

ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ ПОГРУЖНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ ПОДВОДНОЙ РОБОТОТЕХНИКИ В ЦЕЛОМ И ДЛЯ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ В ЧАСТНОСТИ

Электроприводы являются основными потребителями электроэнергии на подводных аппаратах (ПА). Наиболее широкое распространение в движительно-рулевых комплексах (ДРК) подводных аппаратов получили асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором благодаря хорошим массогабаритным характеристикам, низкой стоимости, простоте управления и капсулирования. Эффективность преобразования энергии в ДРК определяет энергетическую эффективность ПА и его коммерческую деятельность. Как правило, электродвигатели ПА выполнены в погружном (бароразгруженном) виде [1]. Для этого электродвигатель помещают в герметичный контейнер и заливают жидким диэлектриком с низкой вязкостью. Внешнее гидростатическое давление передается внутрь через эластичный элемент – компенсатор. Выход вала электродвигателя уплотняется специальным сальником, обеспечивающим незначительный перепад давления.

Интуитивно понятно, что наличие жидкого диэлектрика между ротором и статором приведет к снижению крутящего момента на валу электродвигателя, причем это снижение будет тем больше, чем выше частота вращения ротора, меньше кольцевой зазор между ротором и статором и больше вязкость диэлектрика. Однако для проектирования необходимы не только качественные, но и количественные данные о механических характеристиках таких электродвигателей, причем не только на номинальном режиме работы, но и на регуляторных режимах работы. Особенно такие данные нужны для построения моделей функционирования ДРК.

В качестве жидкого диэлектрика можно использовать керосин, спирт или специальные минеральные масла. На выбор жидкого диэлектрика влияют следующие его свойства: кинематический коэффициент вязкости ν , плотность ρ , температурный коэффициент расширения β , зависимость плотности от гидростатического давления, зависимость вязкости от температуры и давления, электрическая прочность, теплопроводность, термическая стойкость, смешиваемость с водой, химическая стабильность, смазывающие свойства, токсичность.

Постановка задачи.

Основными задачами, которые необходимо решить в ходе проектирования электродвигателей:

1. Повышение КПД электродвигателя, работающего в среде жидкого диэлектрика.
2. Выбор жидкого диэлектрика по химическим свойствам.

Решение задач.

Работа погружных электродвигателей сопровождается дополнительными потерями мощности ΔP_G , возникающими при вращении ротора в вязкой жидкости (жидком диэлектрике).

1. В общем виде эти потери определяются зависимостью:

$$\Delta P_G \approx f \left(\frac{\omega_2^2 \cdot \nu \cdot l \cdot r^4}{\delta \cdot q} \right), \quad (1)$$

где ω_2 – угловая скорость вращения ротора; l , r – длина и радиус ротора; δ – зазор между статором и ротором; q – чистота обработки поверхности ротора. Приближенность зависимости (1) затрудняет проектирование энергетически оптимальных ПА. В качестве теоретической основы может служить зависимость для момента сил трения между двумя соосными вращающимися цилиндрами при ламинарном течении жидкости между ними [2]:

$$M_G = 4 \cdot \pi \cdot \rho \cdot \nu \cdot l \cdot \frac{R^2 r^2}{R^2 - r^2} \cdot (\omega_1 - \omega_2), \quad (2)$$

где R , r – соответственно радиус наружного и внутреннего цилиндров (статора и ротора электродвигателя); ω_1 , ω_2 – соответственно, угловые скорости частоты вращения наружного и внутреннего цилиндра (статора и ротора электродвигателя).

Отметим, что в общем случае ротор электродвигателя как тело вращения с позиции гидромеханики может быть представлено следующими основными составляющими: обмоточная часть ротора w ; лобовые части ротора u ; подшипники b ; линия вала a . Каждая составляющая создает момент сил трения M_i , сумма которых равна результирующему моменту гидродинамических сил вязкого трения M_G :

$$M_G = \sum_{i=w,u,b,a} n_i \cdot M_i, \quad (3)$$

где n_i – количество составляющих каждого типа.

Выражения для каждой составляющей получают как частные случаи зависимости (2).

Момент вязкого трения обмоточной части ротора электродвигателя длиной l_w и радиусом r_w , полагая $\omega_1 = 0$:

$$M_w = -2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot \nu \cdot l_w \cdot r_w^3 \cdot \delta^{-1} \cdot \omega_2. \quad (4)$$

Момент вязкого трения линии вала электродвигателя находят при $R \rightarrow \infty$. Тогда формула (2) описывает вязкое трение линии вала длиной l_a и радиусом r_a как вращение внутреннего цилиндра в неограниченной жидкости:

$$M_a = -4 \cdot \pi \cdot \rho \cdot v \cdot l_a \cdot r_a^2 \cdot \omega_2. \quad (5)$$

Момент вязкого трения в подшипнике M_b может быть определен с помощью решения Жуковского и Чаплыгина в предположении, что подшипник скольжения состоит из двух эксцентрично расположенных цилиндров, один из которых вращается с постоянной угловой скоростью [2]. Движение тонкого слоя жидкого диэлектрика между ними полагают плоским, установившимся, ламинарным, изометрическим. Тогда момент находят по формуле:

$$M_b = \rho \cdot v \cdot \frac{S_b \cdot \omega_2 \cdot r_b^2}{(R_b - r_b)} \cdot \frac{2 \cdot \alpha \cdot (\alpha^2 + 2)}{(2 \cdot \alpha^2 + 1) \cdot \sqrt{\alpha^2 - 1}}, \quad (6)$$

где S_b – поверхность цапфы единичной длины подшипника; α – эксцентриситет подшипника.

