

# ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ОТРАСЛЕЙ НАРОДНОГО ХОЗЯЙСТВА И МЕДИЦИНЫ

---

*Инж. С.А.Васюков, канд. техн. наук М.Е.Коварский,  
канд. техн. наук В.В.Лопатин, канд. техн. наук Н.Н.Плецунов,  
инж. С.Ф.Самойлов*

## ПОГРУЖНЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ ДЛЯ НЕФТЕДОБЫЧИ

Погружные асинхронные электродвигатели для привода нефтяных насосов выпускаются рядом зарубежных и отечественных фирм (Reda, Centrilift, Алнас) мощностью от 22 до 250 кВт на частоту 50 Гц напряжением 1000÷2000 В. Двигатели выпускаются в комплекте с аппаратурой, осуществляющей пуск и защиту электродвигателей.

Электродвигатели предназначены для работы при давлении до 200 атм и температуре окружающей среды до 90<sup>0</sup>С. Выполняются погружными, внутренняя полость двигателя заполняется жидкостью, компенсирующей внешнее давление пластовой жидкости и обеспечивающей смазку подшипниковых узлов.

Только в РФ требуются десятки тысяч электроустановок. Срок службы электродвигателей до капитального ремонта составляет порядка года и двух лет отечественного и зарубежного производства, соответственно. Срок службы после ремонта достигает примерно половины ресурса новых двигателей. Короткий срок жизни электроустановок требует ежегодного пополнения парка электроустановок. Основными недостатками выпускаемых двигателей являются:

- большие удельные размеры (длина и диаметр);
- отсутствие возможности глубокого регулирования и адаптации к параметрам промысла;
- низкий КПД и  $\cos\phi$  и, как следствие, высокое удельное потребление электроэнергии;
- низкий ресурс работы.

Новое поколение электроприводов для погружных насосных установок должно иметь сокращенную минимум в 4 раза длину, внешний диаметр не более 106 мм, возможность глубокого регулирования расхода и напора пластовой жидкости, высокий КПД и возможность автоматизации технологического процесса.

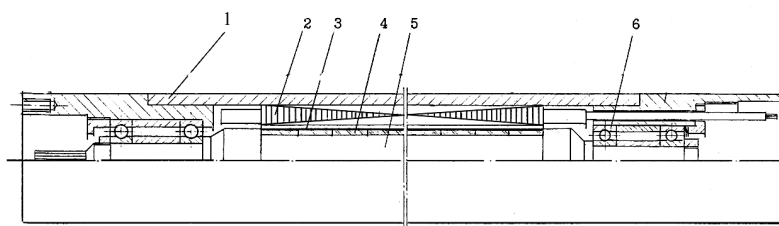
Таким требованиям удовлетворяет синхронный двигатель (СД) с возбуждением от постоянных магнитов из редкоземельных материалов, питающийся от преобразователя частоты, который имеет:

- потенциально большой ресурс работы;
- минимальные массогабаритные показатели;
- минимальное энергопотребление;
- возможность глубокого регулирования частоты вращения.

Проектирование двигателя проводилось на основе компьютерных методик, разработанных в НПП ВНИИЭМ. Расчет двигателя содержал:

- определение основных размеров и параметров машины и выбор оптимальных параметров питающей сети;
- определение геометрии магнитов и воздушного зазора, обеспечивающей гармоническую волну м.д.с. в зазоре.

Исходными данными для определения главных размеров являлись максимальный диаметр погружной части 120 мм, что определило внешний диаметр двигателя 106 мм и внутренний диаметр статора в пределах 45-55 мм в зависимости от числа полюсов (толщины ярма), механической прочности ротора и критической скорости. Конструктивная основная расчетная схема СД изображена на рис. 1.



**Рис. 1. Конструктивная схема двигателя:**

- 1 - корпус; 2 - пакет статора с обмоткой; 3 - титановая гильза;  
4 - постоянные магниты; 5 - вал ротора; 6 - подшипник**

Для анализа влияния конструктивных параметров СД, был рассмотрен ряд вариантов исполнения машин:

$$\begin{aligned} P &\approx 32 \text{ кВт}; \\ n &= 10000 \text{ об/мин}; \\ 2p &= 4, 6, 8; \\ \delta &= 0,9, 1,5, 3,0 \text{ мм}; \\ D_a &= 106 \text{ мм}; \\ U_M &= 1500 \text{ В}. \end{aligned}$$

Критерием отбора вариантов являлось отсутствие критических колебаний ротора в рабочем диапазоне частот, минимальные габариты СД, минимальные гидравлические (механические) и электромаг-

нитные (тепловые) потери в якоре, а также другие конструктивные соображения, обеспечивающие достаточный ресурс работы машины.

