



Том 4 выпуск 6  
декабрь 2007

## НАУЧНЫЕ ЦЕНТРЫ РОССИИ

### *Опыт создания электрических машин на основе массивных ВТСП элементов с азотным охлаждением*

Большинство разработок зарубежных ВТСП электрических машин в настоящее время опирается на концепцию использования в индукторе машины композитных ленточных ВТСП проводов 1-го поколения (соединения Bi-2223), а в будущем – ВТСП проводов 2-го поколения с тонкими YBCO пленками и проводами на основе соединения MgB<sub>2</sub>. Уже сейчас создан ряд крупных электрических двигателей и генераторов большой мощности. Так, например, в США разработан прототип ВТСП электропривода морских судов мощностью 36,5 МВт и бортовой авиационный ВТСП генератор мощностью ~ 1 МВА. В Германии фирмой Siemens создан ВТСП двигатель мощностью ~ 4 МВт.

В разрабатываемых ВТСП электрических машинах на основе композитных ВТСП проводов, как правило, необходимо использовать сложные системы криостатирования, обеспечивающие достаточно низкие температуры в зоне индуктора (на уровне существенно ниже температуры кипения жидкого азота). Для этих целей используются системы криостатирования с жидким неоном или криокулеры, работающие по циклу Стирлинга и Гиффорда-МакМагона.

Альтернативные разработки криогенных электрических машин с массивными ВТСП элементами из YBCO керамики с охлаждением жидким азотом (77 К) ведутся, начиная с 1995 г, в МАИ в Центре сверхпроводниковых электрических машин и устройств в кооперации с ведущими научными центрами России и Германии (ВНИИНМ им. Бочвара, ВЭИ, НИИЭМ (Истра), ОАО «АКБ Якорь», IPHT (Йена, Германия), IFW (Дрезден, Германия), «Oswald Elektromotoren GmbH» (Мильтенберг, Германия)).

Основными задачами, которые решали разработчики электрических машин на основе массивных ВТСП элементов и азотного охлаждения (77 К) являлись:

- показать, что разрабатываемые ВТСП машины могут обеспечивать достаточно высокий уровень мощностей (более 10 – 100 кВт) при температурах жидкого азота;
- разработать конструкции ВТСП машин с приемлемыми для их практического использования значениями коэффициента мощности ( $\cos \varphi \sim 0,8$ );
- показать, что использование в электрических машинах массивных ВТСП элементов позволяет получить при одинаковых режимах криогенного охлаждения более высокие удельные массоэнергетические показатели по сравнению с лучшими образцами традиционных электрических машин (магнитоэлектрических двигателей на основе постоянных магнитов из редкоземельных элементов);

И далее...

## ВТСП МАТЕРИАЛЫ 2-ГО ПОКОЛЕНИЯ

*ВТСП проводники 2-го поколения.  
American Superconductor vs.  
SuperPower* 4

## ВТСП УСТРОЙСТВА

*Сверхпроводниковые устройства  
для металлургии.* 7

*Rolls Royce и Diboride Conductors  
создают токоограничитель на  
основе MgB<sub>2</sub>* 8

## КРУПНЫЕ ПРОЕКТЫ

*Тенденции использования  
сверхпроводниковых технологий в  
Японии* 9

- продемонстрировать варианты конкретного практического применения новых типов электрических машин в перспективных промышленных разработках.

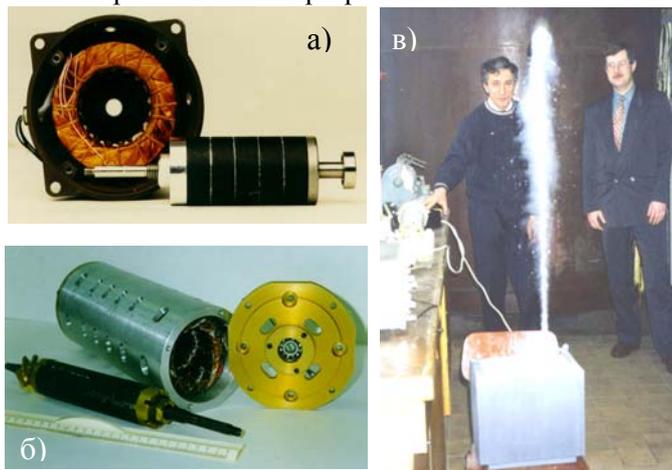


Рис. 1. Гистерезисные ВТСП двигатели с азотным охлаждением. а) ВТСП двигатель 0,5 кВт (50 Гц); б) ВТСП двигатель 1 кВт (50 Гц); в) Криогенная помпа с ВТСП двигателем.

Для решения первой задачи в период 1995-2001 гг в МАИ были разработаны и успешно испытаны серии гистерезисных ВТСП двигателей с массивными ВТСП элементами в роторе мощностью до 4 кВт. Было показано, что ВТСП гистерезисные двигатели имеют в 3-4 раза более высокие массоэнергетические показатели по сравнению с традиционными гистерезисными машинами. На базе гистерезисного ВТСП двигателя создан первый погружной насос для перекачки жидкого азота. Было показано, что достигнутый в настоящее время коэффициент мощности гистерезисных ВТСП двигателей составляет величину порядка 0,2-0,3 и может быть улучшен до уровня 0,5-0,6 при использовании известных методов импульсного подмагничивания ВТСП элементов.

Для решения задачи повышения коэффициента мощности (до уровня ~ 0,7) в 2000-2005 гг в МАИ в рамках сложившейся кооперации была разработана и успешно испытана серия реактивных ВТСП электродвигателей с массивными YBCO элементами в роторе мощностью от 1 кВт до 100 кВт (рис. 2). На основе этих работ фирмой «Oswald Elektromotoren GmbH» в кооперации с МАИ был создан и успешно испытан реактивный ВТСП двигатель мощностью 250 кВт. Исследования показали, что применение ВТСП элементов позволяет существенно увеличить магнитную анизотропию ротора машины, недостижимую при использовании традиционных электротехнических материалов. Экспериментально и теоретически показано, что удельные массоэнергетические параметры реактивных ВТСП двигателей в 2-2,5 раза превосходят параметры традиционных реактивных двигателей при одинаковых режимах охлаждения жидким азотом. При охлаждении реак-

тивных ВТСП двигателей до температуры жидкого водорода (~20 К) их удельные массоэнергетические показатели улучшаются в 1,5-2 раза по сравнению с ВТСП двигателями, охлаждаемыми жидким азотом (77 К). На основе полученных результатов в МАИ совместно с ОАО «Туполев» был спроектирован, изготовлен и испытан макетный образец погружного насоса с реактивным ВТСП двигателем для перекачки жидкого водорода для самолета на водородном топливе (типа «Криоплан»).

