

УДК 621.313.32

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕРЬ НА ТРЕНИЕ В РЕЖИМЕ ХОЛОСТОГО ХОДА СИНХРОННОГО ВТСП-ДВИГАТЕЛЯ

Е. Н. Андреев,

ведущий инженер

Д. А. Волков,

ассистент

А. Р. Орлов,

заведующий лабораторией

С. С. Тимофеев,

старший преподаватель

М. А. Турубанов,

аспирант

Л. И. Чубраева,

член-корр. РАН, доктор техн. наук, профессор

В. Ф. Шишлаков,

доктор техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Рассмотрены вопросы, связанные с экспериментальным определением механических потерь, возникающих в погружных высокотемпературных сверхпроводниках синхронных двигателей. Изготовлена специальная модель для проведения исследований в различных средах: в жидком азоте, воде, газообразном азоте, при вращении на воздухе. Проанализированы потери холостого хода при вращении роторного диска в жидком азоте. Приведены результаты экспериментального определения времени выбега ротора в различных средах.

Ключевые слова — дисковая электрическая машина, высокотемпературная сверхпроводимость, постоянные магниты, механические потери, потери холостого хода.

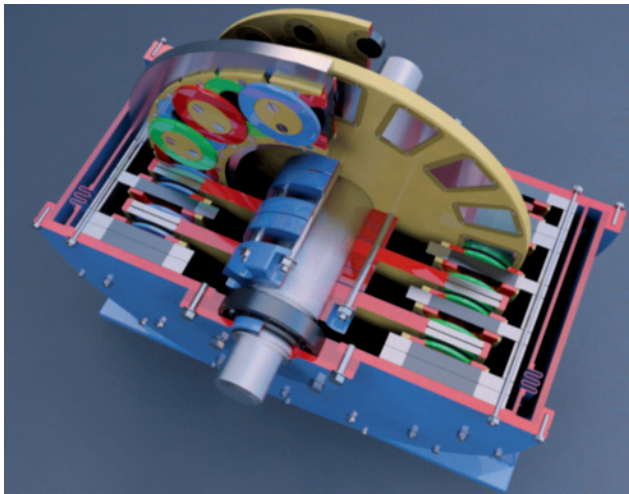
Введение

Применение дисковых бесконтактных генераторов и двигателей с постоянными магнитами на роторе обусловлено их более высокими удельными энергетическими и массогабаритными показателями, улучшенными динамическими характеристиками, отсутствием щеточно-контактного узла. Дисковые машины целесообразно использовать, в частности, в механизмах, у которых существуют ограничения по массогабаритным показателям. Кроме того, они являются высокомоментными электромеханическими преобразователями энергии и находят применение в ветроэнергетических установках, в гребных двигателях и др. Сравнительно широкое применение этих машин в прикладной сверхпроводимости связано с возможностью существенно упростить

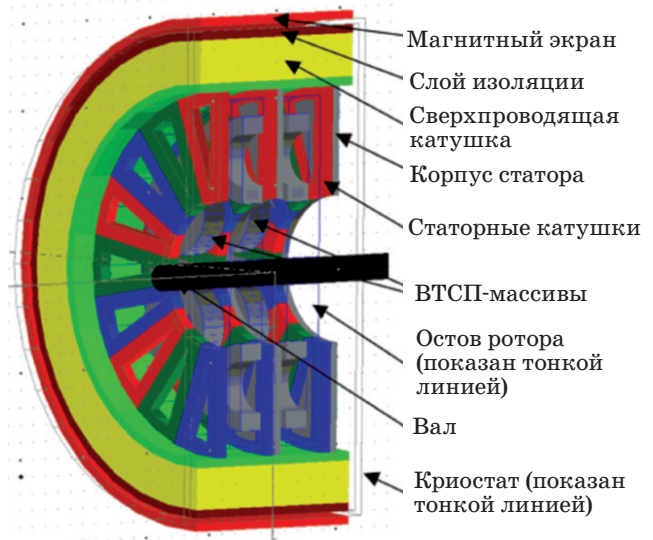
геометрию элементов (как массивов, так и ленточных обмоток) высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП).

