



УДК 621.313.333.2

А. Г. Лавров, Н. С. Шкарбун
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Расчет гидродинамических потерь в погружных асинхронных электродвигателях

Представлена методика расчета гидродинамических потерь, возникающих в погружных асинхронных электродвигателях герметичного исполнения при заполнении их внутреннего объема жидким диэлектриком. По приведенной методике произведен расчет гидродинамических потерь для погружного асинхронного электродвигателя, внутренний объем которого заполнен дистиллированной водой.

Погружной электродвигатель, асинхронный электродвигатель, герметичное исполнение, жидкий диэлектрик, гидродинамические потери, методика расчета, расчет потерь

В настоящее время активно осваивается Мировой океан. Во всем мире разрабатываются новые месторождения полезных ископаемых, находящиеся на шельфе. Развитие морской геологии вызывает потребность в новых судовых электрических машинах для приводов механизмов подводных аппаратов. В этой области применяются герметичные асинхронные погружные электродвигатели, внутренний объем которых заполнен жидким диэлектриком; такие электродвигатели могут использоваться в качестве приводов гребных винтов, насосов, активных рулей, лебедок подводных аппаратов [1].

Заполнение внутреннего объема электродвигателя жидким диэлектриком позволяет компенсировать высокое давление окружающей среды, что обеспечивает таким двигателям возможность работать на больших глубинах. Для заполнения внутреннего объема погружных асинхронных электродвигателей могут использоваться различные жидкие диэлектрики, а также магнитные жидкости на их основе. Выбор жидкого диэлектрика производится на основании рассчитанных гидродинамических потерь и нагрева. Сегодня в литературе широко рассматриваются погружные насосные электродвигатели, но методики расчета гидродинамических потерь, разработанные для них, не могут применяться для погружных асин-

хронных электродвигателей, поскольку геометрия этих видов электродвигателей различается: погружные насосные электродвигатели имеют длину, в разы превышающую диаметр, а рассматриваемые погружные асинхронные электродвигатели имеют традиционную геометрию, т. е. их длина соизмерима с диаметром. В статье приводится вывод методики расчета гидродинамических потерь погружного асинхронного электродвигателя.

Определение гидродинамических потерь погружного асинхронного электродвигателя представляет собой сложную задачу, поскольку возникающие гидродинамические потери зависят от геометрии участка протекания жидкого диэлектрика и режима течения жидкости в нем, что приводит к необходимости условного разбиения машины на отдельные элементы. Для расчета гидродинамических потерь асинхронного погружного двигателя с короткозамкнутым ротором рассмотрим следующие элементы: зазор между ротором и статором, торцевые зоны ротора [2].

Зазор между ротором и статором электрической машины с точки зрения движения жидкости может рассматриваться как канал с кольцевым сечением между неподвижным внешним и вращающимся внутренним цилиндрами. Гидродинамические потери зависят от режима течения жидкости, установившегося в канале [2].

В гидродинамике для того чтобы охарактеризовать движение жидкости в зазоре между вращающимися цилиндрами, применяют параметр, названный числом Тейлора [2]:

$$Ta = \omega^2 r \delta^3 \nu^{-2},$$

где ω – угловая скорость вращения цилиндра, рад/с; $r = 0.5(r_1 + r_2)$ – средний радиус зазора, м; $\delta = r_1 - r_2$ – высота зазора, м; r_1 и r_2 – радиусы внутреннего и наружного цилиндров; ν – кинематическая вязкость жидкости, м²/с.

При помощи числа Тейлора режимы течения могут быть разделены: на ламинарный – при $0 < Ta < 1700$; ламинарный с макровихрями Тейлора при $1700 < Ta < 2 \cdot 10^7$ и турбулентный с нерегулируемыми макровихрями при $Ta > 2 \cdot 10^7$ [2].

При установившемся ламинарном течении вязкой жидкости в кольцевом канале траектории частиц жидкости представляют собой концентрические окружности, поскольку течения во всех плоскостях, перпендикулярных оси вращения, будут тождественными. В этом случае остаются только тангенциальные компоненты вязкостных напряжений, для которых можно написать уравнение [3]

$$\tau = \frac{\mu \omega r^3}{r^2 \delta}, \quad (1)$$

где μ – коэффициент трения.

Касательные напряжения на поверхности вращающегося цилиндра определяются формулой, получаемой при подстановке $r = r_1$ в (1):

$$\tau_1 = \frac{\mu \omega r_1}{\delta}. \quad (2)$$

В критериальной форме это выражение принимает следующий вид:

$$f = 2/Re, \quad (3)$$

где f – коэффициент вязкостного сопротивления в канале; Re – число Рейнольдса для вращательного движения в канале, определяется по формуле

$$Re = v_n \delta \nu^{-1}, \quad (4)$$

где v_n – номинальная линейная скорость вращающегося ротора, м/с.

