

УДК 62.83

Г.А. Мехтиев, Э.А. Гасанов

**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ  
ЧАСТОТНО-УПРАВЛЯЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА  
СУДОВОГО ЯКОРНОГО УСТРОЙСТВА**

*В статье рассмотрены вопросы, связанные с режимами работы частотно-управляемого электропривода судового якорного устройства. Выявлены возможности улучшения режимов работы электропривода, а также исключение режима короткого замыкания электродвигателя при отрыве якоря от грунта.*

**Ключевые слова:** судно, якорное устройство, асинхронный двигатель, частота вращения, преобразователь частоты.

*У статті розглянуті питання, пов'язані з режимами роботи частотно-керованого електроприводу судового якорного пристрою. Виявлені можливості поліпшення режимів роботи електроприводу, а також виключення режиму короткого замикання електродвигуна при відриві якоря від ґрунту.*

**Ключові слова:** судно, якорний пристрій, асинхронний двигун, частота обертання, перетворювач частоти.

*In paper the questions connected with operating regime of vessel's anchor gear frequency-controlled electric drive are considered. Possibilities of enhancement of electric drive operating regimes, and also exception of electric drive short circuit situation are revealed in time of anchor sallying.*

**Keywords:** vessel, anchor gear, induction motor, rate speed, frequency converter.

**Постановка проблемы.** В настоящее время электроприводы якорно-швартовных механизмов с многоскоростным асинхронным электродвигателем не удовлетворяют требованиям, предъявляемым к современному электрооборудованию. Проведенные исследования показывают, что управление электродвигателем якорно-швартовного устройства с помощью частотных преобразователей может дать технические и экономические преимущества устройству [5; 6].

Учитывая вышеуказанное, в статье рассмотрены задачи улучшения напряженного режима работы электроприводов якорного устройства. Известно, что назначением электроприводов якорных устройств является выбор якорной цепи и подъем якоря. Травление якоря происходит с помощью специального электрогидравлического тормоза.

---

© Мехтиев Г.А., Гасанов Э.А., 2017

**Целью статьи** является определение возможности исключения режима короткого замыкания (остановка под током) частотно-управляемого асинхронного двигателя якорного устройства при отрыве якоря от грунта.

**Изложение основного материала исследования.** На рисунке 1 показана нагрузочная диаграмма электродвигателя во время выбирания якорной цепи [2; 3]. После включения электропривода якорного устройства, в течение времени  $t_1$  (I этап) выбирается часть якорной цепи, лежащей на грунте. В это время, за счет силы действия электропривода, судно начинает движение в сторону якоря. Так как на этом этапе выбирается свободно свисающая часть цепи, то момент  $M_{c1}$  на валу электродвигателя, а также частота вращения  $n_1$  остаются неизменными.

На втором этапе ( $t_2$ ) судно продолжает движение в сторону якоря, и момент сопротивления  $M_{c2}$  на валу электродвигателя растет в функции времени. Вследствие этого растет ток нагрузки электродвигателя и снижается частота вращения. В конце второго этапа носовая часть судна располагается примерно над местом закладки якоря.

В течение времени  $t_3$  (III этап) под действием электропривода и движения судна, вследствие инерции, якорь отрывается от грунта. На этом этапе момент сопротивления  $M_{c3}$  на валу электродвигателя принимает большое значение, и в течение малого времени электродвигатель ( $n_3 = 0$ ) работает в режиме короткого замыкания.

Так как этот этап является кратковременным, и электродвигатель выпускается в специальном исполнении (способным выдерживать короткое замыкание в течение 30 сек.), он выдерживает этот режим.

На четвертом этапе, в течение времени  $t_4$ , происходит подъем якоря. Тяговое усилие определяется массой якоря и цепи. На этом этапе момент  $M_{c4}$  на валу электродвигателя постепенно снижается, а скорость вращения увеличивается, и процесс съемки с якоря заканчивается.

