

УДК 621.791.35

## РОЛЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ СОЗДАНИИ НОВОЙ ТЕХНИКИ

**Л. И. Чубраева,**

член-корр. РАН, доктор техн. наук

**В. Ф. Шишлаков,**

доктор техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

*Рассмотрены вопросы, связанные с применением информационных технологий при создании электроэнергетических устройств, систем и комплексов нового поколения, принцип действия которых основан на использовании явления высокотемпературной сверхпроводимости.*

**Ключевые слова** — информационные технологии, высокотемпературная сверхпроводимость.

### Введение

Созданный в 2005 г. Научно-исследовательский институт инновационных технологий в электромеханике и электроэнергетике Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения (НИИ ИТЭЭ ГУП) уделяет большое внимание совершенствованию информационных технологий (ИТ), используемых при создании новой техники.

Основная часть научных исследований, выполняемых НИИ ИТЭЭ, относится к поисковым работам. Только за последние 3 года выполнено несколько НИР и ОКР, связанных с созданием и экспериментальными исследованиями уникальных электротехнических устройств, не имеющих аналогов в мировой практике.

1. Проведены комплексные теоретические и экспериментальные исследования силовых регуляторов тока (сверхпроводниковых накопителей энергии (СПИН) и сверхпроводниковых ограничителей тока). Создан и экспериментально исследован СПИН энергоемкостью 4,5 МДж; дана оценка возможностей применения силовых регуляторов тока для повышения устойчивости и надежности электроэнергетических систем и комплексов со сверхпроводниковым оборудованием, использующим высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП).

2. Проведены экспериментальные исследования влияния высокочастотных электромагнитных полей, в том числе сложной конфигурации, на магнитные характеристики конструкцион-

ных наноматериалов (аморфных сплавов, ВТСП-массивов, ВТСП-лент, постоянных магнитов), применяемых при изготовлении сверхпроводниковых электроэнергетических устройств, а также экспериментальные исследования ВТСП СПИН с комбинированным преобразователем и накопителем энергии.

3. Сформирован научный подход к выработке критериев оптимизации ВТСП-устройств и комплексов, обеспечивающих энергосбережение на этапах разработки, изготовления и эксплуатации. Проведены экспериментальные исследования динамических режимов ВТСП-устройств на макетных образцах. Разработаны научные основы физического, электродинамического и математического моделирования ВТСП-систем по критериям энергосбережения. Разработан метод параметрической оптимизации ВТСП-устройств, обеспечивающих заданные критерии по энергосбережению, а также методики текущей и многокритериальной оптимизации процессов изготовления ВТСП-устройств с обеспечением ресурсо- и энергосбережения.

4. Совместно с Университетом Бен-Гуриона (Израиль) разработаны научные основы создания солнечно- и ветроэнергетической установки повышенной надежности и экологической безопасности за счет использования сверхпроводниковых устройств (рис. 1) [1].

5. Разработан проект ветрогенератора с ВТСП-обмотками мощностью 1 МВт, а также разработан, создан и испытан ВТСП синхронный ветрогенератор мощностью 50 кВт и высокомомент-



■ **Рис. 1.** Комбинированная солнечно- и ветроэнергетическая установка со сверхпроводниковыми устройствами

ный синхронный двигатель с ВТСП-обмоткой статора.

Все это стало возможным благодаря широкому внедрению ИТ на всех этапах работ.

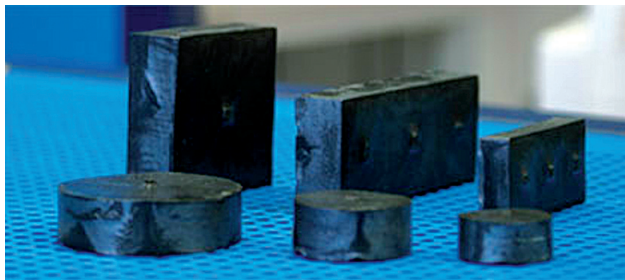
### Информационные технологии на этапе выбора направления для научных исследований

На этапе выбора стратегии научных исследований работы с использованием ИТ проводятся по двум направлениям. С одной стороны, анализируются результаты выполненных научных разработок как в нашей стране, так и за рубежом. Это относится к изучению технической литературы и материалов российских и международных конференций. С другой — проводится расширенный патентный поиск, который позволяет определить изобретателей или компании, получившие патенты или другие охраняемые документы в области предполагаемых исследований, найти последние новые решения и оценить состояние рынка по данному направлению.

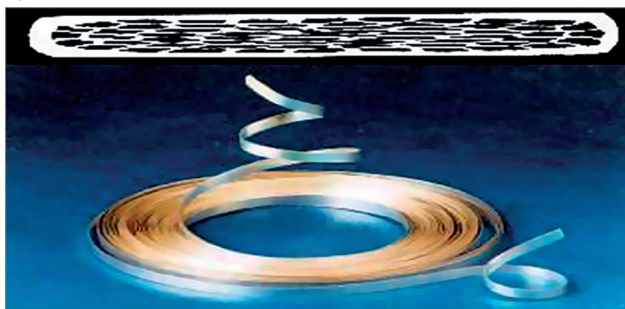
При выборе направлений разработки нового поколения электромеханических преобразователей энергии для общепромышленной и специальной энергетики, базирующихся на широком использовании наноматериалов и нанотехнологий, на основе анализа научно-технической литературы и патентного поиска было выявлено следующее. В настоящее время производство массивных ВТСП (рис. 2, а) имеет ограничения по размерам, и в большинстве случаев такие ВТСП не могут использоваться в качестве индукторов большинства синхронных электрических машин. Возможны применения составных ВТСП-массивов для гистерезисных машин и систем магнитного подвеса, поскольку наведенные электрические токи замыкаются в пределах одного ВТСП-массива.

Поэтому стало ясно, что на данном этапе целесообразно для индукторов использовать высококоэрцитивные постоянные магниты на основе редкоземельных металлов. Это позволит в последующем, по мере совершенствования технологий, перейти к применению ВТСП-массивов.

а)



б)



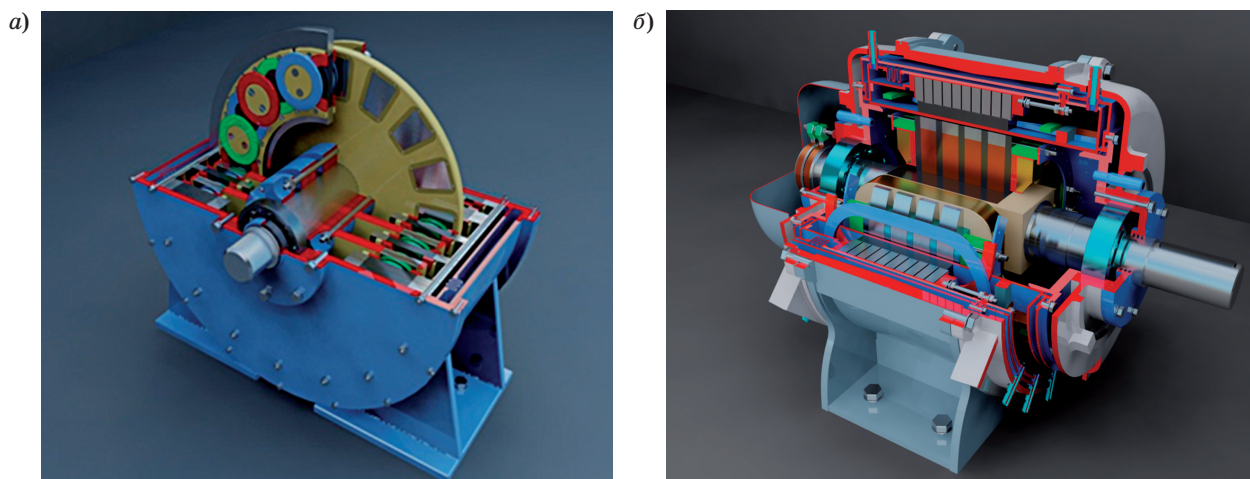
■ **Рис. 2.** Образцы массивных (а) и ленточных (б) ВТСП

Производство ленточных ВТСП-проводов как 1-го, так и 2-го поколения (рис. 2, б) пока основано на изготовлении длиномерных лент со сравнительно небольшой величиной тока (с точки зрения экономически эффективных сверхпроводниковых электрических машин) на уровне 150–250 А. Производство транспонированных ВТСП-проводов на большие токи находится пока в стадии разработки. В то же время развитие техники требует создания опытных образцов ВТСП-устройств в целях определения направлений их дальнейшего использования.