Дисковые сверхпроводниковые машины

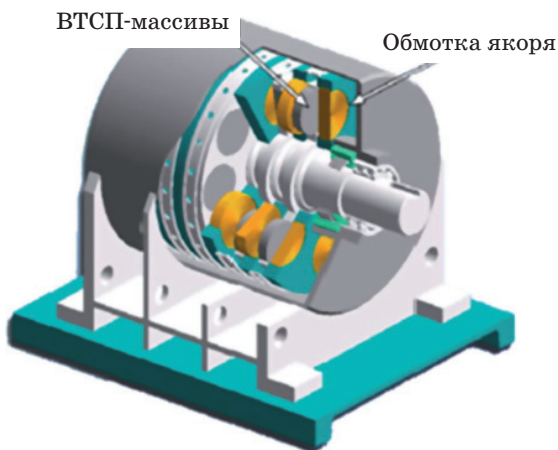
Первая сверхпроводниковая синхронная машина была изготовлена и испытана во ВНИИ-электромаш (Ленинград) в 80-е гг. XX в. Она имела круглые обмотки из низкотемпературных сверхпроводников (Nb-Ti и Nb₃Sn) на роторе и на статоре, работала в жидком гелии, и снижение потерь на трение достигалось подбором величины воздушного зазора и частоты вращения ротора. Так появилась первая 8-полюсная дисковая синхронная машина. Дополнительным преимуществом четного числа пар полюсов явилась возможность размещать обмотки статора не в три,



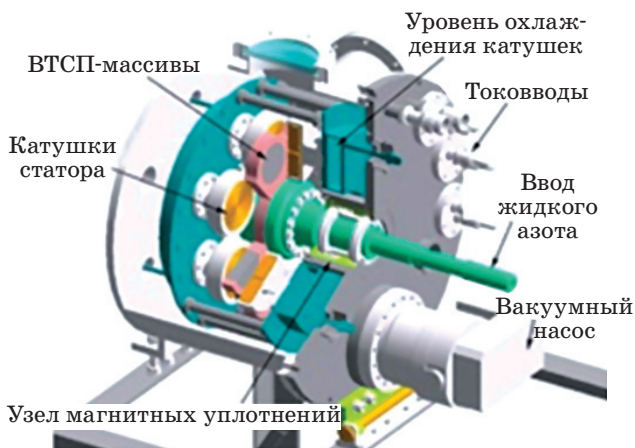
■ Рис. 1. Принципиальная конструктивная схема многодискового синхронного двигателя мощностью 50 кВт (Санкт-Петербург, НИИ ИТЭЭ ГУАП)



■ Рис. 4. Конструкция ВТСП многодисковой машины (США)



■ Рис. 2. Многодисковый синхронный ВТСП-двигатель (Япония)



■ Рис. 3. Дисксовая машина фирмы KINATO SEIKI Co., LTD (Япония)

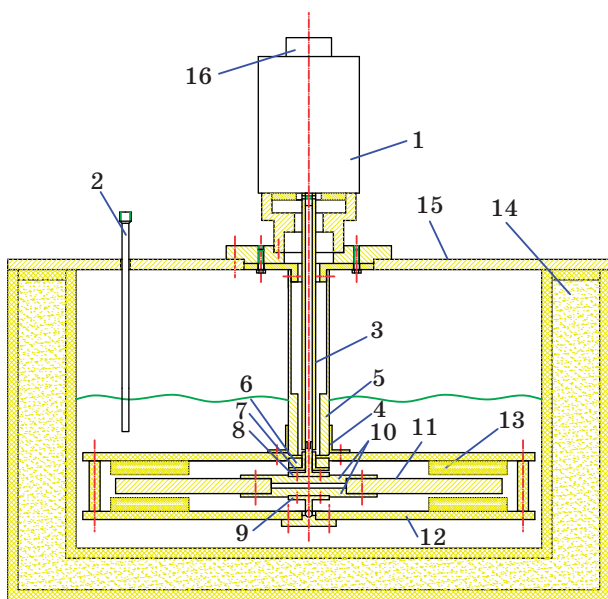
а в два слоя, что увеличило величину поля возбуждения в зоне обмотки якоря. Мощность машины не превышала единиц мегаватт, но при ее исследованиях удалось получить экспериментальные данные о полностью сверхпроводниковой машине без электромагнитного экрана на роторе. В дальнейшем были изготовлены аналогичные машины с обмотками ротора и статора из высокочистого алюминия, с постоянными магнитами и массивами из ВТСП на роторе, с обмоткой возбуждения из отечественного ленточного ВТСП. В результате был получен широкий спектр экспериментальных данных, что позволило нам перейти к созданию высокомоментного ВТСП-двигателя для автономной энергетической установки (рис. 1) [1, 2].

В дальнейшем аналогичные машины с одним роторным диском были изготовлены и испытаны в Венгрии, Германии, Испании и других странах. На рис. 2–4 показаны варианты многодисковых ВТСП-машин, разработанных в Японии и США.