Рассматривая процесс съемки с якоря, можно отчетливо увидеть, что режим работы электродвигателя якорного устройства изменяется в широком диапазоне. Из нагрузочной диаграммы, изображенной на рисунке 1, видно, что электродвигатель в течение малого времени останавливается под нагрузкой (режим короткого замыкания). Вследствие этого ток, потребляемый электродвигателем из сети, превышает номинальный ток в 5-7 раз [4].

Следует отметить, что в случае применения частотных преобразователей, предложенных для управления электроприводом якорного устройства, возможно избежать перехода электродвигателя в режим короткого замыкания (остановки под нагрузкой).

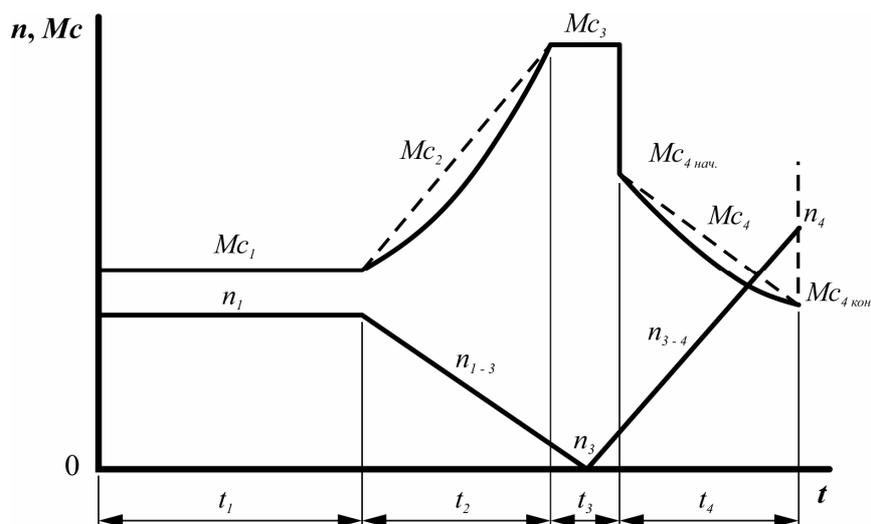


Рис. 1. Нагрузочная диаграмма электродвигателя во время выбирания якорной цепи

Конечно же, невозможно уменьшить момент сопротивления, возникающий при отрыве якоря от грунта, однако можно увеличить максимальный момент, создаваемый электродвигателем, путем изменения закона управления частотными преобразователями.

Для доказательства вышеуказанного используем параметры рабочей обмотки (2-ой обмотки) трехскоростного электродвигателя, наиболее часто применяемого на судах для электропривода якорного устройства.

Тип двигателя: МАП 622-4/8/16. Здесь 4, 8, 16 число полюсов обмоток, соответствующих высокой, средней и низкой скоростям. Соответственно, мощности обмоток:  $P_n = 28/36/10$  кВт; номинальная скорость вращения  $n_n = 1445/670/315$  об/мин. Находим параметры обмотки средней скорости ( $2P = 8$ ). Перегрузочная способность обмотки

$$\lambda_2 = \frac{M_{\max 2}}{M_{n2}} = 2,4. \quad (1)$$

Номинальный момент, создаваемый обмоткой

$$M_{2n} = 9,81 \frac{975 \cdot P_{2n}}{n_{2n}} = 9,81 \frac{975 \cdot 36}{670} = 514 \text{ Нм}. \quad (2)$$

Номинальное скольжение двигателя при работе данной обмоткой

$$S_{2n} = \frac{n_{02} - n_{n2}}{n_{02}} = \frac{750 - 675}{750} = 0,106. \quad (3)$$