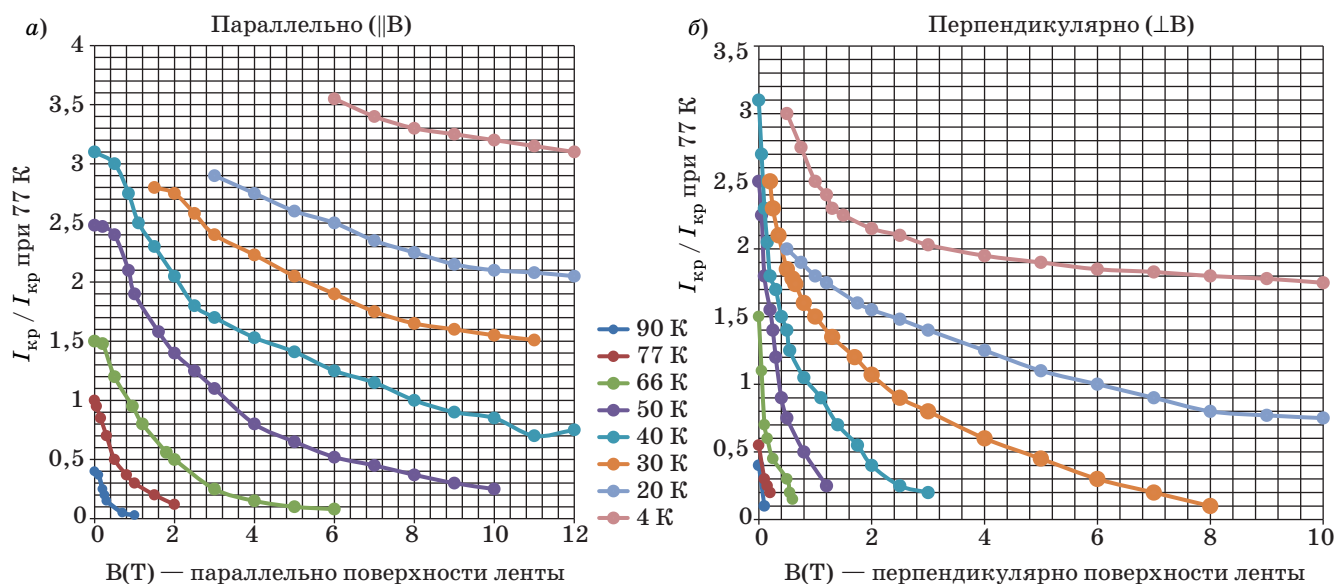
В результате были выбраны два направления создания опытных образцов сравнительно большой мощности, в которых могут быть получены большие рабочие токи (рис. 3, а, б).

Основная часть отечественных и зарубежных разработок основана на применении ВТСП-материалов для индукторов электрических машин, по аналогии с устройствами из низкотемпературных сверхпроводников. Однако ВТСП-материалы отличается высокая анизотропия во внешних магнитных полях (рис. 4, а, б). Это особенно заметно при рабочих температурах на уровне жидкого азота. В результате разработчики идут на применение в качестве хладагента жидкого неона, что сокращает объем потенциального рынка и вызывает сомнения в перспективности общепромышленного использования по ряду причин, в частности, из-за высокой стоимости неона по сравнению с азотом.

Поэтому разработчиками ВТСП-устройств, специалистами НИИ ИТЭЭ, было принято решение



■ Рис. 3. ВТСП синхронные машины с радиальным (а) и аксиальным (б) магнитным потоком



■ Рис. 4. Характеристики ВТСП-материалов в продольном (а) и поперечном (б) магнитном поле при различных температурах