Момент вязкого трения лобовых частей ротора M_u находится в предположении ламинарного течения диэлектрика. Конкретный вид уравнения для момента M_u определяется в соответствии с рекомендациями [3] в зависимости от формы лобовых частей после их обработки (заливки компаундом и шлифовки).

Таким образом, аналитический расчет гидродинамических потерь мощности ΔP_G в погружном электродвигателе может быть выполнен с учетом основных видов потерь по формуле:

$$\Delta P_G = M_G \cdot \omega_2. \quad (7)$$

Для определения потерь можно воспользоваться экспериментально снятыми механическими и электромеханическими характеристиками привода, заполненного жидким диэлектриком. При этом следует иметь в виду, что имеющиеся момент M и механическая мощность P_2 привода являются суммами мощности и момента двигателя и мощности и момента потерь:

$$P_2 = P_{2ДВ} + P_{2Д} + \Delta P_G, \quad M = M_{ДВ} + M_{Д} + M_G, \quad (8)$$

где $M_{ДВ}$, $P_{2ДВ}$ – момент и мощность на валу двигателя; $M_{Д}$, $P_{2Д}$ – момент и мощность, обусловленные другими потерями.

Получить значение M_G и ΔP_G можно экстраполяцией механических и электромеханических характеристик привода в области отрицательных значений M и P_2 и определения рабочей точки на этих характеристиках, соответствующих работе привода без жидкого диэлектрика.

2. В связи с тем, что внутреннее пространство электродвигателя ПА заполняется жидким диэлектриком, например минеральным маслом или авиационным керосином, при вращении ротора на его боковой поверхности и торцах возникают гидродинамические тормозящие моменты (ГТМ). Значения этих моментов на начальных стадиях проектирования можно определить, используя схему, изображенную на рис. 1 [4].

Гидродинамический момент сопротивления вращению ротора θ_g будет состоять из суммы моментов:

$$\theta_g = \theta_{g1} + \theta_{g2}, \quad (9)$$

где θ_{g1} , θ_{g2} – моменты сопротивления соответственно боковой и торцевой поверхностей.

Момент сопротивления боковой поверхности определяется по формуле:

$$\theta_{g1} = 4 \cdot \pi \cdot \mu \cdot \omega \cdot L \cdot \frac{r^2 \cdot R^2}{R^2 - r^2}, \quad (10)$$

где μ – динамический коэффициент вязкости жидкого диэлектрика; r , R – радиусы ротора и статора.

Поскольку δ_1 величина малая, то квадратом этой величины можно пренебречь, тогда получаем:

$$\theta_{g1} = 4 \cdot \pi \cdot \mu \cdot \omega \cdot L \cdot r^2 \cdot \left(1 + \frac{r}{2 \cdot \delta_1}\right). \quad (11)$$

Для определения момента сопротивления на торцах рассматривают движение жидкого диэлектрика между двумя параллельными плоскостями с расстоянием δ_2 [4]. Гидродинамический момент на торцах определяется по формуле:

$$\theta_{g2} = (\mu \cdot \pi \cdot \omega \cdot r^4) / \delta_2. \quad (12)$$

Суммарный момент сопротивления вращению ротора:

$$\theta_g = 4 \cdot \pi \cdot \mu \cdot \omega \cdot r^3 \cdot \left(\frac{L}{r} + \frac{L}{2 \cdot \delta_1} + \frac{r}{4 \cdot \delta_2}\right). \quad (13)$$

С другой стороны, в соответствии с теорией подобия:

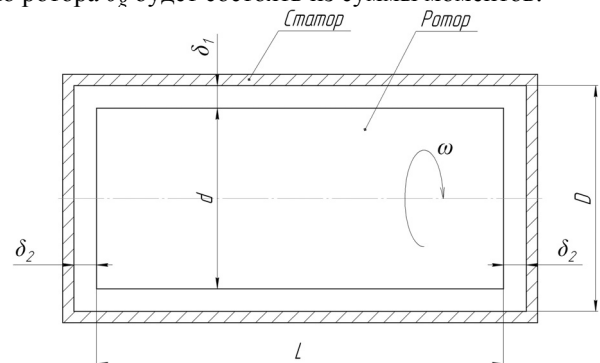


Рис. 1 – Расчетная схема для определения гидродинамических моментов:

d, L – диаметр и длина ротора; D – диаметр статора; δ_1, δ_2 – боковой и торцевой зазоры; ω – угловая скорость вращения ротора.

$$\theta_g = C_{qg} \cdot \pi \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot r^4 \cdot L. \quad (14)$$

Приравняв правые части (13) и (14) получим формулу для безразмерного гидродинамического коэффициента момента сил трения:

$$C_{qg} = \frac{4}{Re} \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{\delta_1}{r} + \frac{r \cdot \delta_1}{4 \cdot L \cdot \delta_2} \right), \quad (15)$$

где Re – число Рейнольдса.