Условия работы в среде пластовой жидкости при высоких давлениях предполагают заполнение внутренней полости двигателя жидкостью (для выравнивания давлений) и надежное конструктивное решение гидрозащиты от поступления внутрь двигателя грязной пластовой жидкости. Однако вращение ротора с большой скоростью в среде заполняющей жидкости приводит к значительным потерям на трение, уменьшающим КПД двигателя.

Спецификой работы двигателя является то, что значительная часть потерь зависит не от нагрузки двигателя, а от частоты его вращения на холостом ходу.

В результате расчета ряда вариантов был принят вариант 6-ти полюсного двигателя со следующими размерами: наружный диаметр корпуса 106 мм, внешний диаметр пакета статора 95 мм, диаметр ротора 55 мм, длина пакета статора и ротора 520 мм, зазор 0,9 мм, число пазов 18.

Для определения оптимальной геометрии воздушного зазора проведено моделирование электромагнитного поля в воздушном зазоре.

Расчет проводился методом конечных элементов. Расчетный элемент зазора представлен на рис.2.

В табл.1 представлены результаты исследования влияния величины воздушного зазора на величину и гармонический состав магнитного поля в зазоре.

Таблица 1

**Амплитуда  $\nu$ -гармонической радиальной составляющей магнитного поля  $B_{r \max \nu}$  для различной величины воздушного зазора**

$\delta \setminus \nu$	Поверхность	1	3	5
0,9	Якорь	1,14	0,3	0,2
	Ротор	1,17	0,3	0,2
2	Якорь	0,755	0,142	0,037
	Ротор	0,84	0,21	0,9
3	Якорь	0,58	0,12	0,09
	Ротор	0,67	0,187	0,1

В табл.2 показаны результаты исследования влияния длины магнитного клина, размещенного между полюсами на поле в воздушном зазоре. Введен коэффициент полюсного перекрытия  $\alpha = \Theta_{\text{магн}} / \tau$ , где  $\Theta_{\text{магн}}$  - угловая длина магнита, рад;  $\tau$  - полюсная дуга, рад.

Таблица 2

Амплитуда  $\nu$ -гармонической радиальной составляющей магнитного поля  $B_{r \max \nu}$  для различной величины  $\alpha$

№№	$\alpha \setminus \nu$	Поверхность	1	3	5
1	0,92	Якорь	1,14	0,3	0,2
		Ротор	1,17	0,3	0,2
2	0,8	Якорь	1,11	0,186	0,07
		Ротор	1,13	0,192	0,046
3	0,667	Якорь	0,9	0,047	0,09
		Ротор	1,02	0,04	0,12
4	0,6	Якорь	0,916	0,167	0,104
		Ротор	0,94	0,169	0,14
5	0,5	Якорь	0,607	0,405	0,144
		Ротор	0,62	0,42	0,14

Оптимальным является вариант № 3, который соответствует минимуму добавочных потерь.

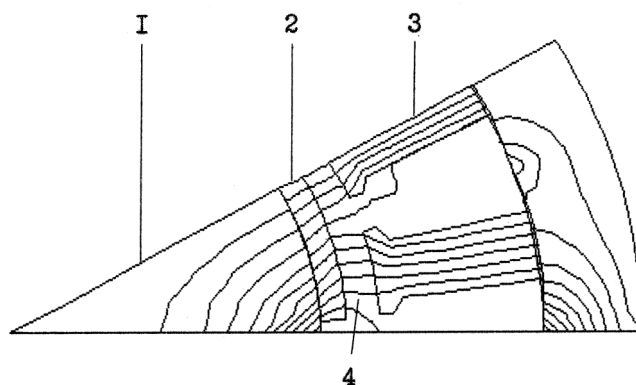


Рис. 2. Расчетный элемент зазора:  
1 – ротор; 2 – магнит; 3 – зубец статора; 4 – воздушный зазор

В двигателе применена электротехническая сталь 2421 с удельными потерями  $P_1/400 = 19,5$  Вт/кг, а также сталь 1521 (ГОСТ 21.427) с удельными потерями  $P_1/400 = 12,5$  Вт/кг.

В качестве обмоточного провода применены круглые провода с усиленной пленочно-фторопластовой изоляцией.

Для ротора двигателя применены высококоэрцитивные постоянные магниты из композиций неодим-бор или самарий-кобальт с остаточной индукцией порядка 1 Тл и коэрцитивной силой 870 кА/м. Магниты из материала самарий-кобальт применяются при максимальных рабочих температурах.

