

*Канд. техн. наук В.А. Круглин, инж. С.Ф. Самойлов*

### **ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ ГРЕБНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЯ**

В последние десятилетия практически во всех развитых странах активно ведутся научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию электроэнергетических систем с использованием сверхпроводниковых (СП) материалов. Сверхпроводники открывают путь к созданию электромагнитных устройств с такой величиной индукции и энергии магнитного поля, которую традиционными способами практически достичь невозможно. Однако на пути промышленного освоения сверхпроводниковых электротехнических устройств стоит весьма непростая задача обеспечения необходимой для работы температуры сверхпроводника в магнитной системе (МС). Эта температура находится на криогенном уровне в диапазоне  $4,2 \div 12,0$  К, одновременно следует обеспечить такую степень криостатирования магнитной системы, при которой сохраняется указанный уровень температуры МС при всех режимах работы.

Усилия ученых и инженеров при создании сверхпроводниковых магнитных систем сосредоточены прежде всего на тех направлениях, где принципиальным и обязательным является достижение максимальной единичной мощности при минимальных массогабаритных показателях и высоком коэффициенте полезного действия изделия при длительном сроке его службы. Создание корабельных систем электродвижения (СЭД) с мощными сверхпроводниковыми гребными электрическими двигателями (ГЭД) для надводных и подводных кораблей является одним из таких направлений.

Крупнейшие судостроительные и электромашиностроительные компании работают над совершенствованием движительной системы судов и кораблей различного класса, применяя в СЭД криогенные СП ГЭД и криотурбогенераторы.

В Японии в 1991 г. был проведен Международный симпозиум по научным и техническим проблемам создания судовых СП СЭД.

На этом форуме ведущих судостроительных и электротехнических фирм были представлены английские фирмы: «Motor Ship»,

«IRD», Министерство обороны и др.; американские фирмы: «General Dynamics», «Naval Underwater Systems Center», «Shipbuilding and Dry Dock Co», «Massachusetts Institute of Technology»; японские фирмы: «Nishishiba Electric Co», «Mitsubishi Heavy Industries Co», «Toshiba Corp.»; предприятия Германии, Франции, Италии, Китая, СССР и других стран. В докладах участников симпозиума были изложены достигнутые разработчиками результаты исследований и сформулированы основные задачи в области энергетики СЭД с использованием новейших достижений науки.

Следует отметить, что уже на тот момент - почти десять лет назад - специалисты Японии продемонстрировали участникам симпозиума в порту г. Кобе первое натурное судно «Ямото» со сверхпроводниковым магнетогидродинамическим движителем, находившееся на этапе ходовых испытаний [1,2].

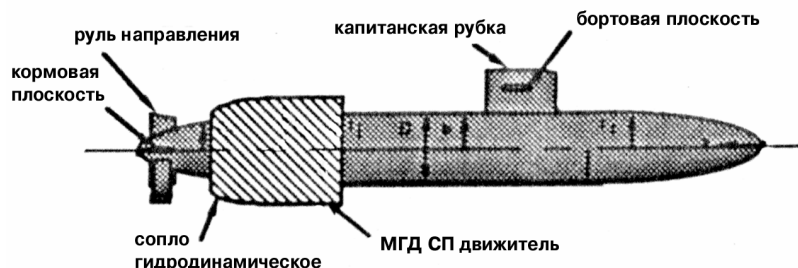
Опубликованные зарубежные материалы охватывают проблемы создания эффективных СЭД для военных кораблей с целью существенного улучшения их тактико-технических характеристик и проблемы СЭД для грузовых и пассажирских судов с целью повышения эффективности грузовых и пассажирских перевозок.

Директор программ вооруженных сил США г-н D.Swallom в докладе «Результаты анализа разработок магнетогидродинамических систем электродвижения подводных лодок» представил на симпозиуме в Японии подробный анализ гидродинамических и электромагнитных процессов сверхпроводниковой движительной установки атомной подводной лодки (АПЛ) - истребителя [3]. На рис.1 показана компоновка движительной установки в корпусе АПЛ со сверхпроводниковым магнетогидродинамическим (МГД) движителем. Следует отметить интересную публикацию о проекте перспективного эсминца США 21-го века с энергетической системой, состоящей из четырех сверхпроводниковых турбогенераторов мощностью 20 МВт, питающих через статические управляемые преобразователи два гребных сверхпроводниковых двигателя [4].

В основу проектных и исследовательских работ специалисты военного ведомства США закладывают экспериментальные результаты эксплуатации сверхпроводниковой СЭД, установленной на судне «Юпитер II» [5]. Анализ опубликованных материалов позволяет сформулировать те факторы, которые определяют целесообразность применения сверхпроводниковых СЭД для военных подводных и надводных кораблей и для грузопассажирских судов. К таким факторам следует отнести:

- экономические предпосылки в грузо-пассажирских перевозках, а также тактико-технические характеристики подводных и надводных кораблей;

- требования по снижению структурного шума и вибрации для увеличения комфортности в пассажирских судах, а также требования повышения скрытности АПЛ, для чего система прямой механической передачи заменяется системой электродвижения;
- возможность отделения первичного двигателя от линии вала и сокращение длины вала для повышения грузоподъемности грузовых судов, а также с целью решения задачи по обеспечению вспомогательного хода АПЛ;
- снижение массы и габаритов агрегатов передачи вращающего момента на гребной винт;
- повышение КПД электропередачи.



**Рис. 1. Компоновка сверхпроводниковой магнитогидродинамической двигательной установки в корпусе АПЛ**

Отметим некоторые интересные публикации зарубежных разработчиков сверхпроводниковых СЭД для грузовых или пассажирских судов.

Немецкие специалисты провели анализ тяговых характеристик МГД двигателей на постоянном и переменном токе. Специалисты пришли к выводу, что для достижения необходимой эффективности и для получения достаточного тягового усилия в двигательной МГД установке должна применяться СП магнитная система [6].

Специалисты английской фирмы «International Research and Development Ltd (IRD)» разработали комплекс СП оборудования для СЭД различных типов судов. Эта фирма отдает предпочтение униполярным СП гребным двигателям и генераторам, в том числе для СЭД судов ледового плавания [7].

Для пассажирских океанских судов японской фирмой «Sumitomo Heavy Industries» разработан проект СЭД со сверхпроводниковым гребным двигателем мощностью 20 МВт. Предполагается, что это судно будет развивать скорость до 50 узлов и сможет составить конкуренцию авиационным трансатлантическим пассажирским перевозкам. Установлено, что масса криодвигателя в данной

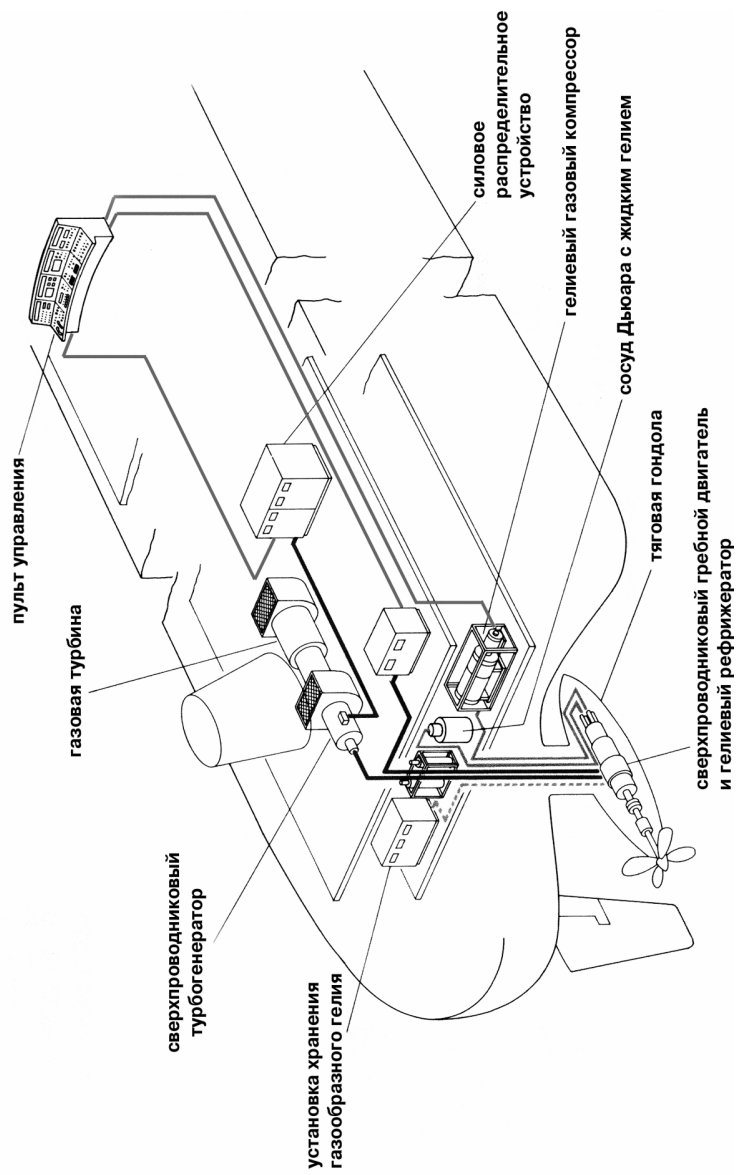


Рис. 2. Схема расположения суперпроводниковой системы электродвижения при многоярусной компоновке в кормовой части транспортного судна

СЭД не должна превышать 30÷40% массы двигателя традиционного исполнения той же мощности при частоте вращения 150 об/мин [8].