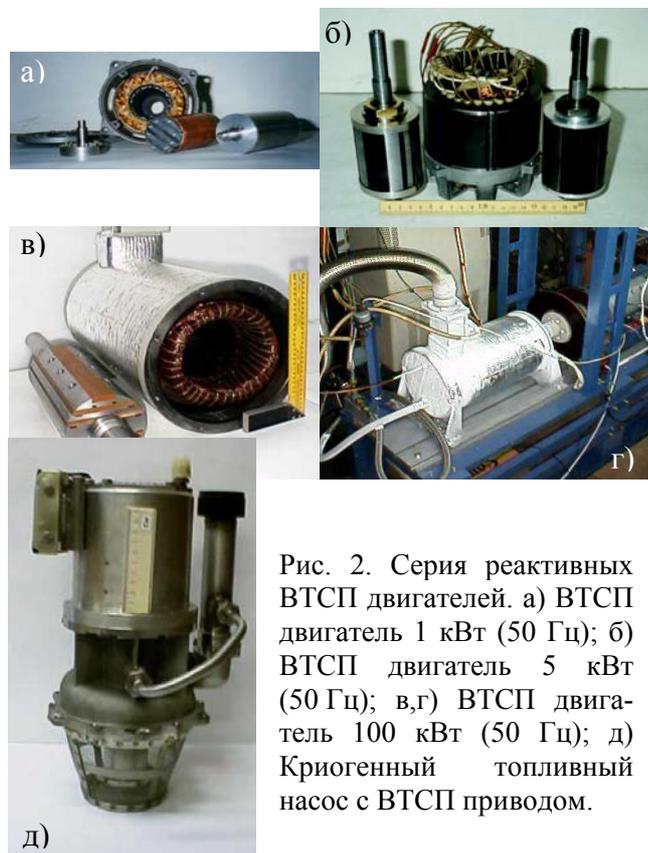
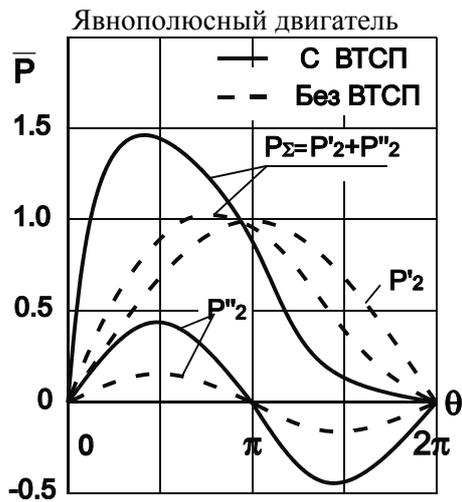


Рис. 2. Серия реактивных ВТСП двигателей. а) ВТСП двигатель 1 кВт (50 Гц); б) ВТСП двигатель 5 кВт (50 Гц); в,г) ВТСП двигатель 100 кВт (50 Гц); д) Криогенный топливный насос с ВТСП приводом.

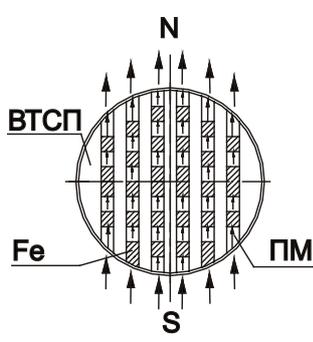
В последние годы (2004-2007) в МАИ ведутся разработки электрических двигателей с использованием массивных ВТСП элементов и постоянных магнитов на основе редкоземельных элементов. Первые эксперименты показали, что такие ВТСП двигатели будут иметь в 1,5-2 раза более высокие массоэнергетические показатели по сравнению с реактивными ВТСП электродвигателями. Идею применения ВТСП элементов в роторе можно достаточно ясно оценить на основе анализа известной угловой зависимости мощности P:

$$P = \frac{m\varepsilon U^2}{X_d} \sin \theta + \frac{mU^2}{2} \left[ \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right] \sin 2\theta,$$

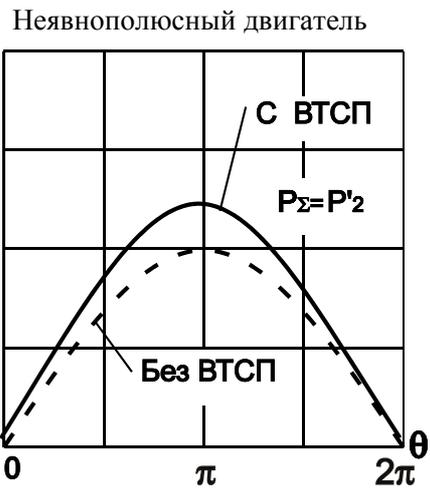
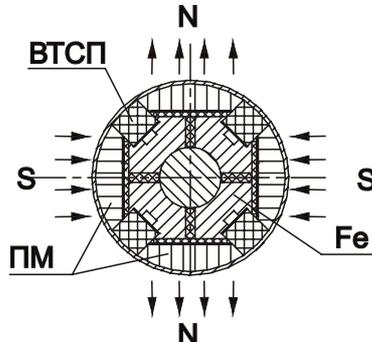
где  $\varepsilon$  – коэффициент возбуждения машины (отношение ЭДС к номинальному напряжению);  $\theta$  – угол между магнитными потоками, создаваемыми постоянными магнитами и магнитным потоком в воздушном зазоре;  $X_d$  и  $X_q$  – индуктивные коэффициенты машины по осям d и q.



Композитный ротор на основе ВТСП, РЗМ и стали



Ротор на основе ВТСП и радиальных постоянных РЗМ магнитов



Ротор на основе ВТСП и тангенциальных постоянных РЗМ магнитов

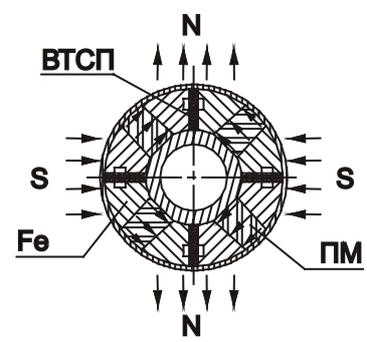


Рис. 3. Концепция ВТСП двигателей с постоянными магнитами.