Соответственно находим критическое скольжение

$$\begin{aligned} S_{2кр} &= S_{2н}(\lambda_2 \pm \sqrt{\lambda_2^2 - 1}) = \\ &= 0,106 \cdot (2,4 \pm \sqrt{2,4^2 - 1}) = 0,106 \cdot (2,4 + 2,18) = 0,48. \end{aligned} \quad (4)$$

Максимальный (критический) момент, создаваемый обмоткой

$$M_{2кр} = \lambda_2 \cdot M_{2н} = 2,4 \cdot 514 = 1233,6 \text{ Нм}. \quad (5)$$

При частотном управлении электродвигателем якорного устройства использована только обмотка средней скорости ( $2P = 8$ ), далее будет проверена её способность обеспечивать необходимые режимы.

Например, рассмотрим регулирование скорости полупроводниковым преобразователем частоты широтно-импульсной модуляцией только обмотки средней скорости (второй обмотки) двигателя МАП-622. Такие частотные преобразователи обеспечивают регулирование скорости электродвигателя в 20-30 раз ниже и в 1,5-2 раза выше номинальной. Выясним возможность избегания режима короткого замыкания при отрыве якоря от грунта путем применения частотного преобразователя для управления обмоткой ( $2P = 8$ ).

Как известно, при применении частотного метода управления для сохранения постоянства перегрузочной способности асинхронного двигателя (на всех этапах управления), наряду с изменением частоты тока, подаваемого на двигатель, необходимо также изменять его напряжение. Постоянство перегрузочной способности асинхронного двигателя обеспечивается, если отношение критических (максимальных) моментов двигателя во всех режимах равно отношению соответствующих статических моментов нагрузки, т.е.

$$M_{ст.и} / M_{ст.н} = M_{max.и} / M_{max.н}, \quad (6)$$

где  $M_{ст.и}$  и  $M_{max.и}$  – соответственно, статический момент, создаваемый механизмом и максимальный момент электродвигателя во время регулирования.

$M_{ст.н}$  и  $M_{max.н}$  – значения статического и максимального момента при номинальной частоте вращения.

Если пренебречь активным сопротивлением статорной обмотки асинхронного электродвигателя, то его максимальный (критический) момент будет равен

$$M_{max} = \frac{m_1 U_1^2}{2C_1 \omega_c X_k} = K \frac{U_1^2}{f_1^2}, \quad (7)$$

где  $K = \frac{m_1 P^2}{8C_1 \pi^2 L_k}$  – постоянная величина;

$L_k$  – индуктивность короткого замыкания;

$P$  – число пар полюсов двигателя.

Из курса Теории электропривода известно, что статический момент сопротивления многих механизмов зависит от угловой скорости ( $\omega$ ) двигателя, передающего вращательное движение механизму.

$$M_{cm} = M_0 + (M_n - M_0)^\alpha, \quad (8)$$

где  $M_0$  – независимая часть момента статического сопротивления от угловой скорости.

$\alpha$  – показатель степени зависимости момента статического сопротивления от угловой скорости. Для основной части механизмов  $\alpha = 0-2$ .

Если не учитывать  $M_0$ , формулу (8) можно записать в следующем виде:

$$M_{cm} = C\omega^\alpha = C_1 f_i^\alpha, \quad (9)$$

где  $C$  и  $C_1$  – постоянные величины.

Нужно заметить, что момент статического сопротивления якорного устройства остаётся неизменным при изменении угловой скорости  $M_{cm} = const$  и для такого случая ( $\alpha = 0$ ) напряжения изменятся прямо пропорционально с частотой.

В этом случае можем записать

$$U_{li}/U_n = f_i/f_n; \quad (10)$$

$$U_i = U_n \varphi_i, \quad (11)$$

Отсюда  $\varphi_i = f_i/f_n$  – относительное изменение частоты тока, подаваемого на двигатель.

Известно, что при изменении частоты тока, будет изменяться синхронная скорость поля статора  $\omega_c$  и индуктивные сопротивления обмоток двигателя.