Такая же величина единичной мощности гребного сверхпроводникового двигателя предполагается для СЭД эсминца, а также для системы главного хода АПЛ [9].

Для ледокольных судов английской фирмой IRD разработана СЭД с гребным криодвигателем, заменяющим малооборотный дизель 29000 л.с., 100 об/мин. В этом проекте выигрыш в массе составляет 150 т криодвигателя против 1380 т малооборотного дизеля.

На рис.2 представлена схема формирования СЭД со сверхпроводниковым турбогенератором и гребным криодвигателем для транспортного грузового судна (проект Японии). Такая компоновка силовой энергетической установки позволяет повысить грузоподъемность судна и существенно улучшить экологические характеристики. Разработаны проекты для различного типа грузовых судов (сухогрузы, танкеры и др.), в которых была реализована возможность высвободить до 15% объема для размещения дополнительных грузов, благодаря замене механической передачи на электрическую с криодвигателем [10]. Потребляемая мощность для привода винта на таких судах находится в пределах 10÷20 МВт в зависимости от водоизмещения.

В НПП ВНИИЭМ совместно с ведущими конструкторскими бюро кораблестроения и исследовательскими судостроительными предприятиями выполнен необходимый объем НИР и ОКР по созданию теоретических основ расчетов и проектирования сверхпроводниковых электрических машин [11]. В процессе исследования разработана математическая модель, учитывающая особенности сверхпроводниковых электрических машин. При решении задачи оптимального проектирования на ЭВМ использован аппарат нелинейного проектирования. Электромагнитным расчетом определяется значение и форма распределения магнитного поля СП магнитной системы в трехмерном пространстве, для чего использован пакет программ, в основе которого лежит метод интегральных уравнений [12]. Расчетно-теоретические разработки были нацелены на создание сверхпроводниковых криомашин различного назначения:

- криомшины с неподвижным индуктором для СЭД постоянного и переменного тока;
- криомшины с вращающимся индуктором (криотурбогенераторы, двухроторные криодвигатели).

На рис.3 можно видеть направления исследований по созданию в НПП ВНИИЭМ сверхпроводниковых электрических машин различного назначения.

В рамках указанных исследований на нашем предприятии выполнены проекты для создания СЭД главного и вспомогательного хода кораблей со сверхпроводниковыми гребными двигателями и криотурбогенераторами.



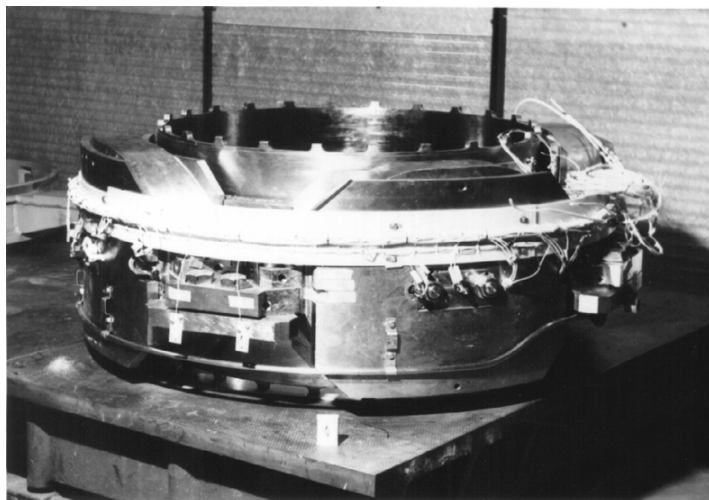
Рис. 3. Направления исследовательских работ

Одновременно для транспортных и пассажирских судов, для судов-ледоколов в НПП ВНИИЭМ были разработаны проекты СЭД и изготовлены и испытаны прототипы гребных криодвигателей [13].

