC electrical machines used in power drive systems. Application guide, GOST IEC/TS 60034-25-2017, Jun. 2019.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Попов Сергей Васильевич**, кандидат технических наук, доцент Волжского государственного университета водного транспорта, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

**Sergey V. Popov**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

**Бурмакин Олег Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент Волжского государственного университета водного транспорта, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

**Oleg A. Burmakin**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

**Мальшев Юрий Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент Волжского государственного университета водного транспорта, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

**Yurii S. Malyshev**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation.