

## Криогенная топливная помпа с приводом от электродвигателя с высокотемпературным сверхпроводниковым ротором

Л.К. Ковалев<sup>1</sup>, К.В. Илюшин<sup>1</sup>, В.Т. Пенкин<sup>1</sup>, К.Л. Ковалев<sup>1</sup>, И.И. Акимов<sup>2</sup>, Л.Г. Вержбицкий<sup>3</sup>,  
В.П. Логвинюк<sup>4</sup>, Д. Дью-Хьюз<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Московский Авиационный Институт (МАИ), Москва, Россия

<sup>2</sup>Всероссийский Научно-Исследовательский Институт Неорганических Материалов им. А.А. Бочвара (ВНИИНМ), Москва, Россия

<sup>3</sup>Научно-Исследовательский Институт Электромеханики (НИИЭМ), Истра, Московская обл., Россия

<sup>4</sup>ОАО Туполев, Москва, Россия

<sup>5</sup>Оксфордский университет, Оксфорд, Великобритания

Применение сверхпроводников в электрических машинах весьма привлекательно с точки зрения улучшения массогабаритных показателей. Снижение массы и размеров электрических машин существенно как для аэрокосмической, так и для общепромышленной техники, поскольку обеспечивает улучшение массоэнергетических показателей и увеличение коммерческой нагрузки. В ряде научных центров в США, Германии и России исследуются возможности применения криогенного авиационного топлива. В этой связи одним из возможных применений сверхпроводниковых электрических машин являются криогенные топливные погружные насосы [1].

В работах [1 - 3] проведён анализ перспектив применения объёмных высокотемпературных сверхпроводниковых (ВТСП) материалов в роторах некоторых типов бесконтактных электрических машин. Было показано, что в различных типах класса синхронных электрических машин могут быть использованы следующие свойства сверхпроводников:

- способность ВТСП элемента захватывать постоянное магнитное поле;
- явление гистерезиса при перемагничивании;
- диамагнитные свойства ВТСП элемента.

Отсюда следует возможность разработки трёх типов ВТСП электродвигателей: моторы с замороженным потоком, гистерезисные и реактивные электродвигатели [2].

В результате проведённого анализа показано, что все типы электрических машин с ВТСП роторами имеют лучшие КПД и коэффициент мощности в сравнении с аналогичными машинами традиционного исполнения.

Для применения в роторе электропривода рассматривались иттриевая керамика YBCO и листовый композит на основе висмутовой керамики BSCCO в серебряной матрице (рисунок 1).

Экспериментальные исследования показали, что при температурах, близких к 80К, YBCO обладает лучшими магнитными свойствами. При температуре жидкого водорода 20,5К, рассматриваемого в качестве авиационного топлива, электромагнитные характеристики обоих материалов примерно одинаковы.



Объёмные пластины из YBCO



Композит из BSCCO/Ag толщиной 0,3мм



Сечение композитного листа с 10-ю слоями ВТСП

Рис. 1. Внешний вид ВТСП элементов

Из трёх указанных типов машин с ВТСП ротором для привода криогенной помпы был выбран 4-х полюсный реактивный двигатель. Максимальный момент на валу реактивного электромотора определяется отношением магнитных проводимостей по оси  $d$  полюса и ей перпендикулярной оси  $q$ . В отличие от традиционных реактивных электродвигателей, в ВТСП реактивных машинах немагнитные материалы ротора заменены ВТСП элементами, обладающими диамагнитными свойствами. Это позволяет существенно увеличить отношение магнитных проводимостей по указанным осям. Данные теоретических и экспериментальных исследований показывают [2], что ВТСП реактивный электродви-

гатель в среде жидкого азота имеет массогабаритные параметры в 3-5 раз лучше в сравнении с обычным реактивным или асинхронным электродвигателем при коэффициенте мощности 0.7 - 0.8. Хорошие пусковые свойства достигаются благодаря тому, что стальной нешихтованный сердечник ротора формирует гистерезисный и асинхронный пусковые моменты.