На рис. 3 приведены сравнительные угловые характеристики неявнополюсных ( $X_d = X_q$ ) и явнополюсных ( $X_d > X_q$ ) обычных и ВТСП синхронных магнитоэлектрических двигателей. Видно, что при использовании массивных ВТСП элементов можно заметно увеличить мощность электрического двигателя за счет снижения индуктивных параметров  $X_d, X_q$  в неявнополюсных и явнополюсных ВТСП синхронных двигателях.

На рис. 3 также приведены различные конструктивные схемы выполнения роторов синхронных ВТСП магнитоэлектрических двигателей, большая часть которых была изготовлена и успешно испытана в МАИ.

На рис. 4 представлены результаты исследования двухполюсного синхронного ВТСП двигателя со слоисто-блочной структурой ротора. Такой ротор состоит из ВТСП пластин и чередующихся блоков из магнитомягкой стали и постоянных магнитов. Из диаграмм зависимости выходной мощности от концентрации ВТСП элементов и постоянных магнитов внутри ротора видно, что существует область оптимальной концентрации. Из рисунка следует, что применение ВТСП элементов позволяет увеличить выходную мощность. Эти результаты были

подтверждены экспериментально на опытном об-

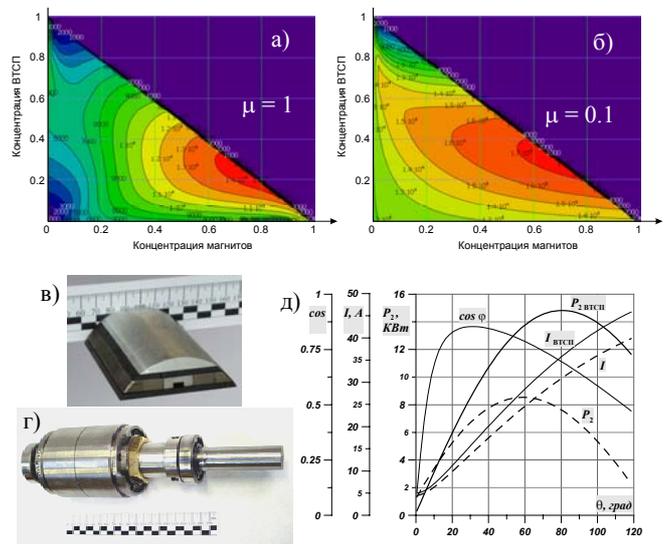


Рис. 4. ВТСП электродвигатель с композитным ротором. а,б) Зависимость максимальной мощности от концентрации ВТСП и постоянных магнитов в роторе; в,г) Внешний вид композитного ротора; д) Угловые характеристики ВТСП двигателя.

Были также разработаны и успешно испытаны 4-х полюсные синхронные ВТСП двигатели с радиальными и тангенциальными магнитами мощностью

~ 20 кВт. Внешний вид 4-х полюсного двигателя и его угловые характеристики показаны на рис. 5. Результаты испытаний показали, что вариант синхронного ВТСП двигателя с радиальными магнитами дает лучшие показатели и является более техно-

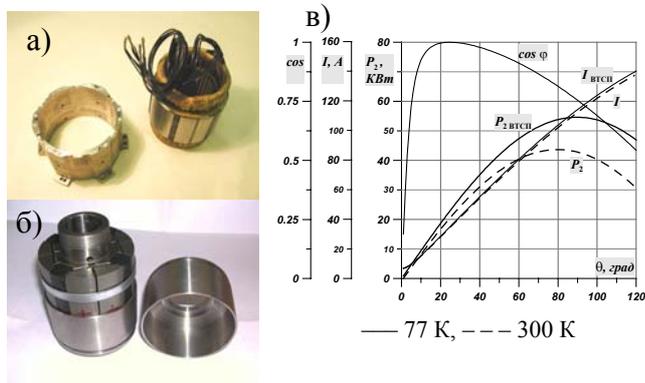


Рис. 5. Четырехполюсный ВТСП электродвигатель с радиальными ПМ в роторе. а) Статор; б) Ротор; в) Угловые характеристики ВТСП двигателя.



Рис. 6. Криогенный насос для ВТСП магистрали передачи электроэнергии. а) Крионасос с ВТСП электродвигателем (1 – корпус насоса, 2 – корпус двигателя, 3 – статор, 4 – ротор); б) Крионасос с ВТСП электродвигателем в сборе; в) ВТСП крионасос во время работы; г) Общий вид промышленного образца ВТСП магистрали передачи электроэнергии.

На базе этого ВТСП двигателя МАИ совместно с ОАО «НПО Энергомаш имени ак. В.П. Глушко» был изготовлен и успешно испытан первый промышленный образец криогенного насоса для перекачки жидкого азота. Общий вид крионасоса на этапе его испытания в составе экспериментального стенда МАИ для отработки системы криостатирования силового СП кабеля показан на рис. 6.

В рамках германо-российского проекта «High Dynamic HTS Motor» фирмой «Oswald Elektromotoren GmbH» совместно с МАИ разработан, изготовлен и проходит технологические испытания высокооборотный 4-х полюсный ВТСП синхронный двигатель мощностью ~500 кВт с ради-

альными редкоземельными магнитами и массивными YBCO элементами в роторе (рис. 7) Двигатель разработан для использования в автомобильных компаниях Германии в качестве привода для испытаний и тестирования кузовов новых легковых автомобилей.

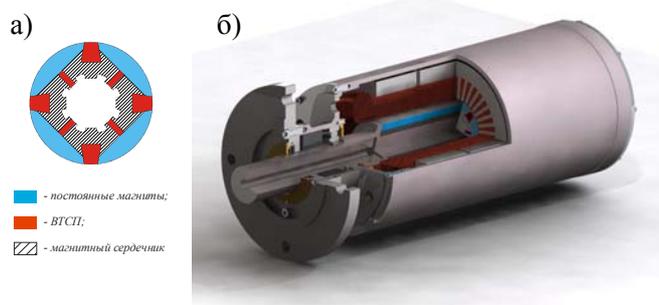


Рис. 7. Конструкция ВТСП электродвигателя мощностью 500 кВт на основе массивных ВТСП и РЗМ. а) Поперечное сечение ротора; б) Конструкция двигателя.