Экспериментальное определение потерь при вращении ротора в жидкой и газообразной среде

Экспериментальные исследования многодискового ВТСП-двигателя погружного типа показали, что довольно трудно выделить механические и тепловые потери, возникающие при вращении роторных дисков в жидком азоте. Для определения характера изменения этих потерь была изготовлена специальная модель (рис. 5).

Общий вид модели, имитирующей ротор и два статора дисксовой машины, закрепленной на



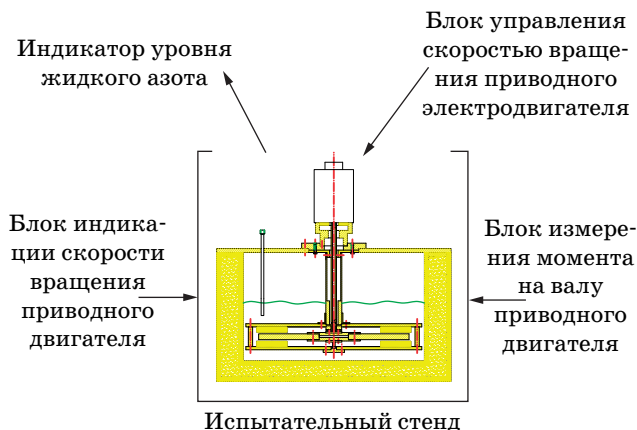
■ Рис. 5. Конструктивная схема экспериментальной установки для определения потерь на трение ротора в жидкой и газообразной среде: 1 — двигатель постоянного тока; 2 — уровнемер; 3 — приводной вал; 4 — 7 — элементы подвеса; 8 — 10 — элементы крепления диска ротора; 11 — диск ротора; 12 — основание; 13 — диски статора; 14 — криостат; 15 — крышка криостата; 16 — датчик скорости

крышке криостата, показан на рис. 6. Диаметр роторного диска 560 мм, толщина 22 мм. Конструкция модели позволяет изменять величину физического зазора между ротором и статором в диапазоне от 6 до 30 мм.

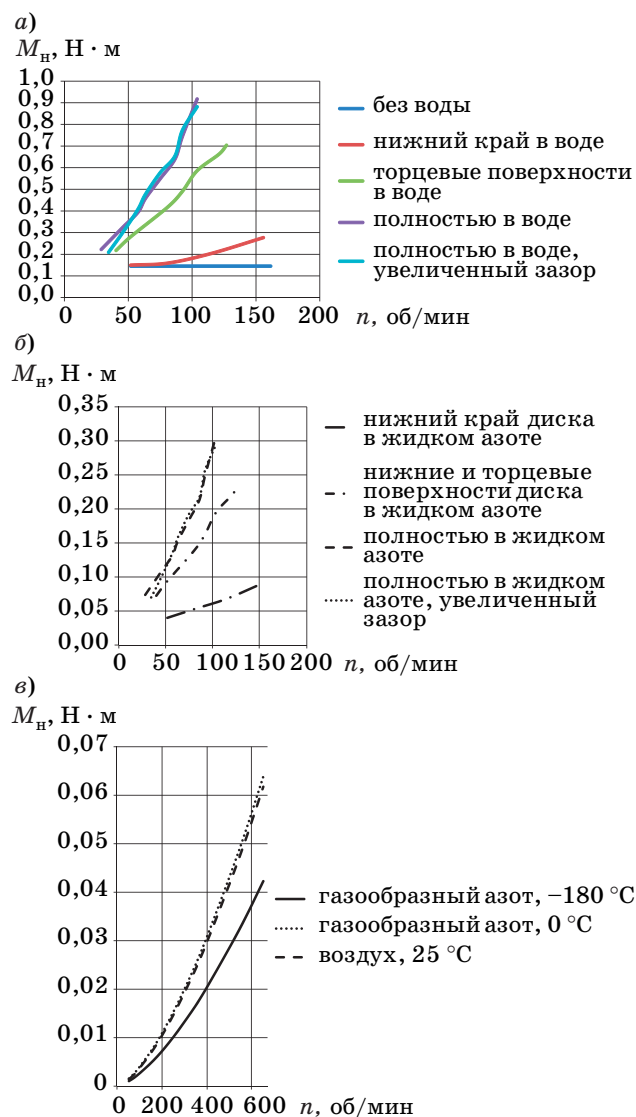
Функциональная схема исследовательской установки на базе испытательного стенда изображена на рис. 7.