Выразим их через соответствующие значения при номинальных параметрах питающей сети.

Вращающийся магнитный поток статора

$$\omega_{cn} = \frac{2\pi f_n}{P}; \quad \omega_{cf} = \omega_{cn} \varphi. \quad (12)$$

Реактивное сопротивление короткого замыкания двигателя

$$X_k = X_{кн} \varphi . \quad (13)$$

Формула критического скольжения при переменной частоте имеет вид

$$S_{кр \cdot f} = \pm \frac{C_1 r_2'}{\sqrt{r_1^2 + X_k^2 \varphi^2}} . \quad (14)$$

Если здесь сопротивление статора принять  $r_1 = 0$ , то при изменении частоты критическое скольжение и упрощенная формула Клосса будут иметь вид

$$S_{кр \cdot f} = \pm \frac{C_1 r_2'}{\varphi X_k} = \frac{S_{кр}}{\varphi} ; \quad (15)$$

$$M_f = \frac{2M_{кр}}{\frac{s}{S_{кр \cdot f}} + \frac{S_{кр \cdot f}}{s}} ; \quad (16)$$

Если подставить формулу (15) в формулу Клосса (16), получим новое выражение для изменения напряжения и частоты [4]

$$M_f = \frac{2M_{кр}}{\frac{S\varphi}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S\varphi}} . \quad (17)$$

Используя формулу (17) для рабочей обмотки асинхронного двигателя типа МАП-622, построим механическую характеристику, образующуюся при разных значениях частоты.

Регулирование ведётся уменьшением частоты тока, начиная с номинального, сохранив при этом номинальное значение напряжения (380 В).

Максимальный (критический) момент двигателя прямо пропорционален квадрату напряжения и обратно пропорционален квадрату частоты  $M_{кр} \equiv U^2 / f^2$ . Поэтому для построения механических характеристик при уменьшенных значениях частоты необходимо вычислять новый максимальный момент. Для построения механических характеристик использована формула (17).

1.

$$U = U_n = 380 \text{ В}, f_n = 50 \text{ Гц} \quad \varphi = \frac{f}{f_n} = \frac{50}{50} = 1, \quad M = \frac{2M_{кр}}{\frac{S\varphi}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S\varphi}},$$

$$M_{кр1} = \frac{M_{кр-н}}{\varphi^2} = \frac{1233,6}{1^2} = 1233,6 \text{ Нм},$$

$$M = \frac{2M_{кр1}}{\frac{S\varphi}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S\varphi}} = \frac{2 \cdot 1233,6}{\frac{S \cdot 1}{0,48} + \frac{0,48}{S \cdot 1}}.$$

2.

$$U = U_n = 380 \text{ В}, f = 0,8f_n = 0,8 \cdot 50 = 40 \text{ Гц}, \quad \varphi = \frac{f}{f_n} = \frac{40}{50} = 0,8,$$

$$M = \frac{2M_{кр2}}{\frac{S\varphi}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S\varphi}}, \quad M_{кр2} = \frac{M_{кр-н}}{\varphi^2} = \frac{1233,6}{0,8^2} = 1927,5 \text{ Нм},$$

$$M = \frac{2M_{кр2}}{\frac{S\varphi}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S\varphi}} = \frac{2 \cdot 1927,5}{\frac{S \cdot 0,8}{0,48} + \frac{0,48}{S \cdot 0,8}}.$$

3.

$$U = U_n = 380 \text{ В}, f = 0,7f_n = 0,7 \cdot 50 = 35 \text{ Гц}, \quad \varphi = \frac{f}{f_n} = \frac{35}{50} = 0,7,$$

$$M = \frac{2M_{кр3}}{\frac{S\varphi}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S\varphi}}, \quad M_{кр3} = \frac{M_{кр-н}}{\varphi^2} = \frac{1233,6}{0,7^2} = 2517,5 \text{ Нм},$$

$$M = \frac{2M_{кр3}}{\frac{S\varphi}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S\varphi}} = \frac{2 \cdot 2517,5}{\frac{S \cdot 0,7}{0,48} + \frac{0,48}{S \cdot 0,7}}.$$