Л.К. Ковалев, К.Л. Ковалев, В.П. Фирсов, Б. Освальд

## ВТСП МАТЕРИАЛЫ 2-ГО ПОКОЛЕНИЯ ВТСП проводники 2-го поколения. American Superconductor vs. SuperPower

Уже стало привычным, что в последние годы в технологии ВТСП-лент 2-го поколения, чрезвычайно перспективных для СП-электроэнергетики и других областей техники, наиболее активно продвигаются вперёд двумя американскими компаниями: American Superconductor (AMSC) и SuperPower. Расскажем об их успехах. Данные для заметки взяты из докладов на Peer Review 2007 [1] и сайтов компаний [2, 3].

**American Superconductor** продолжает наращивать темп производства ВТСП-ленты. Напомним, что AMSC производит ленту на текстурированной подложке, в качестве буферных слоев используется гетероструктура  $\text{CeO}_2/\text{YSZ}/\text{Y}_2\text{O}_3$ , а ВТСП слой толщиной 800 нм получают методом TFA-MOD из фторсодержащих прекурсоров. Эта неплохо зарекомендовавшая себя архитектура не менялась в течение последних лет, хотя компания в сотрудничестве с университетскими и национальными центрами усиленно работает над её модификацией: получение буферных слоев методом MOD, повышение критического тока ВТСП за счет внедрения наноразмерных дефектов, развитие новых материалов для подложки – например, биметаллических трёхслойных ("композитных") с улучшенными механическими свойствами.

В настоящий момент компания производит проводники длиной 100 м на основе ленты шириной 4 см, которая потом режется вдоль. Объём производства составляет около 20 км в год (pre-pilot scale). Увеличение объёма годового производства до 720 км ожидается с введением в эксплуатацию новых

мощностей в декабре этого года (pilot-scale, будет производиться лента длиной до 1000 м с переходом в перспективе на ширину ленты 10 см). Увеличения скорости производства ленты удалось достичь путем оптимизации процессов и – главное – увеличением реакционной зоны всех процессов. Неоднократно публиковалась фотография установки, включающей в себя печь длиной 10 метров (рис. 1). Такая печь рассчитана на ленту с максимальной шириной до 10 см.



Рис. 1. Установка для производства ВТСП-ленты в American Superconductor.

Наиболее популярным 2G-продуктом компании является так называемый 344-проводник (3 слоя – стабилизатор/ВТСП-лента/стабилизатор, ширина 4,4 мм). В качестве стабилизатора используется упрочненная медь (для применений в виде катушек и для кабелей) или нержавеющая сталь (провода для токоограничителей).

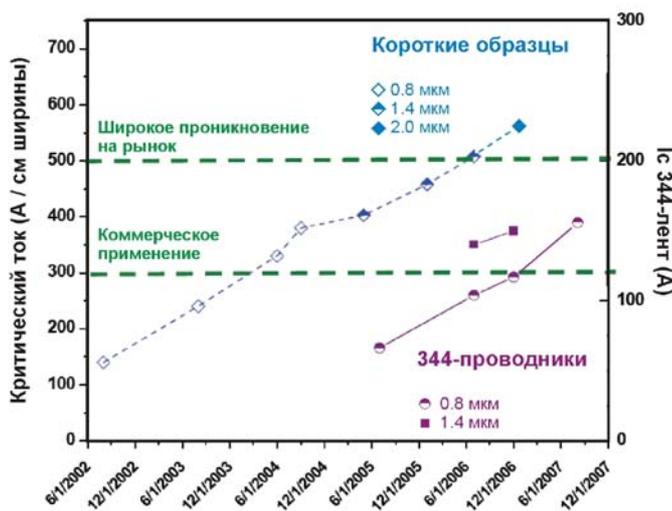


Рис. 2. Критический ток в ВТСП-лентах производства American Superconductor (77К, собственное магнитное поле).

Планы AMSC на 2008-й год включают введение в эксплуатацию новых мощностей (с потенциалом до 1000 км/год), производство лент длиной 250-500 м, увеличение толщины слоя

ВТСП до 1,4 мкм, достижение порога 650 А на см ширины ленты на коротких образцах (сегодняшний рекорд фирмы – 560 А/см, рис. 2).

В презентации **SuperPower** отмечается, что сегодня, 16 лет после первой демонстрации (первый слой сверхпроводника на текстурированной подложке был получен в 1991 году японской компанией Fujikura), ленты 2-го поколения начинают активно конкурировать с проводами на основе висмутовых ВТСП. В 2007-м году компания сосредоточила свои усилия на выполнении требований третьей фазы программы Title III. Эта часть программы заканчивается в июне 2008-го года. Напомним, что инициатива министерств обороны и энергетики США нацелена на целевое финансирование SuperPower и American Superconductor в размере от 5 до 10 миллионов долларов ежегодно с целью ускорения темпов создания технологии ВТСП 2-го поколения. Согласно плану, в июне 2008-го обе компании должны получить проводники длиной 1000 м, с критоком 500 А/см ширины при 77К в собственном поле, инженерной плотностью тока 15000 А/см<sup>2</sup> при 65 К в поле 3 Тл при объёме производства более 200000 кА·м в год (например, 1000 км четырёхмиллиметровой ленты с током 200А).

Технология SuperPower также устоялась и основана на процессах IBAD MgO и MOCVD YBCO. Буферную функцию несёт пятислойная структура, а подложкой служит электрополированная лента из хастеллоя (сплав на основе никеля с добавками хрома, молибдена и ряда других элементов). Хастеллой прочен, немагнитен и имеет высокое удельное сопротивление; последние два аспекта уменьшают потери на переменном токе. Прочность сплава позволяет работать на ленте-подложке толщиной 50 мкм, конечная толщина проводника составляет, благодаря этому, всего 95 мкм.