На вал ротора магниты приклеиваются и удерживаются от центробежных сил тонкостенной титановой гильзой. В двигателе применены сдвоенные шариковые подшипники, что предъявляет повышенные требования к защите от проникновения внутрь двигателя абразивных частиц из пластовой жидкости.

Испытания электродвигателей проводились в три этапа: заводские испытания; испытания в составе насосной установки; испытания в натуральных условиях в нефтяных скважинах.

При заводских испытаниях контролировались электрическая прочность, сопротивление изоляции и омическое сопротивление обмоток, а также исследовались потери холостого хода, в частности потери в стали и в жидкости, заполняющей полость двигателя.

Испытания при холостом ходе проводились на стенде при питании двигателя от электромашинного агрегата, состоящего из двигателя постоянного тока и синхронного генератора. Двигатель агрегата питался в свою очередь от агрегата, состоящего из асинхронного двигателя и генератора постоянного тока с независимым возбуждением. Регулировкой возбуждения генератора постоянного тока изменялось напряжение двигателя агрегата переменного тока и частота в пределах 200-500 Гц. Определение потерь в стали производилось при незалите двигателя, после чего двигатель заливался маслом и определялись полные потери холостого хода. Потери холостого хода определялись при минимальном потребляемом токе (при cosφ, близком к единице). Особое внимание обращалось на температурный режим двигателя, который без интенсивного внешнего охлаждения длительное время работать не мог. Максимальная температура корпуса, измеряемая термопарой ограничивалась  $\approx 100$  °С. Потери в стали при частоте вращения 10000 об/мин (500 Гц) составили от 3,7 до 2,6 кВт для партии машин со сталью 0,35 мм и от 2,0 до 1,4 кВт для машин со сталью 0,18 мм. Потери в жидкости находились в пределах 2,4-1,4 кВт в зависимости от температуры нагрева жидкости. Потери в подшипниках составляли примерно 250 Вт, потери в обмотке – 100-150 Вт. Потери в стали изменяются от частоты в степени 1,5, потери в жидкости от частоты вращения – в квадрате.

С целью проведения испытаний двигателей под нагрузкой, в том числе от преобразователя частоты, был изготовлен стенд, позволяющий испытывать одновременно 2 двигателя (один из них в

качестве нагрузочного генератора на активную нагрузку). Соединенные наглухо с помощью шлицевой втулки два двигателя помещались в трубу, через которую прокачивалась охлаждающая жидкость (трансформаторное масло). Это позволяло проводить длительные испытания при нагрузках от холостого хода до номинальной. В качестве нагрузки использовались элементы активных сопротивлений, образующих 3 ступени нагрузки 10,8, 16,9 и 27,7 кВт при частоте 500 Гц. При этом потребление двигателя составляло 21,6, 27,6 и 38,5 кВт и общие потери двигателя и генератора составляли  $\approx 11$  кВт. При этом КПД агрегата из двух машин равнялся 0,5, 0,61 и 0,72.

Промысловые условия эксплуатации электродвигателей чрезвычайно сложные. Характеризуются высокой температурой и давлением окружающей среды. Кроме этого охлаждение электродвигателей осуществляется за счет движения откачиваемой пластовой жидкости. В режимах больших напоров и малых расходов двигатели остаются практически без охлаждения. Такой режим не опасен для традиционных асинхронных двигателей, имеющих развитую поверхность охлаждения, но может вызывать недопустимые перегревы сильно использованных высокочастотных приводов.

Для исследования работы двигателя проводились промышленные испытания на нефтепромыслах Тюмени<sup>1</sup>. За период испытаний новыми электронасосными установками было добыто несколько десятков тысяч тонн нефти. Новые электроустановки легко монтируются в условиях завода, транспортируются в собранном виде и устанавливаются на рабочем месте.

Электропривод показал высокую технологичность эксплуатации, простоту и гибкость настройки режима добычи. Результаты испытаний в целом оцениваются положительно. Вместе с тем ресурс работы двигателя необходимо увеличить. Основные отказы двигателя происходили вследствие разрушения подшипников качения и пробоя изоляции. Причин разрушения подшипников несколько:

- размывание компаунда и попадание абразива в подшипники;
- попадание абразива вместе с пластовой жидкостью;
- деструкция наполнителя – трансформаторного масла – при температурах выше температуры воспламенения ( $\approx 130$  °С).

Решить эту проблему возможно или установкой подшипников скольжения, или герметичным исполнением машины за счет использования магнитной муфты, обеспечивающим чистоту узлов качения. Оба варианта находятся в стадии разработки.

---

<sup>1</sup>Испытания проводились совместно с Е.М.Черемисиновым, руководителем КБ «Нефтемаш».