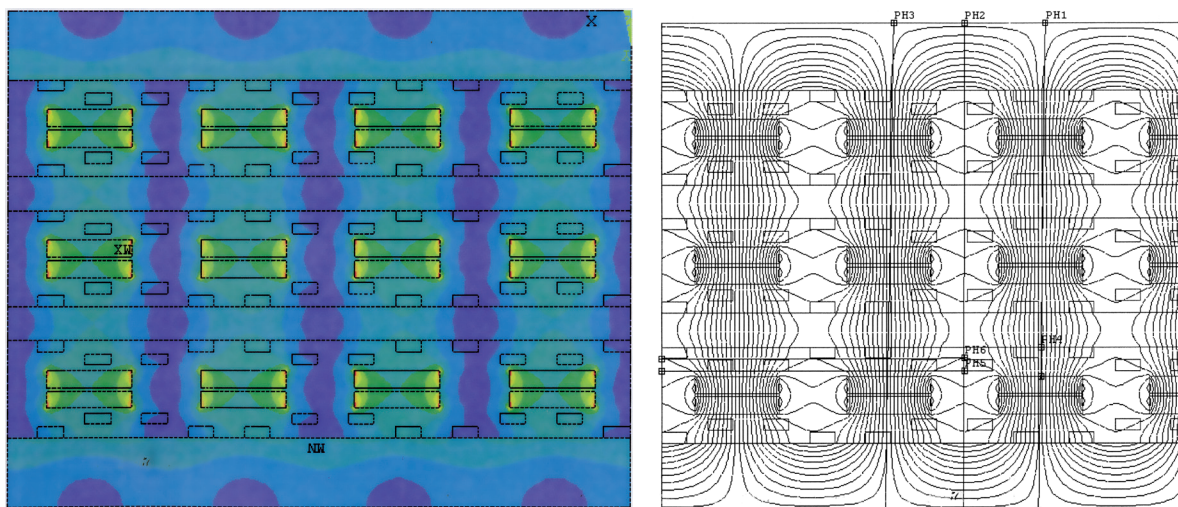
о применении ВТСП-лент для обмоток статоров, а не для обмоток роторов. Но для окончательной разработки такого типа электромеханических преобразователей энергии потребовалось математическое моделирование электромагнитных и тепловых полей.

### Информационные технологии на этапе проектирования инновационных устройств

Моделирование электромагнитных полей с использованием программного обеспечения wxFEMAG показало правильность выбранного технического решения, поскольку удалось предложить конструктивные и технологические решения, обеспечившие необходимое распределение

электромагнитных полей относительно ВТСП-лент: рабочий магнитный поток направлен перпендикулярно узкой, а не широкой стороне ленты (рис. 5) в многодисковой синхронной машине с аксиальным магнитным потоком. В машине с радиальным магнитным потоком седлообразные катушки обмотки статора уложены в пазы, которые защищают ВТСП-материал от рабочего магнитного потока, и потери наводятся только небольшим по величине собственным потоком рассеяния. Такие конструкции могут применяться в электрических генераторах, двигателях и синхронных компенсаторах.

Работы по созданию электрических трансформаторов показали целесообразность возврата к трансформаторам броневого конструктива, осо-



■ **Рис. 5.** Характер распределения магнитного поля в зоне обмотки статора

бенно в устройствах сравнительно небольшой мощности. В отличие от предыдущего поколения броневых трансформаторов, одним из основных недостатков которого является трудность проведения ремонтных работ, предложенная конструкция обеспечивает полную ремонтпригодность с одновременным снижением доли ручного труда. При этом, как и в других типах электрических машин, обеспечивается наиболее благоприятное распределение магнитных полей относительно ВТСП-обмоток.

Последующий этап компьютерного проектирования производится из условия обеспечения ресурсо- и энергосбережения, снижения массогабаритных показателей и упрощения процесса изготовления за счет снижения доли ручного труда и замены последовательных дорожных карт производства картами с максимальным количеством параллельных участков. Используются компьютеризированные средства многокритериальных задач оптимизации и многофакторного математического моделирования.

Для проверки работоспособности проектируемого устройства в реальных условиях эксплуатации моделируются режимы наброса и сброса нагрузки, регулирования активной и реактивной мощности, переходных процессов при синхронизации с энергосистемой бесконечной мощности или с аналогичными по мощности устройствами автономной энергетики, переходных процессов при симметричных и несимметричных коротких замыканиях и др.

Большая роль на этапе проектирования отводится визуализации процессов изготовления и сборки разрабатываемых устройств с помощью специальных компьютерных программ. В результате имеется возможность не только демонстрировать заказчику весь ход работ, но и посто-

янно вносить корректировки как в конструкцию, так и в технологию изготовления устройства в целях его совершенствования.