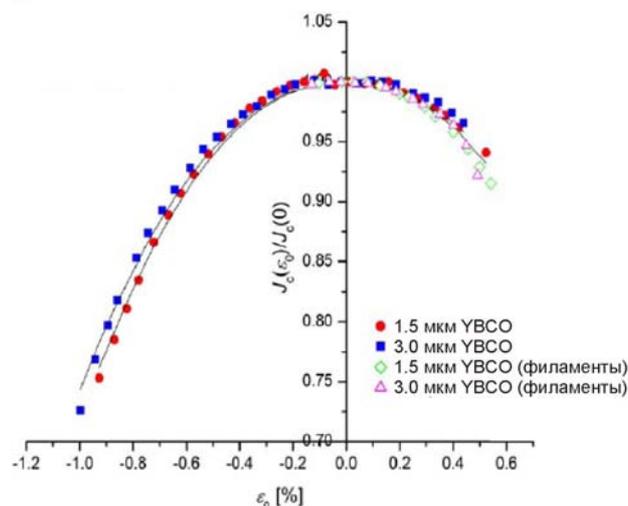


Рис. 3. Критический ток в лентах производства SuperPower в зависимости от деформации. Измерено при температуре 76 К.

Пилотное оборудование большой производительности функционирует на SuperPower с 2006-го года.

Повышения критического тока добиваются увеличением толщины MOCVD слоя. Толщину увеличивают за счет многократного прохождения ленты через реактор. На коротком образце при толщине YBCO 3,5 мкм (5 проходов) достигнуто рекордное значение 721 А/см ширины. 595 А/см получено на ленте длиной более метра, а 486 А/см – на ленте длиной 11,1 м. В последнем случае слой ВТСП толщиной 2,8 мкм получили за 4 прохода. Как показывают микроскопические исследования, в толстых слоях присутствуют зёрна нежелательной ориентации, что оставляет пространство для улучшения характеристик. Дальнейшее повышение криттока возможно при допировании YBCO другими редкоземельными элементами (сообщается о результатах с Sm и Gd). Провода обладают отличными механическими свойствами – 95% критического тока в слое 3 мкм толщиной сохраняется при деформации в 0,5% (рис. 3).

Прогресс последних 5 лет позволил SuperPower увеличить длину производимых лент с 1 до почти 800 метров. Кардинально увеличились скорости всех производственных этапов за счёт создания нового оборудования и активного использования принципа многократного прохода ленты через реактор. Успешно изготовлены ленты с 5-тислоной буферной структурой длиной по 1350 м. Разориентация в плоскости в таких лент составила всего 6-7° с разбросом по длине всего в 2%. В октябре компания продемонстрировала ленту длиной 155 м, слой

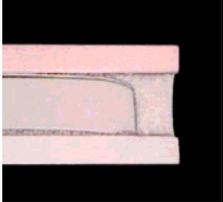
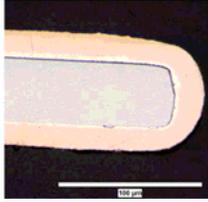
ВТСП в которой был осаждён со скоростью 70 м/ч (в пересчёте на ширину 4 мм). Минимальный критический ток составил 320 А/см с равномерностью 2,5%. По сравнению с прошлым годом свойства ленты улучшились, а скорость в новом оборудовании возросла в 5 раз. В сентябре компания установила новый рекорд для одиночной ВТСП ленты 2-го поколения: критический ток 190 А/см при длине ленты 790 м, что даёт 150100 А·м – за год SuperPower удвоила своё же достижение.

Планы SuperPower на 2008-й год амбициозны: повышение криттока до 200 А в 4-мм проводнике при объёме производства 1000 км в год, повышение скорости электрополирования в 3 раза, осуществление осаждения второго слоя MgO и слоя LaMnO3 в едином технологическом этапе, увеличение скорости MOCVD-процесса и введение в эксплуатацию системы напыления серебра для объёма производства 1000 км ленты в год.

В таблице приведены сравнительные характеристики проводов и технологий их изготовления в компаниях AMSC и SuperPower.

*С.В. Самойленков*

1. [Superconductivity for Electric Systems 2007 Annual Peer Review, USA, Virginia, Arlington.](#)
2. <http://amsuper.com>.
3. <http://www.superpower-inc.com>.

	American Superconductor Corp.	SuperPower Inc.
Подложка	Биаксиально текстурированный сплав Ni с 5 ат. % W (50-75 мкм)	Поликристаллическая лента из хастеллоя C-276 (50 мкм) + электрополировка
Буферный слой	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (75 нм) – PP* YSZ (75 нм) – PP CeO <sub>2</sub> (75 нм) – PP	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (80 нм) – ЭЛИ* Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (7 нм) – ЭЛИ MgO (10 нм) – IBAD MgO (30 нм) – PP LaMnO <sub>3</sub> (30 нм) – ?
Слой YBCO	0,8 мкм, 1,4 мкм, TFA-MOD	1-3 мкм, MOCVD
Слой металла	Ag – напыление на постоянном токе (несколько мкм) упрочнённая медь или нержавеющая сталь – ламинирование в ванне с припоем	Ag (2 мкм) – магнетронное напыление медь (20 мкм) – электроосаждение
Ширина ленты до разрезания, мм	40	12
I <sub>c</sub> , А **	> 70	> 70
Реализовано ленты, м**	> 11 500	> 16 500
Планируемый объём производства в 2008 году, км/год**	720	1000
Вид ленты в сечении		

\* ЭЛИ - электродуговое испарение, PP - реакционное распыление

\*\* в расчёте на 4 мм ширины

## ВТСП УСТРОЙСТВА

### *Сверхпроводниковые устройства для металлургии*

#### Zenergy Power plc

Корпорация Zenergy Power (Rheinbach, Германия) была образована путём слияния трех компаний, занимавшихся разработкой и производством ВТСП материалов и устройств, среди них: Australian Superconductors (Австралия), SC Power Systems (Сан-Франциско, США) и Trithor (Бонн, Германия). Компания Trithor является одним из производителей ВТСП лент 1-го поколения. Компании Australian Superconductors и SC Power Systems уже несколько лет разрабатывают ВТСП токоограничители, ими создано и испытано в энергосистеме несколько полупромышленных прототипов. За счет расширения Zenergy Power пытается занять позицию лидирующего игрока на мировом рынке ВТСП. В ходе своей последней рекламной кампании Zenergy Power заявляла, что будет делать все, чтобы привлечь максимальное число потребителей среди энергетических и промышленных компаний.