На рисунке 2 показан поперечный разрез 4-х полюсного реактивного ВТСП ротора с композитной структурой, состоящей из стального сердечника и чередующихся стальных и ВТСП слоёв, которые работают как концентраторы магнитного потока.

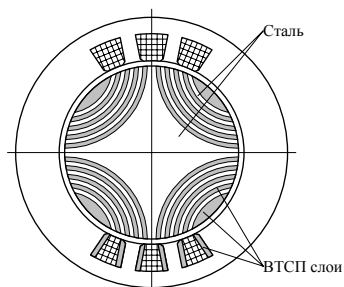


Рис. 2. Конструкция 4-х полюсных реактивных ВТСП электродвигателей

Такая конструкция обеспечивает наилучшие КПД и коэффициент мощности. Для исключения кавитации использована 4-х полюсная магнитная система ротора и статора, обеспечивающая при частоте напряжения бортовой сети 400Гц частоту вращения 12000 мин<sup>-1</sup>.

Распределение магнитного поля, основные индуктивные параметры и момент на валу электродвигателя были определены из решения двумерных электродинамических задач с соответствующими граничными условиями.

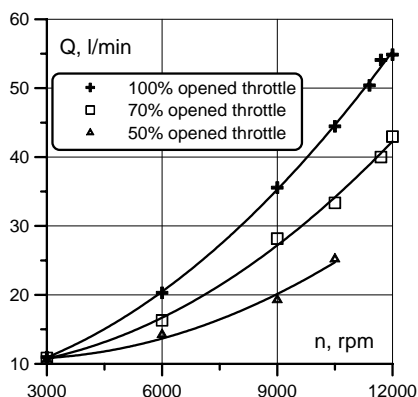


Рис. 3. Объёмный расход в функции частоты вращения при различном дросселировании

Разработанный реактивный ВТСП электродвигатель встроен в центробежную топливную помпу, разработанную ОАО ТУПОЛЕВ для самолёта КРИОПЛАН. Испытания помпы проводились в среде жидкого азота. Получены зависимости давле-

ния от расхода, а также зависимость расхода от частоты вращения ротора. Результаты испытаний приведены на рисунках 3-4.

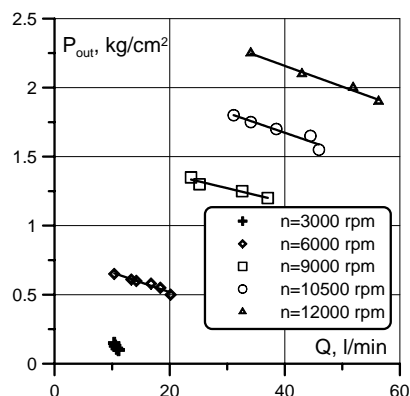


Рис. 4. Напор-расходные характеристики для разных частот вращения

Криогенная помпа обладает стабильными выходными параметрами в широком диапазоне частот вращения.

Данная работа была выполнена в рамках программы НАТО «Наука ради мира» (Проект SfP#974241)

1. Dew-Hughes, D., McCulloch, M.D., Jim, K., Aldwinckle, J., Barnes, G., Jones, G., Gaines, J. R. and Sengupta, S., *Advances in Cryogenics* 45, 1477 (2000).

2. Kovalev, L. K., Ilushin, K. V., Koneev, S. M.-A., Kovalev, K.L., Penkin, V. T., Poltavets, V. N., Gawalek, W., Habisreuther, T., Oswald, B. and Best, K.-J., *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, 9 pp.1261 – 1263 (1999).

3. Kovalev, L. K., Ilushin, K. V., Penkin, V. T., Kovalev, K. L., Koneev, S. M.-A., Modestov, K. A., Larionov, S. A., Akimov, I.I. and Dew-Hughes, D., *Physica C*, 372-376, pp.1524-1527 (2002).