### Информационные технологии и физическое моделирование

Информационные технологии позволяют минимизировать затраты времени на физическое моделирование за счет многокритериальной оценки достоверности математических моделей, начиная с постановки задачи, принятых упрощений и граничных условий. После этого начинается процесс разработки и изготовления достоверной физической модели с использованием компьютерных технологий.

Так, например, при изготовлении ВТСП-обмотки статора одного из устройств было принято решение о моделировании различных технологий процесса создания электрических соединений отдельных ВТСП-катушек (рис. 6) [2]. Этот



■ **Рис. 6.** Моделирование электрических соединений ВТСП-лент

элемент имеет большое значение для работоспособности обмотки и устройства в целом, поскольку при неправильном его выполнении возможна потеря сверхпроводящего состояния с сохранением обмоткой только резистивных режимов работы. Математическое моделирование этого элемента невозможно даже при многокритериальном подходе, учитывающем электрические, магнитные и теплофизические характеристики.

Аналогичная роль отводилась модели для исследования потерь на трение в многодисковой машине погружного исполнения [3].

Использование ИТ при разработке методологии экспериментальных исследований, оптимизации процессов измерений и обработке полученной информации позволяет оптимизировать исследуемые процессы по требуемым критериям и получить научно обоснованные рекомендации.

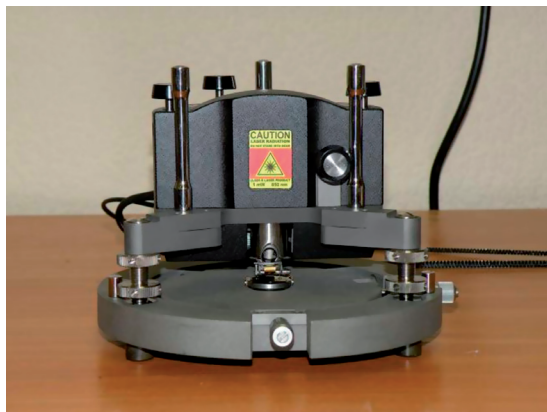
### Информационные технологии на этапе разработки математической теории планирования эксперимента

Основной задачей этапа является разработка рациональных методик испытаний отдельных узлов перед сборкой устройства в целом и устройства после его сборки. На основании этой инфор-

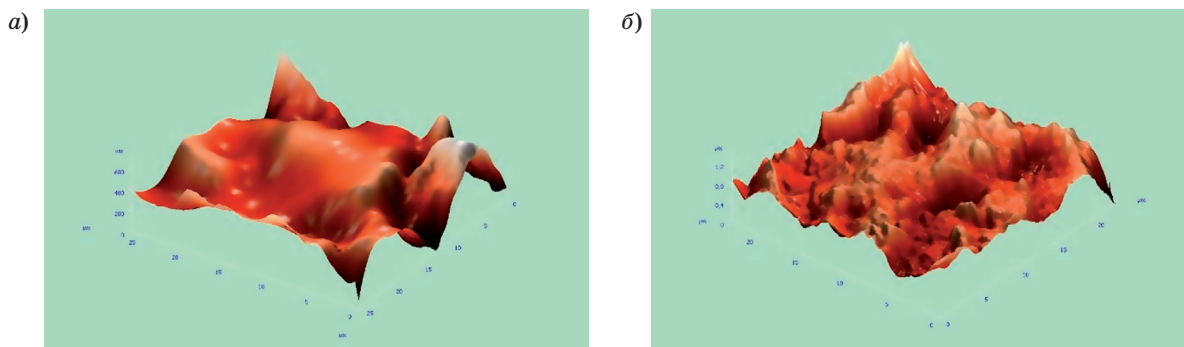
мации производится разработка схемы размещения датчиков, определение необходимой контрольно-измерительной аппаратуры, а также разработка автоматизированной системы управления экспериментом. Разработка многофакторного эксперимента, каким является экспериментальное исследование криогенных электротехнических устройств, представляет собой исключительно сложную научную и техническую задачу. Кроме традиционных электрических, электромагнитных и механических измерений необходимы исследования, контролируемые сверхпроводящее состояние токоведущих элементов; исследования, связанные с функционированием криогенной техники, и др. Все это может быть решено только на основе современных компьютерных технологий с постоянным совершенствованием экспериментальной базы и технологии получения информации и ее обработки.

В качестве примера приведем результаты некоторых разработок.