Специалистами Trithor недавно была разработана технология волочения труб из цветных металлов (медь, алюминий, бронза) при помощи линейного ВТСП электродвигателя (LIMODRAW) [1], имеющая целый ряд преимуществ перед традиционными для металлургии решениями (рис. 1). Привод осуществляется безо всякого механического контакта, что снижает риск возникновения брака и сокращает механические нагрузки на сварные швы (для шовных труб). Принцип работы LIMODRAW заключается в возбуждении в протягиваемой трубе токов при помощи ВТСП обмоток переменного тока. Так как труба находится во внешнем магнитном поле, то на нее действует сила, которая тянет ее в заданном направлении. Испытания опытного образца установки начались в 2006 г на заводе по производству ВТСП проводника компании Trithor. ВТСП магнитная система работает на переменном токе частотой 25 Гц и намотана из ВТСП ленты на основе Bi-2223 производства Trithor. Так как потери на переменном токе в ВТСП обмотках линейного электродвигателя достигают 700 Вт, то для их охлаждения используется высокопроизводительный криокулер производства Stirling Cryogenics. Хотя параметры установки довольно скромны для полноценного промышленного образца: максимальное усилие 6000 Н при скорости волочения 2-3 м/с, она успешно используется для волочения медных и алюминиевых труб (толщина стенки 2 мм) с диаметром 40 мм до диаметра 38,5 мм.

В последнее время возник класс принципиально новых сверхпроводящих устройств – ВТСП индук-

ционные нагреватели. Их использование в алюминиевой промышленности сулит значительные выгоды связанные как с энергосбережением, так и с ускорением технологического цикла. Разработкой сверхпроводящих индукционных нагревателей в Европе занимается компания Zenergy Power, а также консорциум во главе с SINTEF.



Рис. 1. Установка LIMODRAW в работе.

Несколько месяцев назад стало известно [2, 3], что Zenergy Power получила заказ на ВТСП индукционный нагреватель от компании Weser-Aluminiumbay – одного из крупнейших производителей алюминия в Германии. ВТСП индукционный нагреватель (рис. 2), предназначенный для разогрева алюминиевых слитков перед прокаткой, разработан и изготовлен в компании Trithor. При потребляемой мощности в 0,65 МВт ВТСП нагреватель способен заменить обычный индукционный нагреватель с энергопотреблением около 1 МВт. Конструктивно индукционный нагреватель представляет собой ВТСП катушку постоянного тока, в магнитном поле которой вращается нагреваемый слиток. Магнитное поле приложено перпендикулярно оси вращения слитка. ВТСП катушки нагревателя намотаны из ВТСП провода на основе Bi-2223 производства Trithor. Рабочая температура обмоток составляет около 20 К. Преимущество данного подхода заключается в очень высоком КПД, достигающем 90%, тогда как КПД обычных индукционных нагревателей составляет для старых моделей 35-45% и 55-60% для новейших образцов. Сравнение производительностей сверхпроводящего и традиционных нагревателей представлено на рис. 3. Ожидаемая экономия электроэнергии составит до 43%. В промышленно-развитых странах потребление энергии индуктивными нагревателями в металлургической промышленности составляет от 1 до 5% от всего потребления электроэнергии.



Рис. 2. ВТСП индукционный нагреватель Zenergy Power.



Рис. 3. Сопоставление ВТСП индукционного нагревателя с обычным.

Поставка и монтаж нагревателя на заводе в Миндене запланированы на первую половину 2008 г. ВТСП нагреватель заменит собой обычный индукционный нагреватель с медной обмоткой водяного охлаждения. На сегодня это первое промышленное ВТСП устройство для нужд металлургии. Проект получил значительную финансовую поддержку от Немецкого Фонда Окружающей Среды

Zenergy утверждает, что при полной загрузке ВТСП индукционный нагреватель за счет экономии электроэнергии и сокращения расходов на техническое обслуживание способен окупить себя за 5 лет. Также было заявлено, что стоимость ВТСП нагревателей будет сопоставима с традиционными системами [4]. Для справки, стоимость обычного индукционного нагревателя мощностью в 1 МВт, с учетом затрат на силовую электронику, конденсаторные батареи и монтаж на заводе находится в пределах от 400 до 700 тыс. USD.

#### Проект ALUHEAT

Работы по созданию сверхпроводящих индукционных нагревателей для алюминиевой промышленности ведутся также в рамках проекта ALUHEAT, возглавляемого норвежской частной некоммерческой организацией SINTEF Energy Research. В начавшемся в 2005 г. проекте участвует целый ряд европейских университетов и научных центров, в том числе и исследовательское подразделение компании SKODA.

В 2008 г. планируется разработать, изготовить и испытать на заводе опытный образец сверхпроводящего индукционного нагревателя мощностью 200 кВт (эквивалентного обычным индукционным нагревателям мощностью 300 - 350 кВт) [5]. Индукционный нагреватель ALUHEAT основан на том же принципе что и разработка Zenergy Power: алюминиевый слиток вращается со скоростью 3000 об/мин в магнитном поле перпендикулярном его оси вращения. Магнитное поле в зоне нагрева составляет 0,4-0,5 Тл. Температура нагрева слитка достигает 450-500 С, что потребовало решить целый ряд проблем технологического плана: от обеспечения вращения размягченного слитка до его последующего торможения и вынимания из нагревателя. Габариты нагреваемого слитка  $\varnothing 0,215 \times 0,6$  м. В отличие от устройства Zenergy, магнитное поле создается двумя обмотками из провода на основе  $MgB_2$  производства компании Columbus Superconductors (Италия), что позволит значительно удешевить конструкцию. Бюджет проекта составляет 2,8 млн. EUR, из них 1,8 млн. выделяется Евросоюзом.

*А.А. Никонов, В.И. Щербаков*

1. J. Kellers et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 17, 2121 (2007).
2. Press Release Zenergy Power plc, "HTS Induction Heater Design Contract", September 2007.
3. *Superconductor Week*, 21, no. 18 (2007).
4. *Superconductor Week*, 19, no. 12 (2005).
5. N. Magnusson, M. Runde, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 43, 1019 (2006).