4.

$$U = U_n = 380 \text{ В}, f = 0,6f_n = 0,6 \cdot 50 = 30 \text{ Гц},$$

$$\varphi = \frac{f}{f_n} = \frac{30}{50} = 0,6, \quad M = \frac{2M_{кр4}}{\frac{S\varphi}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S\varphi}},$$

$$M_{кр4} = \frac{M_{кр-н}}{\varphi^2} = \frac{1233,6}{0,6^2} = 3426,6 \text{ Нм},$$

$$M = \frac{2M_{кр4}}{\frac{S\varphi}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S\varphi}} = \frac{2 \cdot 3426,6}{\frac{S \cdot 0,6}{0,48} + \frac{0,48}{S \cdot 0,6}}.$$

С помощью программы MATLAB/Simulink и формулы (18)-(21) произведен расчет механических характеристик двигателя при различных частотах питающего тока (см. таблицу 1 и рисунок 2).

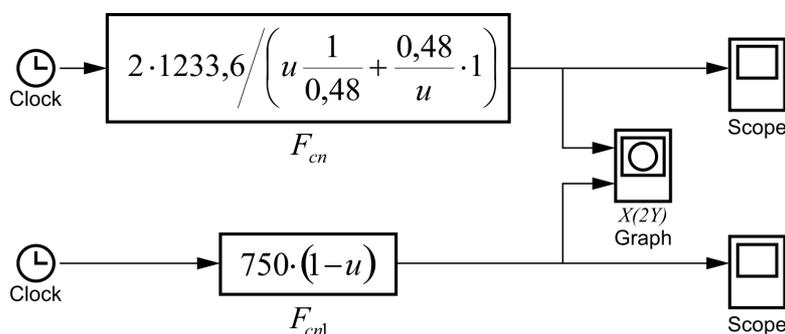


Рис. 2. Расчет естественной механической характеристики с помощью программы MATLAB / Simulink, обмотки средней скорости ( $2P = 8$ ) асинхронного электродвигателя типа МАП-622-4/8/16

На рисунке 3 изображены механические характеристики обмотки средней скорости ( $2P = 8$ ) асинхронного электродвигателя типа МАП-622-4/8/16.

Как видно из таблицы и механической характеристики (см. рис. 3) максимальный момент двигателя с уменьшением частоты увеличивается. Например, при  $f = 30$  Гц,  $M_{\max} = 3426,6$  Нм, который в 2,77 раз больше максимального момента при  $f = 50$  Гц.

$$\frac{M_{\max}(f = 30 \text{ Гц})}{M_{\max}(f = 50 \text{ Гц})} = \frac{3426,6}{1233,6} = 2,77. \quad (22)$$

Произведем небольшой расчет для определения частоты тока, при которой без остановки электродвигателя якорь отрывается от грунта. Значение отрывной силы зависит от характера сцепления якоря с грунтом и в конкретных случаях является трудно определяемым.

Статистические исследования позволяют считать силу подрыва заиленного якоря Холла равной его двойному весу  $2G_y$ . Тогда отрывная сила на клюзе может быть вычислена [1]

$$F_{\text{отр}} = 0,87[2G_y + (G_y + qh)]. \quad (23)$$

где  $G_y$  – вес якоря, Н;

$q$  – вес одного метра якорной цепи;

$h$  – глубина стоянки на якорю, м.