Процесс создания сверхпроводниковых магнитных систем принципиально отличается от технологии изготовления традиционных электромагнитных устройств. Низкотемпературные сверхпроводники исключительно чувствительны к изменению рабочей температуры. Поэтому в сверхпроводниковых катушках криомашин недопустимы относительные перемещения отдельных витков под действием пондеромоторных сил или при изменении тока в СП катушке, приводящие к диссипации энергии в холодной зоне и к изменению температурного режима. Любые тепловыделения, возникающие внутри СП катушки, в том числе под действием внешних переменных магнитных полей, вызывающих гистерезисные, вихревые и кооперативные потери в СП проводе, должны быть эвакуированы в зону теплосъема - в зону жидкого гелия СПМС. Все проблемы по стабилизации СП магнитных систем в НПП ВНИИЭМ

успешно решены. Был разработан и изготовлен специальный изоляционный компаунд на основе нитрида бора, обладающий высокой тепловой проводимостью. Разработан технологический процесс и комплекс оборудования для компаундирования СП магнитных систем всех криомашин, созданных в НПП ВНИИЭМ [14, 15].

Полностью стабилизированная многополюсная магнитная система с компаундированными СП полюсами (рис.4) разработана и изготовлена для прототипа гребного криодвигателя переменного тока. Разработана так называемая «галетная» конструкция СП полюсов магнитной системы, которая позволяет применять косвенную систему охлаждения СП полюсов МС взамен более сложной и громоздкой «погружной» системы.



**Рис. 4. Сверхпроводниковая магнитная система гребного криодвигателя 200 кВт в процессе сборки**

В условиях Опытного завода института создан стенд для испытания СП магнитных систем и криогенных электрических машин постоянного и переменного тока под нагрузкой единичной мощностью до 1 МВт. Универсальность стенда и его оснащённость современными измерительными средствами позволяет организовать исследование сверхпроводниковых машин постоянного и переменного тока. Структурная схема стенда показана на рис.5.

Одновременно в бывшем Истринском филиале на базе существующего флотского стенда создан автоматизированный стенд испытания корабельной системы электродвижения, позволяющий

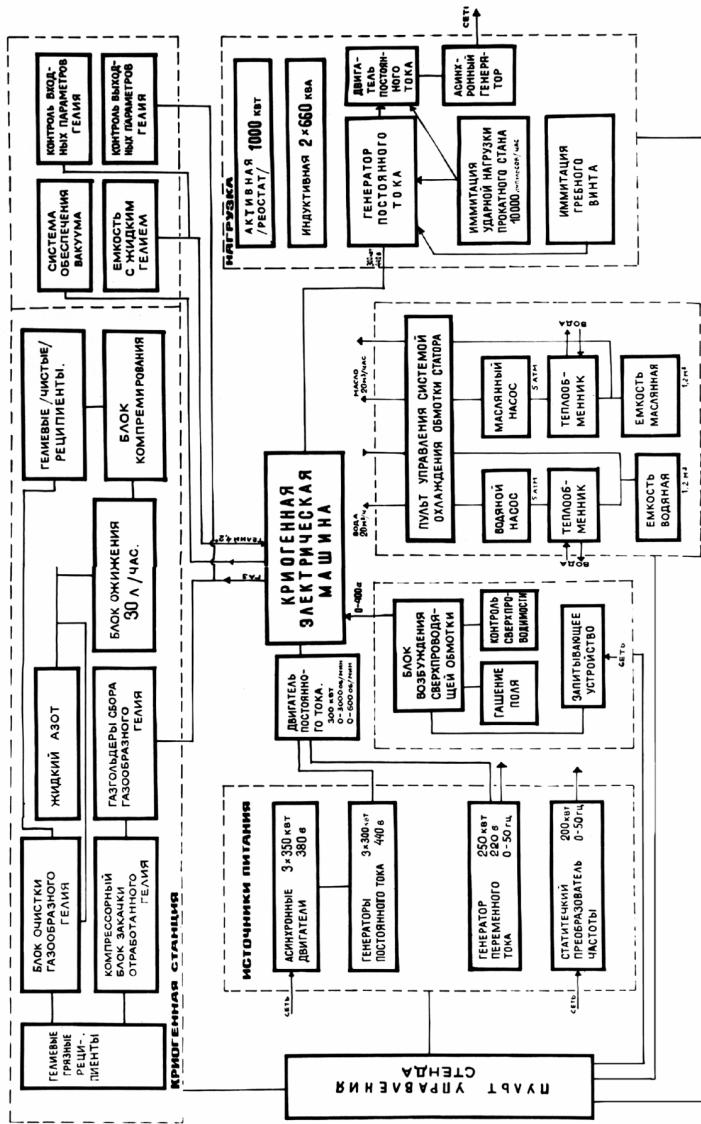
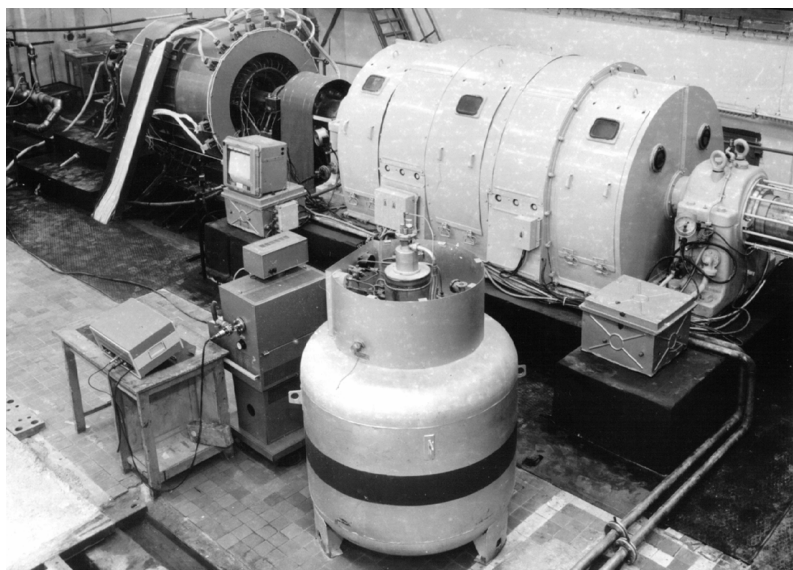


Рис. 5. Схема криогенного испытательного стенда



испытывать сверхпроводниковые гребные двигатели главного и вспомогательного хода корабля в условиях, имитирующих нагрузки винта (рис.6).

На этих стендах прошли испытания и исследования все сверхпроводниковые машины, изготовленные в НПП ВНИИЭМ [13, 21].



**Рис. 6. Испытательный стенд гребного криодвигателя мощностью 2 МВт в составе СЭД**

Работы по созданию судовых сверхпроводниковых электрических машин выполнялись в соответствии с Государственной программой Миннауки по теме «Криодвигатель» и теме «Танкер» [16, 17]. В рамках этой программы были выполнены проекты по созданию сверхпроводникового гребного криодвигателя для СЭД грузопассажирских судов. В работах приняли также участие судостроительные предприятия ЦКБ «Черноморсудпроект», ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, ЦКБ МТ «Рубин», машиностроители ЛПЭО «Электросила», НПО «Гелиймаш».

По результатам выполненных работ было принято принципиальное решение о создании единого базового сверхпроводникового гребного двигателя мощностью 10 МВт при частоте вращения 250 об/мин. Этот двигатель должен удовлетворить потребности всех перспективных СЭД судов различного класса и, как универсальный модуль, должен позволить комплектовать различные системы привода гребного винта судов.

Поскольку разработка двигателя рассматривается как создание базового гребного привода для серии СЭД, то, непременно, встала задача максимально упростить вспомогательную систему криогенного обеспечения (СКО) и условия ее эксплуатации. Проблема решается заменой жидкостной системы охлаждения СП магнитной системы на газовую систему охлаждения. А это в свою очередь связано с переходом на изготовление СПМС из сверхпроводника, имеющего более высокую критическую температуру. К таким СП материалам относится интерметаллическое соединение ниобий-олово ( $Nb_3Sn$ ), критическая температура которого равна 17,5 К и позволяет работать СПМС в парах гелия.

Переход на газовое охлаждение МС позволяет упростить систему криообеспечения, освободив ее от части оборудования, уменьшить массогабаритные показатели СКО и повысить ее надежность. Поэтому было предусмотрено разработать два варианта исполнения гребного криодвигателя.

Одно исполнение предполагало создание криодвигателя с апробированной магнитной системой индуктора, выполненной из стандартного сверхпроводника на основе сплава ниобий-титан (критическая температура 4,8 К). Схема охлаждения такой СПМС - жидкий гелий. Создание этого варианта криодвигателя было поручено ЛПЭО «Электросила».

Второй вариант исполнения криодвигателя предписывал создание магнитной системы индуктора на базе интерметаллида ниобий-олово с газовой системой охлаждения. Этот вариант исполнения гребного криодвигателя, а также работы по созданию всего комплекса СЭД были возложены на НПП ВНИИЭМ.

Работы по созданию судового комплекса СКО с газовой схемой охлаждения криодвигателя вошли в планы НПО «Гелиймаш».