#### **Rolls Royce и Diboride Conductors создают токоограничитель на основе $MgB_2$**

Компания Rolls Royce начала программу по разработке и созданию опытного образца 3-х фазного токоограничителя для сетей 6-10 кВ на основе  $MgB_2$  [1]. Очевидным достоинством  $MgB_2$  является его дешевизна по сравнению с ВТСП материалами. Работы над токоограничителем будут вестись под руководством Центра Стратегических Исследований и отдела Электрических Систем Rolls Royce. Ожидается, что опытный образец токоограничителя

будет установлен на испытательном стенде Scottish Power. В проекте также участвуют University of Manchester, Strathclyde University, компании Hyper Tech Research (Огайо, США) and Scientific Magnetics (Оксфорд). Компания Diboride Conductors (Кембридж) должна обеспечить проект проводками на основе  $MgB_2$ . Финансирование проекта на 50% будет осуществлять правительство Великобритании и, на оставшиеся 50%, упомянутые выше компании. Общий объем финансирования составит £2,5 млн. (5 млн. USD).

Токоограничитель будет выполнен по резистивной схеме, для его работы не потребуются никаких дополнительных электронных устройств. Предполагается, что токоограничитель будет иметь модульную конструкцию. За счет параллельного или последовательного соединения стандартных токоограничивающих модулей можно будет создавать устройства на различные токи и напряжения. Установившийся ток короткого замыкания может быть ограничен до 3-10 значений номинального тока в зависимости от параметров конкретного токоограничителя. Изучение токоограничивающих свойств коротких образцов проводов на основе  $MgB_2$  дало довольно неожиданный результат: токоограничивающие элементы из одножильных проводов ограничивают ударный ток быстрее, чем элементы из многожильных проводов.

По оценкам специалистов Rolls Royce, основной экономический эффект от использования токоограничителя будет связан с продлением срока службы трансформаторов, у которых при коротких замыканиях происходит быстрое старение изоляции. Установка токоограничителей позволит снять эту проблему.

Компания Rolls Royce уже имеет опыт создания токоограничителей на основе  $MgB_2$ . В начале 2007 г. был изготовлен и испытан опытный образец однофазного токоограничителя резистивного типа на 220 В и 1 кА, предназначенного для использования на морских судах. Токоограничитель охлаждался до температуры 24-30 К от криокулера. Работы велись в рамках проекта Electrical Marine Propulsion (SuF-CLEMP). Для прототипа токоограничителя был использован одножильный провод на основе  $MgB_2$  (оболочка из нержавеющей стали 315L), изготовленный по технологии порошок в трубе на заводе компании MISC (Newcastle) которая является партнером Diboride Conductor.

*А.А. Никонов*

1. *Superconductor Week, 21, no, 17, 1 (2007).*

## **КРУПНЫЕ ПРОЕКТЫ**

### ***Тенденции использования***

### ***сверхпроводниковых технологий в Японии***

Весной этого года Международным центром по сверхпроводниковым технологиям (ISTEC, Япония) был проведен форум “Тенденции сверхпроводни-

ковых технологий – 2007”. В форуме участвовало более 200 представителей правительственных, научных, коммерческих организаций. Были представлены результаты исследований и рассмотрены возможные направления развития ВТСП технологий для промышленного использования.

### **Трансформаторы**

В рамках проекта Applied Basic Project разрабатывается трансформатор на рабочие напряжения 66/6,9 кВ мощностью 20 МВА для работы в распределительных сетях. Основные задачи, которые нужно решить на данной фазе проекта, – уменьшение потерь на переменном токе, повышение токонесущей способности проводника и диэлектрической стойкости изоляции.

В частности, разрабатывается следующая технология снижения потерь на переменном токе в 2G ВТСП проводках: с помощью лазера с шириной пучка в несколько микрон в сверхпроводящем слое YBCO и слое серебра выжигаются полоски одинаковой ширины. Таким образом, ВТСП полоски электрически соединяются только через хастеллоевую подложку с высоким удельным сопротивлением. Однако вследствие собственного магнитного поля распределение токов по отдельным полоскам не будет однородным, для обеспечения баланса токов полоски через определенные интервалы замкнуты перемычками. В рамках Applied Basic Project намотана 16-ти слойная катушка из провода длиной 34 м и шириной 10 мм, разделённого на 3 полоски. По сравнению с катушкой из обычного ВТСП провода было обнаружено снижение потерь на переменном токе в 3 раза, при этом через все полоски протекал одинаковый ток. В дальнейшем планируется проверить, будут ли в проводе (длина 74 м, ширина 5 мм), разделённом на пять полос, потери на переменном токе снижены в 5 раз. В случае успешных тестовых испытаний подобная технология снижения потерь на переменном токе может быть использована и для других ВТСП устройств.

Для дальнейшего повышения токонесущей способности ВТСП проводников в рамках Applied Basic Project планируется создание и исследование транспонированного провода на 1 кА, состоящего из нескольких параллельных жил.

Для разработки способов улучшения диэлектрической стойкости изоляции были созданы модельные катушки, которые сейчас испытываются на соответствие нормативам JEC2000 (импульсное перенапряжение 350 кВ, максимальное перенапряжение 140 кВ).

### **Электродвигатели**

Электродвигатели на основе сверхпроводников по сравнению с обычными электрическими машинами отличаются существенно меньшими массогабаритными характеристиками и более высоким КПД.

В рамках Applied Basic Project в прошлом году уже создан прототип электродвигателя для привода гребного винта мощностью 15 кВт и частотой вра-

щения 360 об/мин, хотя в нем сверхпроводящим был только статор, а ротор выполнен из традиционных материалов. К электродвигателю был присоединён винт 50 см в диаметре, в настоящее время он проходит тестовые испытания. В рамках проекта также был разработан электродвигатель на 7,5 кВт со сверхпроводящим ротором и статором из несверхпроводящих материалов. В настоящее время данный двигатель находится в процессе сборки.

#### Криокูลеры

Разработка сверхпроводящих устройств требует развития криогенных систем. Охлаждающие системы должны быть высокоэффективны и экономичны, а также характеризоваться приемлемыми массогабаритными характеристиками.

Для кабелей и трансформаторов требуемая мощность систем охлаждения составляет от 1 кВт до

10 кВт при 64-77 К, для сверхпроводящих индуктивных накопителей энергии: около 1 кВт при 20 К. Подобные требования могут реализовываться посредством нескольких работающих совместно криокюлеров на основе циклов Стирлинга или Гиффорда-Макмагона. Однако, в таких системах достаточно сложно достичь легкости, компактности и высокого КПД. Поэтому в рамках Applied Basic Project началась работа над криокюлером, который, являясь автономной рабочей единицей, смог бы давать необходимые мощности при ресурсе до 30000 часов без техобслуживания. Работа криокюлера основана на использовании турбо-детандера (обратный цикл Брайтона). В ближайших планах поставлено достичь в предлагаемой системе к концу текущего года 2 кВт при 80 К.