Таблиця 1

Результаты расчета механических характеристик двигателя  
при различных частотах питающего тока

Параметры	Значения	S									
		0	0,05	0,1	0,3	0,4	0,48	0,6	0,7	0,8	1
$U = U_n = 380\text{В}$ , $f = f_n = 50\text{Гц}$ , $\varphi = \frac{f}{f_n} = 1$ , $M_{\text{max}1} = 1233,6\text{Нм}$	$M_1$ , Нм	0	254	493	1111	1215	1233,6	1203	1152	1091	963
	$n$ , об./мин.	750	712	675	525	450	390	300	225	150	0
$U = U_n = 380\text{В}$ , $f = 0,8f_n = 40\text{Гц}$ , $\varphi = \frac{f}{f_n} = 0,8$ , $M_{\text{max}2} = 1927,5\text{Нм}$	$M_2$ , Нм	0	319	625	1542	1784	1871	1927,5	1908	1853	1701
	$n$ , об./мин.	600	570	540	420	360	312	240	180	120	0
$U = U_n = 380\text{В}$ , $f = 0,7f_n = 35\text{Гц}$ , $\varphi = \frac{f}{f_n} = 0,7$ , $M_{\text{max}3} = 2517,5\text{Нм}$	$M_3$ , Нм	0	363	719	1851	2237	2363	2504	2517,5	2488	2363
	$n$ , об./мин.	525	498	472	367	315	273	210	157	105	0
$U = U_n = 380\text{В}$ , $f = 0,6f_n = 30\text{Гц}$ , $\varphi = \frac{f}{f_n} = 0,6$ , $M_{\text{max}4} = 3426,6\text{Нм}$	$M_4$ , Нм	0	426	843	2253	2741	2966	3294	3392	3426,6	3343
	$n$ , об./мин.	450	427	405	315	270	234	180	135	90	0

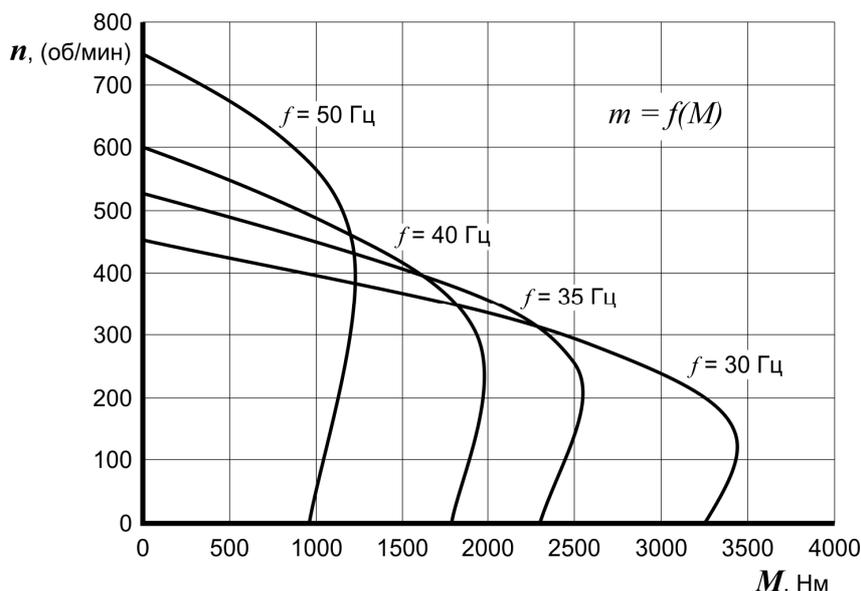


Рис. 3. Механические характеристики обмотки средней скорости ( $2P = 8$ ) асинхронного электродвигателя типа МАП-622-4/8/16 для значений частот  $f = 50, 40, 35$  и  $30$  Гц

Приведенный здесь в качестве примера электродвигатель типа МАП 622-4/8/16 установлен в электроприводе якорного устройства на танкерах типа «Апшерон» Азербайджанской Республики.

Вес якоря на этих судах  $G_{\text{я}} = 2500$  кг.

Вес одного метра якорной цепи  $q = 51,62$  кг.

Глубину стоянки принимаем  $h = 100$  м.