С учетом (2) и (3) коэффициент вязкостного сопротивления определяется выражением

$$f = 2\tau_1 / \rho v_n^2,$$

где ρ – плотность жидкого диэлектрика, кг/м³.

При больших значениях числа Тейлора влиянием вихрей Тейлора можно пренебречь, и в этом случае приемлемо допущение о турбулентном составе основного ядра потока в канале, что дает возможность аналитическими методами решить вопросы гидродинамики. В этом случае уравнение для коэффициента вязкостного сопротивления [3]

$$f Re/2 = 1700/Ta + 0.21(1 - 1700/Ta)Ta^{0.26}, \quad (5)$$

которое при числах Тейлора $Ta > 10^4$ сводится с небольшим отклонением к уравнению

$$f Re/2 = 0.22 Te^{0.26}. \quad (6)$$

Мощность гидродинамических потерь в зазоре между пакетом гладкого ротора и статором определяется по формуле

$$P_{Г.з} = \pi \rho \omega^3 D_p^4 l_p f / 16, \quad (7)$$

где D_p , l_p – диаметр и длина пакета ротора, м.

Гидродинамические потери в торцевых зонах выражают через коэффициент момента сопротивления [2]:

$$P_{Г.т} = c_M \rho \omega^3 (D/2)^5 / 4, \quad (8)$$

где c_M – коэффициент момента сопротивления; D – диаметр торцевой поверхности ротора, м.

Коэффициент момента сопротивления определяется по формуле

$$c_M = \frac{2M}{\omega^2 (\rho/2)(D/2)^2},$$

где M – момент сил вязкостного сопротивления, противодействующих вращению рассматриваемой торцевой поверхности.

Движение жидкости в пространстве между щитами и торцами вращающегося ротора аналогично течению вокруг диска, вращающегося в неподвижном кожухе, поэтому для расчета коэффициента момента сопротивления можно использовать эмпирические формулы, полученные для диска, вращающегося в кожухе [4]:

$$c_M = 3.78 Re^{-0.5} \quad (9)$$

при $5 \cdot 10^3 < Re < 10^5$;

$$c_M = 0.082 Re^{-0.2}$$

при $10^5 < Re < 10^7$.

Число Рейнольдса для движения жидкости в торцевом канале определяется как

$$Re = \frac{\omega D_p^2}{\nu}, \quad (10)$$

где ν – кинематическая вязкость жидкости, м²/с.

Гидродинамические потери, возникающие в погружном герметичном асинхронном двигателе, будут равны сумме

$$P_{\text{гидр}} = P_{\text{г.з}} + P_{\text{г.т}}. \quad (11)$$

По приведенной методике произведен расчет гидродинамических потерь погружного асинхронного электродвигателя, имеющего традиционную геометрию, при заполнении его внутреннего объема дистиллированной водой. Рассматриваемый электродвигатель имеет параметры, приведенные в таблице.

Параметр	Значение
$P_{2н}$	15 кВт
n_1	1500 об./мин
s_n	2.6 %
ω	153 рад/с
r	$9.2 \cdot 10^{-2}$ м
δ	$0.5 \cdot 10^{-3}$ м
v_n	14.06 м/с
D_p	$1.84 \cdot 10^{-1}$ м
l_p	0.13 м

Кинематическая вязкость и плотность дистиллированной воды: $\nu = 1 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $\rho = 998$ кг/м³.

Число Тейлора рассчитывается по формуле (5)

$$Ta = 153^2 \cdot 9.2 \cdot 10^{-2} \times \\ \times (0.5 \cdot 10^{-3})^3 (1 \cdot 10^{-6})^{-2} = 2.67 \cdot 10^5.$$

$Ta = 2.67 \cdot 10^5 < 2 \cdot 10^7$ – ламинарный режим течения с макровихрями, следовательно, коэффициент вязкостного сопротивления определяется по формуле (6).

Число Рейнольдса рассчитывается по формуле (4):

$$Re = 14.06 \cdot 5 \cdot 10^{-4} (1 \cdot 10^{-6})^{-1} = 7013.35.$$

Из формулы (6) следует:

$$f = \frac{0.44 \cdot (2.67 \cdot 10^5)^{0.26}}{7013.35} = 1.6 \cdot 10^{-3}.$$

Гидродинамические потери в зазоре между пакетом гладкого ротора и статором рассчитываются по формуле (7):

$$P_{\text{г.з}} = \frac{3.14 \cdot 998 \cdot 153^3 (1.84 \cdot 10^{-1})^4 \cdot 0.13 \cdot 1.6 \cdot 10^{-3}}{16} = \\ = 167.24 \text{ Вт.}$$