В процессе создания МС пришлось учитывать, что провод на базе интерметаллида  $Nb_3Sn$  в отличие от СП провода  $NbTi$  очень чувствителен к механическим деформациям и требует совершенно иной технологии изготовления МС.

Особенности СП МС из ниобий-олова приведены в [18].

Проектные работы были организованы одновременно по всем направлениям исследований. Была создана расчетная модель криодвигателя, позволяющая прийти к оптимальному решению поставленной задачи. К особенностям принятой математической модели следует отнести сочетание электромагнитного, теплового и механического расчетов [19]. Структурная схема математической модели показана на рис.7.

В центре находится блок-формирователь основных конструктивных узлов, в котором определяются размеры криодвигателя на

основе соотношений, характерных для выбранного типа криостата, определяются размеры полюсных катушек СП магнитной системы. Исходным размером является диаметр, на котором расположена середина полюсной катушки. Путем последовательных вычислений определяются размеры бандажных колец, радиационного экрана, тепловых мостов, наружных оболочек криостата. Полученные в блоке основных размеров данные поступают в звенья математической модели, описывающие последовательность электромагнитного, теплового и механического расчетов. Для учета конечных размеров обмоток в полученные аналитические выражения магнитной индукции и параметров машины вводятся поправочные коэффициенты, вычисленные на основе решения трехмерной полевой задачи методом вторичных источников. Подробное описание алгоритмов математической модели криодвигателя в [20]. Была решена оптимизационная задача.

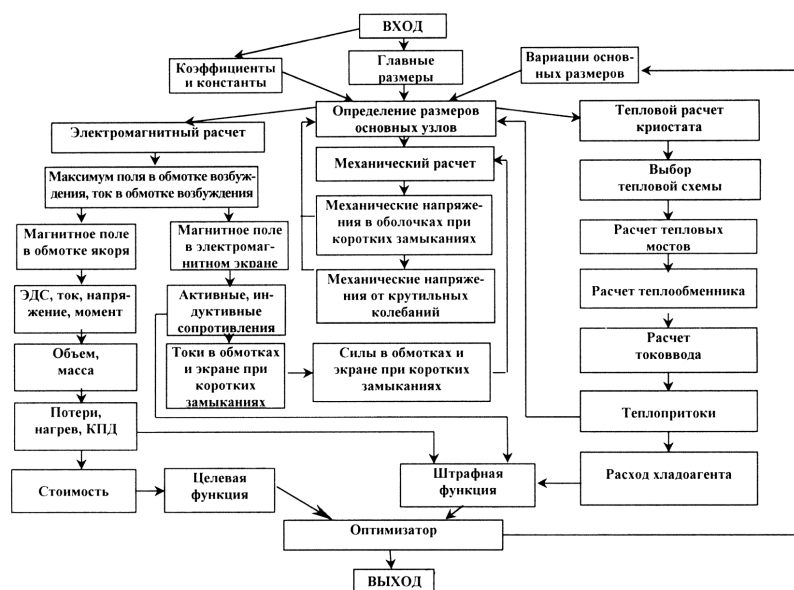


Рис. 7. Структурная схема математической модели криодвигателя

В результате определены размеры восьмиполюсной сверхпроводниковой обмотки возбуждения:

средний диаметр обмотки, мм	1600
высота полюса, мм	47
магнитодвижущая сила, А	500000

Магнитная система с газовой схемой охлаждения должна удовлетворять следующим требованиям:

максимальное время запитки СПОВ, с	200
максимально допустимое значение тока СПОВ, определяемое допустимым теплопритоком по токовводам, А	1500
допустимые тепловыделения в СПОВ в номинальном режиме работы двигателя, Вт	6
форма катушек-полюсов	плоская, типа «Рейстрек»

Для удовлетворения сформулированных технических требований был разработан в НИИ неорганических материалов им. А.М.Бочвара по техническому заданию НПП ВНИИЭМ ниобий-оловянный провод, который представляет собой одноповивную скрутку из 18 элементарных проводов диаметром 0,6 мм, содержащих 14450 сверхпроводящих жил в бронзовой матрице. Размер провода с изоляцией 5,1x1,2 мм. Изоляция провода - стекловолокно типа ВМПС (толщина 0,1 мм).

Конструкция и технологический процесс производства СПОВ из ниобий-оловянного провода предусматривают изготовление обмотки по методу «намотка-отжиг», при котором проводится намотка катушек-секций полюсов проводом-полуфабрикатом. Затем эти секции подвергаются вакуумному отжигу, лишь в результате которого в жилах провода образуется сверхпроводящее соединение ниобий-олово. После отжига секции компаундируются и производится сборка полюса. Таким образом исключаются механические деформации собственно сверхпроводниковых жил.