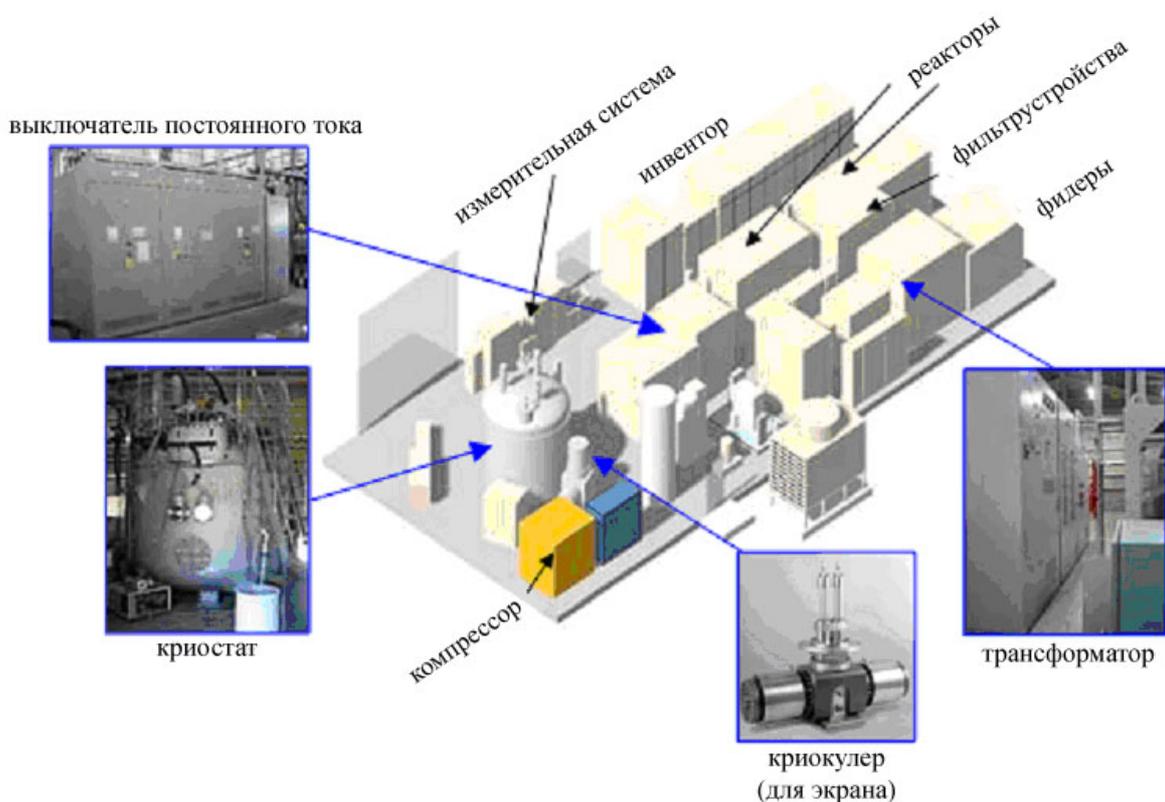


Рис. 1. Испытательная площадка для сверхпроводящего накопителя энергии

#### СПИНЭ

15 июня текущего года NEDO (New Energy and Industrial Technology Development Organization) и Chubu Electric Power Co., Inc объявили о начале контрольных испытаний сверхпроводящего индукционного накопителя энергии (СПИНЭ) на тестовой площадке (рис. 1) в Nikko City (префектура Tochigi). Проект по созданию накопителя, рассчитанный на 4 года, начался в 2004 г, текущий год – последний.

СПИНЭ предназначен для управления энергосистемами, кроме того, СПИНЭ способствует улучшению качества электроэнергии, подавляя флуктуации в сети.

Таблица 1.

Энергия, запасаемая сверхпроводящей катушкой МДж	19
Тип сверхпроводника	NbTi
Рабочая температура, К	4,2
Рабочий ток, А	1350
Рабочее напряжение, кВ	1,1
Максимальное магнитное поле, Тл	4,4

Для испытаний был создан СПИНЭ (основные его параметры приведены в табл. 1) ёмкостью 10 000 кВт ч. Перед включением в силовую сеть планируется провести тестовые испытания не только отдельных компонентов устройства, но и провести всеобъемлющую проверку работоспособности всей системы (включая исследования стабильности системы и сглаживание флуктуаций в течение 20000

циклов полной зарядки и разрядки СПИНЭ). Было предложено включить СПИНЭ в сеть, питающую металлопрокатный завод, создающий флуктуации в электросети, и был создан испытательный центр на базе электростанции Hosoo, принадлежащей Fuji-kava Nikko. В течение 6 месяцев планируется проверить нижеприведенные факторы:

- Стабильность работы системы после многократного заряда/разряда;
- Отклик системы на флуктуации напряжения и частоты;
- Надёжность системы.

*М.П. Смаев*

1. *Superconductivity Web21, fall issue (2007).*

<http://perst.iss sph.kiae.ru/supercond>

**Издатель РИЦ «Курчатовский институт»**

(при поддержке ОАО «НТЦ электроэнергетики» и Фонда «Научный потенциал»)

Научный редактор *Н.А. Черноплеков*, член-корр. РАН,

научный руководитель ИСФТТ РИЦ «Курчатовский институт»

Редакторы *В.С. Высоцкий* [vyotsky@gmail.com](mailto:vyotsky@gmail.com), *В.И. Щербakov* [sherby@iss sph.kiae.ru](mailto:sherby@iss sph.kiae.ru)

Ответственный редактор: *М.П. Смаев* [smayev@sci.lebedev.ru](mailto:smayev@sci.lebedev.ru)

В подготовке выпуска принимали участие: *Л.К. Ковалев, К.Л. Ковалев,*

*А.А. Никонов, Б. Освальд, С.В. Самойленков, В.П. Фирсов*

*А.К. Чернышева* [perst@iss sph.kiae.ru](mailto:perst@iss sph.kiae.ru),

Верстка *И.Л. Фурлетова*