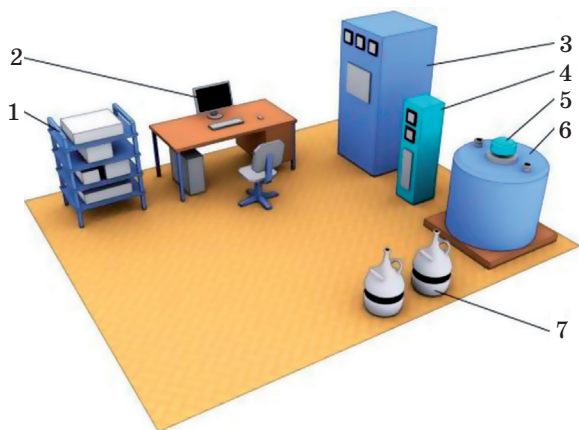
Методы исследования характеристик конструкционных наноматериалов и сверхпроводников с помощью зондовой микроскопии (рис. 7 и 8, а, б) обеспечивают проведение исследований характеристик и свойств наноматериалов (в том числе ВТСП) с поддержкой ряда измерительных мето-



■ Рис. 7. Сканирующий зондовый микроскоп с сольвером



■ Рис. 8. Изображение рельефа поверхности феррита до (а) и после (б) термоциклирования в виде 3D



■ **Рис. 9.** Общий вид измерительного комплекса: 1 — стойка с приборами; 2 — персональный компьютер; 3 — электрический шкаф управления; 4 — ЛАТР; 5 — датчик положения ротора; 6 — синхронный ВТСП-двигатель в криостате; 7 — сосуды Дюара с жидким азотом

дик. К ним относятся контактная и резонансная атомно-силовая микроскопия, микроскопия латеральных сил, метод отображения фазы, метод модуляции силы, изображение силы адгезии, отображение сопротивления растекания, сканирующая емкостная микроскопия, метод зонда Кельвина, магнитно-силовая микроскопия, электронно-силовая микроскопия. Исследовательский комплекс включает атомно-силовую микроскопию, рабочую станцию управления атомно-силовым микроскопом, лазер, набор зондовых датчиков, платформу установки и перемещения образцов, а также сканер-анализатор магнитного поля.

Универсальная компьютерная система комплексного контроля и регистрации параметров работы оборудования (рис. 9) предназначена для контроля, регистрации и последующей обработки результатов испытаний опытного образца электроэнергетической установки. Система включает блок измерителей, позволяющий получать информацию о величинах фазных и линейных напряжений и токов, температуре ВТСП-устройств и магнитной индукции генератора и двигателя. Измерения производятся с помощью специализированных датчиков, обеспечивающих точное

измерение параметров установки и ее гальваническую развязку с системой обработки информации. Кроме того, в ее состав входят усилительный блок, предназначенный для согласования по напряжению и нормировки сигналов датчиков; блок аналого-цифровых преобразователей на базе модулей АЦП-ЦАП 16/16 SigmaUSB, позволяющих подключать и обрабатывать разнородные источники сигналов с различными частотными диапазонами и проводить сравнительный анализ. Цифровой вход/выход может использоваться для контроля и управления дискретными элементами: реле, переключателями, концевыми датчиками. Модуль может быть использован автономно в качестве контроллера для систем обработки сигналов и управления различными устройствами и исполнительными механизмами.

### Заключение

Таким образом, только использование новейших достижений информационных технологий на всех этапах создания инновационной техники — от выбора направления работ до приемо-сдаточных экспериментальных исследований готовых изделий — позволяет выполнять исследования на высоком научно-техническом уровне, в короткие сроки и на уровне лучших мировых образцов.

### Литература

1. Chubraeva L., Sokolovsky V., Meerovich V. Investigation of inductive FCL with a split winding and SMES with magnetic core intended for operation in superconducting complexes // *Сверхпроводимость: исследования и разработки*. 2010. № 1. С. 23–31.
2. Чубраева Л. И., Шишлаков В. Ф. и др. Физическое моделирование процессов в ВТСП проводах и изделиях // *Информационно-управляющие системы*. 2011. № 4. С. 47–52.
3. Чубраева Л. И., Шишлаков В. Ф. и др. Физическое моделирование потерь на трение в режиме холостого хода синхронного ВТСП двигателя // *Информационно-управляющие системы*. 2011. № 3. С. 34–46.