Число Рейнольдса для движения жидкости в торцевом канале рассчитывается по формуле (10):

$$Re = \frac{153 \cdot (1.84 \cdot 10^{-1})^2}{1 \cdot 10^{-6}} = 5.16 \cdot 10^6.$$

Число Рейнольдса находится в диапазоне $10^5 < Re < 10^7$, следовательно, коэффициент момента сопротивления вычисляется по формуле (9):

$$c_m = 0.082 \cdot (5.16 \cdot 10^6)^{-0.2} = 4 \cdot 10^{-3}.$$

Гидродинамические потери в торцевых зонах рассчитываются по формуле (8):

$$P_{\text{г.т}} = \frac{4 \cdot 10^{-3} \cdot 998 \cdot 153^3 (9.2 \cdot 10^{-2})^5}{4} = 23.56 \text{ Вт.}$$

Общие гидродинамические потери определяются по формуле (11):

$$P_{\text{гидр}} = 167.24 + 23.56 = 190.80 \text{ Вт.}$$

Приведенная методика позволяет подобрать жидкий диэлектрик, обеспечивающий наиболее эффективную работу погружного асинхронного электродвигателя. При выборе жидкого диэлектрика необходимо также учитывать вопросы достижения оптимального нагрева и возможности эффективной герметизации внутреннего объема.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ветохин В. И. Новое поколение электрических машин для работы в жидких агрессивных средах и электроприводах подводных объектов. СПб.; М.: Полтораки, 2010. 320 с.
2. Морозкин В. П., Тодос П. И., Токарев Б. Ф. Двигатели постоянного тока для подводной техники. М.: Энергия, 1977. 184 с.

3. Петров А. Г. Аналитическая гидродинамика. М.: Физматлит, 2009. 518 с.
4. Валуева Е. П., Свиридов В. Г. Введение в механику жидкости: учеб. пособие / МЭИ. М., 2001. 212 с.

A. G. Lavrov, N. S. Shkarbun

Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

PALPULATION OF HYDRODYNAMIP LOSSES IN SUBMERSIBLE ASYNPHRONOUS ELEPTRIP MOTORS

Presents a method of calculation of hydrodynamic losses arising submersible asynchronous electric motors hermetically sealed when filling the internal volume of the liquid dielectric. According to the above method calculated the hydrodynamic losses for submersible asynchronous electric motor, the internal volume of which is filled with distilled water.

Submersible electric motor, asynchronous electric motor, hermetically sealed, liquid dielectric, hydrodynamic losses, method of calculation, calculation of losses

УДК 621-075.8

А. П. Темирев, Нгуен Куанг Кхоа

Южно-Российский государственный политехнический университет им. М. И. Платова (НПИ)

Методика определения коэффициентов подобия вентильно-индукторных двигателей большой мощности двухпакетной конструкции

Предложена методика определения коэффициентов электромагнитного подобия для вентильно-индукторных двигателей двухпакетной конструкции на основе расчетных и экспериментальных данных с реализованными образцами вентильно-индукторных двигателей малой мощности.

Вентильно-индукторный двигатель, вентильно-индукторная машина, электромагнитное подобие

В последнее пятилетие в Российской Федерации активно развиваются вентильно-индукторные машины (ВИП) большой мощности (ВИП БМ), и можно говорить о формировании нового класса вентильных электроприводов, конкурентоспособных с традиционными регулируемые электроприводами. Это объясняется хорошими удельными показателями ВИМ, недорогой технологией их производства, конструктивной простотой и надежностью, длительной эксплуатацией в условиях жестких климатических и механических воздействий [1]. Более того, в практике доказаны преимущества двухпакетной конструкции для ВИД БМ: 1 – высокая энергоэффективность за счет потребления из сети только мощности потерь; 2 – уменьшенные пульсации момента; 3 – уменьшенные финансовые затраты за счет исключения нагрузочной машины с силовым преобразователем, соединительной муфты между двигателем и генератором,

юстировки валов двигателя и генератора, датчиков скорости и моментов.

Однако теоретические и практические исследования ВИП БМ носят эпизодический, разрозненный характер. Недостаточно разработана методика сравнения многочисленных возможных вариантов конфигурации магнитной системы и выбора главных размеров активной части ВИМ БМ. Таким образом, в настоящее время актуальна задача создания методики проектирования ВИМ БМ двухпакетной конструкции на базе теории электромагнитного подобия, известных результатов теоретических и практических исследований. В данной работе предлагается методика определения коэффициентов электромагнитного подобия для вентильно-индукторных двигателей (ВИД) двухпакетной конструкции на основе расчетных и экспериментальных данных реализованных образцов ВИД малой мощности. На базе