■ Рис. 6. Общий вид модели перед установкой в криостате



■ Рис. 7. Схема исследовательской установки

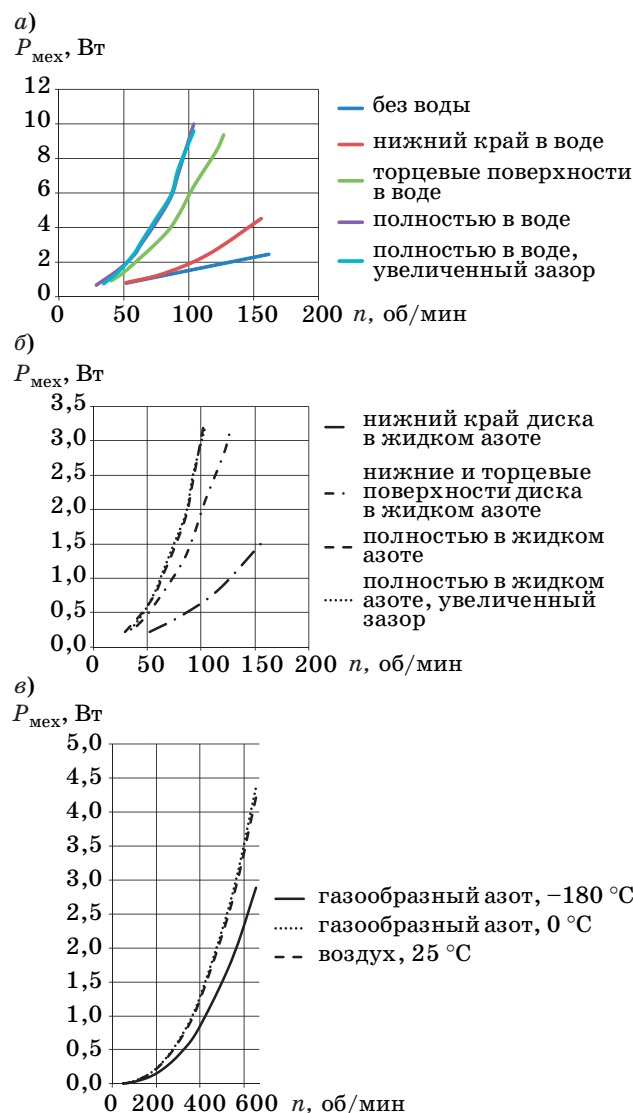


■ Рис. 8. Нагрузочная характеристика при вращении ротора в воде (а), в жидком азоте (б) и в среде газообразного азота и воздуха при различных температурах (в)

Механические потери определялись на холостом ходу путем измерения действующего значения тока якоря приводного двигателя при изменении скорости вращения ротора модели ВТСП синхронного электродвигателя в диапазоне от 0 до 400 об/мин при фиксированной и изменяющейся величине зазора между вращающимся ротором и неподвижным статором.

Измерения проводились в трех средах — в воде, на воздухе, в среде жидкого и газообразного азота. В результате определены величины моментов трения при вращении ротора модели и мощность потерь.

Тепловые потери оценивались по падению уровня жидкого азота до начала и в процессе вра-



■ Рис. 9. Зависимость потерь на трение от частоты вращения в воде (а), в жидком азоте (б) и в среде газообразного азота и на воздухе при различных температурах (в)

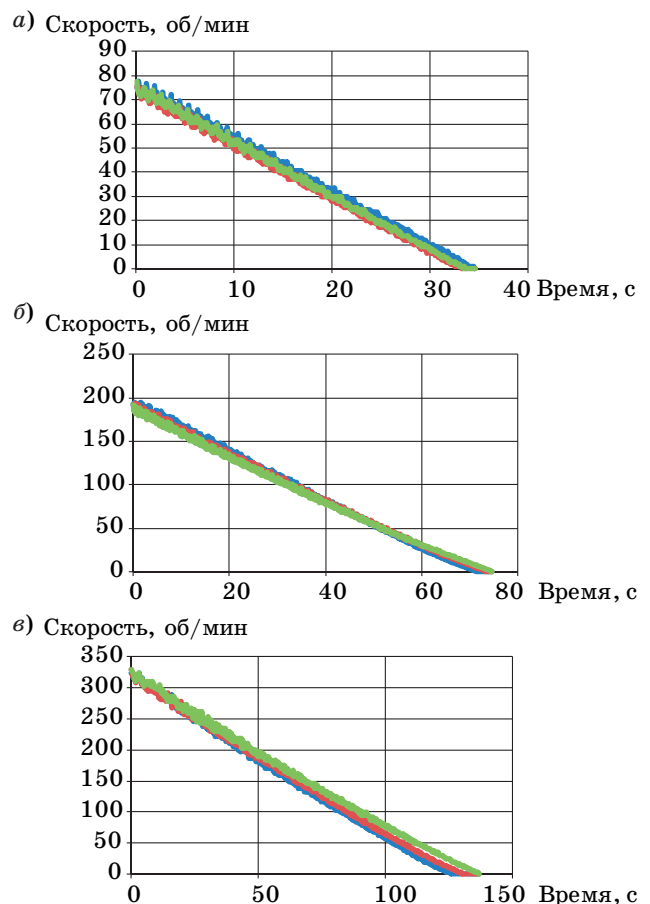
щения ротора масштабной модели в единицу времени.