Расчет тепловыделений в СПОВ из ниобий-оловянного провода показал, что уровень тепловых потерь при вводе тока со скоростью 0,01 от номинального тока составит не более 200 Вт/м<sup>3</sup>, а при работе двигателя в номинальном режиме не более 6 Вт/м<sup>3</sup>. Эти параметры и были положены в основу технических требований к комплексу системы криообеспечения, заказ которой был размещен в НПО «Гелиймаш».

Надежная криостабилизация СП обмотки возбуждения при заданной производительности системы криообеспечения была связана с решением таких задач как:

- выбор конструктивных параметров системы криостатирования, обеспечивающих оптимальное использование «хладосодержания» криоагента;
- выбор конструктивных решений системы ввода тока, обеспечивающих предельное снижение теплопритока в зону криостатирования;
- обеспечение наиболее эффективного теплообмена в охлаждае-

мых элементах конструкции при их высоком тепловом сопротивлении в аксиальном направлении;

- обеспечение эффективного экранирования холодных элементов конструкции от теплопритока при радиационном теплообмене;

- повышение надежности криостата путем совмещения его «активных» частей в единый блок (совмещение тепловых мостов, радиационных экранов и тоководов в единое устройство с общим теплообменным аппаратом).

Конструктивная схема криостата криодвигателя представляет собой совокупность газоохлаждаемых тепловых мостов - радиационных экранов, газоохлаждаемых и теплопроводящих радиационных экранов, охлаждаемых тоководов, замкнутых герметичных оболочек с размещенными в них СП обмотками. Все элементы конструкции расположены в вакуумированной внутренней полости герметизированного корпуса криостата. Отказ от применения «суперизоляции» объясняется значительными усложнениями процесса контроля герметичности из-за возникновения газовых потоков в результате десорбции с поверхностей материала изоляции.

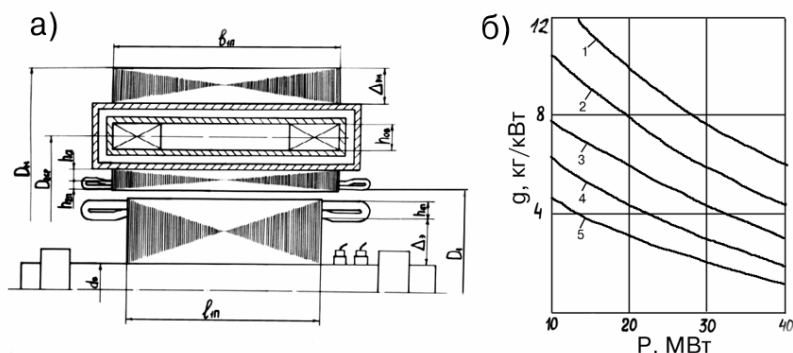
Применение в индукторе двигателя СП магнитной системы из ниобий-олова с рабочей температурой до 10 К позволило отказаться от конструктивных решений, гарантирующих расположение полюсов индуктора ниже уровня жидкого гелия при возникновении дифферентов и кренов, что в значительной мере упростило конструкцию криостата [21].

В итоге в НПП ВНИИЭМ и в ЛПЭО «Электросила» были разработаны два варианта исполнения гребного криогенного двигателя мощностью 10 МВт. Основные геометрические размеры обоих вариантов исполнения криодвигателя совпали. Полностью унифицированной стала конструкция якоря криодвигателя для обоих вариантов исполнения СП индуктора.

В таблице показаны технические характеристики и массогабаритные показатели базового гребного криодвигателя мощностью 10 МВт, разработанного в НПП ВНИИЭМ. Здесь же приведены для сравнения характеристики гребного электродвигателя традиционного исполнения.

Тип гребного двигателя	Мощность, кВт	Напряжение, В	Частота вращения, об/мин	КПД	Масса, т	Габариты, мм
Криодвигатель КД-10-8	10000	1500	220	0,97	70	5500 2500 2700
Традиционная конструкция Пг-158	9300	1030	207	0,94	158	6600 4600 5300

Одновременно в НПП ВНИИЭМ был выполнен анализ возможности уменьшения частоты вращения гребного криодвигателя. Это требование со стороны судостроителей мотивировано тем, что уменьшение частоты гребного винта увеличивает пропульсивный коэффициент судна и приводит к существенному сокращению расхода топлива [10]. На рис.8 приведены результаты анализа изменения удельной массы гребного криодвигателя при различных значениях частоты вращения ротора.