Отрывная сила на клюзе этих судов

$$F_{\text{отр}} = 0,87[2G_{\text{я}} + (G_{\text{я}} + qh)] = 0,87[2 \cdot 2500 + (2500 + 51,62 \cdot 100)] = 0,87[500 + 7662] = 11016 \text{ кг}$$

или

$$F_{\text{отр}} = 9,81 \cdot 11016 = 108067 \text{ Н.}$$

Отрывная сила на звездочке якорного устройства

$$F_{\text{зв}} = \frac{F_{\text{отр}}}{\eta_{\text{кл}}} = \frac{108067}{0,7} = 154381 \text{ Н,}$$

где  $\eta_{\text{кл}}$  – КПД клюза.

Момент на валу электродвигателя якорного устройства

$$M_{\text{элдв}} = \frac{F_{\text{зв}} D_{\text{зв}}}{2K\eta_{\text{як}}}, \quad (24)$$

где  $D_{\text{зв}}$  – диаметр якорной звездочки,  $D_{\text{зв}} = 0,7$  м.

$\eta_{\text{як}}$  – КПД якорного устройства совместно с редуктором.

$\eta_{\text{як}} = 0,65-0,8$ , принимаем  $\eta_{\text{як}} = 0,7$ .

$K$  – передаточное число редуктора якорного устройства,  $K = 80$ .

$$M_{\text{элдв}} = \frac{F_{\text{зв}} D_{\text{зв}}}{2K\eta_{\text{як}}} = \frac{154381 \cdot 0,7}{2 \cdot 80 \cdot 0,7} = \frac{108067}{112} = 965 \text{ Нм}.$$

Как видно из результатов данного расчета момент сопротивления на валу электродвигателя при отрыве якоря от грунта ( $M_{\text{от}} = 965$  Нм) почти в 2 раза больше, чем номинальный момент электродвигателя ( $M_{\text{н}} = 514$  Нм).

Если еще учесть при отрыве якоря от грунта увеличение потери напряжения на кабеле, питающего электродвигатель, то момент еще ощутимей уменьшится, так как момент асинхронного двигателя зависит от квадрата напряжения  $M_{\text{АД}} \equiv U^2$ .

Как видно из таблицы отрыв якоря от грунта без остановки двигателя может осуществляться, начиная с частоты тока 40 Гц, где максимальный момент двигателя в 1,56 раз больше, чем максимальный момент при 50 Гц.

**Заключение.** Проведенные расчеты показали, что при применении частотных преобразователей для управления электродвигателем якорного устройства, к преимуществам частотного управления электроприводом добавляется ещё и возможность исключения перехода электродвигателя в режим короткого замыкания при отрыве якоря от грунта.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бабаев А.М., Ягодин В.Я. Автоматизированные судовые электроприводы. – М.: Транспорт, 1986. – 477 с.
2. Мехтиева Г.А., Гасанов З.А., Шабанов Т.Г. Судовые автоматизированные электроприводы. – Баку: Нурлан, 2005. – 358 с.
3. Судовые электроприводы: Справочник. – Л.: Судостроение, 1983. – Т. 2. – 384 с.
4. Чекунов К.А. Теория судового электропривода. – Л.: Судостроение, 1982. – 336 с.

5. Султанов Э.Ф., Гасанов Э.А. Управление электроприводом якорного устройства с помощью частотных преобразователей // Проблемы энергетики: Научн. изд. – № 3.– Баку, 2014. – С. 65-77.
6. Султанов Э.Ф., Гасанов Э.А. Основные преимущества управления электроприводом якорного устройства с помощью частотных преобразователей // Научн. труды Азербайджанской Государственной Морской Академии. – № 2. – Баку, 2015. – С. 201-208.

Стаття надійшла до редакції 25.09.2017

**Рецензент** – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри «Суднова електроавтоматика» Азербайджанської державної морської академії **С.Т. Ахмедова**