Графики нагрузочных характеристик и зависимостей величины потерь от частоты вращения ротора представлены на рис. 8, а—в и 9, а—в соответственно.

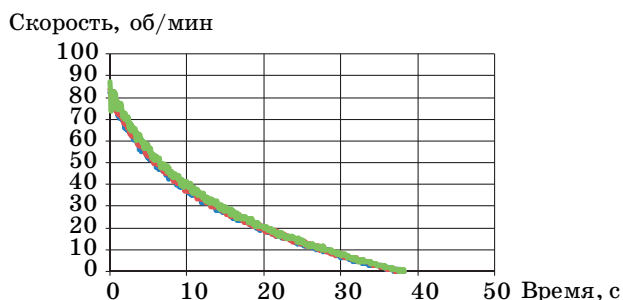
Таким образом, полученные экспериментальные данные показывают, что в многодисковой синхронной машине погружного типа потери при вращении ротора на холостом ходу находятся на приемлемом уровне. При работе двигателя под нагрузкой происходит испарение азота под действием потерь, выделяющихся в обмотке статора, азот переходит в газообразное состояние и потери дисков на трение резко уменьшаются.

Определение выбега ротора

В ходе эксперимента проводился разгон установки до определенного значения частоты вращения, после чего приводной двигатель отключался и фиксировался переходный процесс по скорости. Исследования проводились при вращении на воздухе и в воде.



■ Рис. 10. Выбег установки на воздухе при частоте вращения 75 (а), 192 (б) и 327 (в) об/мин



■ Рис. 11. Выбег установки в воде при частоте вращения 84 об/мин

Измерения проводились в три этапа для одних и тех же начальных условий: для трех скоростей на воздухе: 75, 192 и 327 об/мин; и для одной скорости 84 об/мин в воде. Среднее время выбега при вращении ротора составило 33,7; 72,9; 130,5 и 37,6 с соответственно. Результаты иллюстрируют рис. 10, а–в и 11.

На основании экспериментальных данных можно говорить о том, что уровень запасенной кинетической энергии влияет на время выбега. Время выбега многодисковой машины будет значительно больше, поскольку запасенная кинетическая энергия увеличится пропорционально количеству дисков. К сожалению, ограниченная мощность приводного двигателя не позволила оценить зависимости времени от частоты вращения в жидкой среде, поскольку при такой низкой частоте вращения кинетическая энергия ротора невелика. При номинальной частоте вращения 375 об/мин жидкая среда позволит уменьшить время выбега. Это может быть использовано при необходимости быстро остановить ротор.

Заключение

Высокомомментные дисковые синхронные электрические машины представляют интерес как низкооборотные двигатели, в частности в системах электродвижения судов, и как генераторы в ветроэнергетических установках.

Разработанная модель для исследования механических потерь в ВТСП машинах погружного типа позволила получить уникальные экспериментальные данные.

Потери на трение диска в жидких средах в режиме холостого хода являются относительно большими, но в режиме нагрузки жидкий азот переходит в газообразное состояние и потери резко снижаются.

Снижение времени выбега в жидкой среде говорит о том, что для ускорения торможения двигателя необходимо увеличить подачу жидкого азота.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации: контракт № 20.740.11.0070.

Литература

1. Чубраева Л. И. и др. Совместная работа ВТСП устройств автономной электроэнергетической установки // Сверхпроводимость. 2009. № 14. С. 15–32.
2. Чубраева Л. И. и др. Автономная электроэнергетическая установка с использованием высокотемпературных сверхпроводников // Сверхпроводимость. 2009. № 14. С. 7–13.