**Рис. 8. Гребной криодвигатель с ниобий-оловянным индуктором:**  
 а) – расчетная схема; б) – зависимость удельной массы криодвигателя от мощности при различной частоте вращения, об/мин:  
 1 – 60; 2 – 80; 3 – 120; 4 – 150; 5 – 200

На базе созданной в НПП ВНИИЭМ конструкции гребного криодвигателя КД-10-8 мощностью 10 МВт в ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова разработана конструкция сверхбыстроходного грузо-пассажирского судна. Конструкция судна представляет два отдельных корпуса, один из которых подводный, в нем и размещен весь автоматизированный комплекс сверхпроводниковой системы электродвижения, включающей четыре СП гребных двигателя суммарной мощностью 40 МВт. Такое судно способно развивать скорость хода до 40 узлов с нагрузкой 500 пассажиров и грузом 1000 т.

ЦКБ «Черноморсудпроект» выполнена подробная разработка размещения системы электродвижения с криогенным гребным двигателем мощностью 10 МВт и всем вспомогательным комплексом СКО на судне типа «Иван Папанин». Установлена возможность расположения в машинном отделении этого судна вместо малооборотного дизеля СЭД с гребным криодвигателем. Дана оценка возможности сокращения длины судна для варианта с электродвижением по сравнению с малооборотным дизелем. Проект выполнен для типового грузового судна.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. S. Motora, S. Takezawa, An outline of the Rand project on superconducting MHD Ship propulsion in Japan. Proceedings of International Symposium on Superconducting MHD Ship Propulsion. 1991. Japan.
2. R. Tadaki, K. Sugawara. Performance prediction and design of duct systems for MHDs «YAMATOI». Proceedings of International Symposium on Superconducting MHD Ship Propulsion. 1991. Japan.
3. D. Swallow. Magneto-hydrodynamic submarine propulsion system performance analysis results. Proceedings of International Symposium on Superconducting MHD Ship Propulsion. 1991. Japan.
4. Tortolano F. The navy goes electric. Design News. V.45. № 17.
5. Гилерович В.М. /Использование явления сверхпроводимости в судовой энергетике// Судостроение. 1989. № 4.
6. H. Weh. Ship Propulsion With Electromagnetic Direct Drives. Proceedings of International Symposium on Superconducting MHD SHIP Propulsion. 1991. Japan.
7. A. Appleton. Superconductivity in Propulsion U.K. Proceedings of International Symposium on Superconducting MHD Ship Propulsion. 1991. Japan.
8. N. Takarada. Development of Marine Superconducting Motor and high speed ship. Overseas. № 35. 1985. Nippon Kaiy Kyokai.
9. D. Rains, D. Van Lanningham. Podded destroyer propulsion. Naval Engineers Journal. 1979.
10. Система электродвижения с криодвигателем на транспортных судах /Барбашев Э.В., Горчинский Ю.Н. и др.// Энергетика и транспорт. 1990. № 3.
11. Труды ВНИИЭМ. Электромагнитные и теплофизические процессы в криогенных электрических машинах. М.: 1977. Т. 52.
12. Программа MULTIC для расчета трехмерных магнитных полей/ Балбеков В.И., Ткаченко А.М., Федосеев А.И. // Препринт ИФВЭ 81-121. Серпухов. 1981.
13. Криогенные электрические машины/ Жемчугов Г.А., Круглин В.А., Плещунов Н.Н. и др. // Электротехника. 1991. № 9.
14. Труды ВНИИЭМ. Вопросы материаловедения метрологии и технологии криогенных электрических машин. М.: 1977. Т. 53.
15. Труды ВНИИЭМ. Технология электротехнического производства. М.: 1979. Т. 61.
16. Научно-технический отчет по проекту «Танкер». АБ738036. ВНИИЭМ. 1991.
17. Научно-технический отчет по теме «Криодвигатель». АБ738173. 1992.
18. Труды ВНИИЭМ. Электротехнические металлические материалы. М.: 1982. Т. 70.
19. Оптимальное проектирование криогенных электрических машин переменного тока / Рубинраут А.М., Матвейчук П.А., Розенкноп В.Д.// Электротехника. 1989. № 5.
20. Технический отчет НПП ВНИИЭМ. № ОАГ.129.465. Расчет криодвигателя. 1993.
21. Труды ВНИИЭМ. Электрические машины с использованием явления сверхпроводимости. М.: 1984. Т. 75.