Поскольку $\delta_1 \ll r$, $\delta_1 \ll \delta_2$ и $r < L$ приближенно можно считать:

$$C_{qg} \approx 2 / Re. \quad (16)$$

3. Однако приведенные выше методы определения потерь мощности и моментов сопротивления вращения ротора в среде жидкого диэлектрика являются приближенными в силу допущений принятых при математическом описании протекающих гидродинамических и тепловых процессов. Поэтому авторами этой статьи была разработана методика и проведены определенные расчеты и ряд опытов, в ходе которых исследовалась зависимость объема жидкого диэлектрика при изменении температуры окружающей среды [5]. По окончании опыта были получены следующие результаты, которые представлены в табл. 1.

Табл. 1 – Зависимость объема жидкого диэлектрика при изменении температуры окружающей среды

№ п.п.	Температура воды, T, °C	Объем жидкого диэлектрика, V, см ³	Время, t, мин.	
1	67,5	16,5	0	Емкость с горячей водой
2	61	15	10	
3	56,5	14	20	
4	54	13	30	
5	51	12	40	
6	48	11	50	
7	3	1	0	Емкость с холодной водой
8	8	1,5	20	
9	15	2	40	
10	18	2,5	60	
11	20	3	80	

На основании полученных результатов получены зависимости объема жидкого диэлектрика от температуры окружающей среды рис.2.

Также были проведены расчеты подтверждающие работоспособность асинхронных электродвигателей в среде жидкого диэлектрика, в частности выбор компенсаторов и способы уменьшения внутреннего объема жидкого диэлектрика асинхронного электродвигателя, с целью уменьшения изменения ΔV объема жидкого диэлектрика [6].

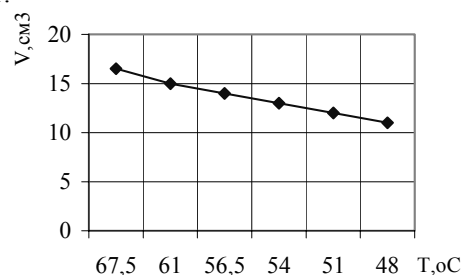
На основании полученных опытных и теоретических данных можно сделать следующие выводы:

1. Во время работы асинхронного электродвигателя при высокой температуре жидкого диэлектрика (50–70 °C), происходит интенсивное газообразование, а при низкой температуре (2–5 °C) газообразование практически отсутствует. Поэтому включение асинхронного электродвигателя при высокой температуре жидкого диэлектрика запрещено.

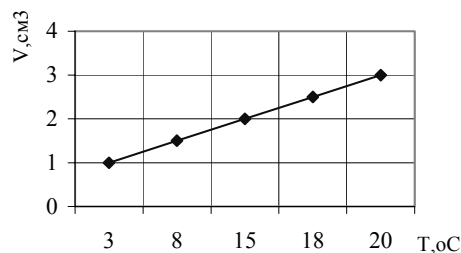
2. Полученные экспериментальные данные зависимости объема жидкого диэлектрика от температуры окружающей среды совпадают с предварительно полученными теоретическими расчетами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ястребов В.С., Смирнов А.В., Челышев В.А. Принципы построения погружных систем подводных аппаратов. – М.: Наука, 1979. – 128с.
2. Емцев Б.Т. Техническая гидромеханика: Учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 1987. – 463с.
3. Повх И.Л. Техническая гидромеханика. 2-е изд., доп. – Л.: «Машиностроение», (Ленингр. Отд-ние). – 1976. – 504с.
4. Влияние гидродинамических потерь на механические характеристики капсулированных управляемых асинхронных двигателей подводных аппаратов: Сб. науч. трудов – Николаев: НУК, 2004. – №6 С. 15-24.
5. Блинцов В.С, Красюк А.Н. экспериментальное исследование работы электрических двигателей в бреде жидкого диэлектрика // Матеріали міжнародна науково-технічна конференція присвячена 90-річчю НУК ім. адмірала Макарова. – Миколаїв:НУК, 2010.-С.73-74.
6. Особенности проектирования двигателей с жидким диэлектриком для подводных аппаратов // Матеріали міжнародна науково-технічна конференція студентів, аспірантів, молодих вчених. – Миколаїв:НУК, 2010.-С.88-91.



а)



б)

Рис. 2 – Зависимость объема жидкого диэлектрика от температуры окружающей среды: а) емкость с горячей водой; б) емкость с холодной водой.