

БЕСКОНТАКТНЫЙ УГЛЕРОДНЫЙ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬ – ОГРАНИЧИТЕЛЬ ТОКА КАК ЭЛЕМЕНТ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ СЕТЯМИ И ИХ ЗАЩИТЫ В ТЕХНОЛОГИИ SMART GRID

С.Г. Лебедев, стар. науч. сотр. ФГБУН Институт ядерных исследований РАН, канд. физ.-мат. наук, serleb@yandex.ru

Н.И. Андриянов, нач. отд. ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, andrnick@extech.ru

С.П. Юркевичус, вед. науч. сотр. ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, канд. техн. наук, доц., jursp@extech.ru

С.В. Генералова, ст. науч. сотр. ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, generalova@extech.ru

В статье приведены материалы по разработке в РФ перспективных устройств управления электросетями – бесконтактных углеродных токоограничителей (БУТ). Показаны варианты их будущего применения в различных областях техники, в том числе и как элементов системы управления электрическими сетями и их защиты в технологии Smart Grid.

Ключевые слова: интеллектуальная электроэнергетическая система с активно-адаптивной сетью (ИЭС ААС), технологии Smart Grid, бесконтактный углеродный токоограничитель (БУТ).

CONTACTLESS CARBON SWITCH – CURRENT LIMITER AS PART OF THE SYSTEM NETWORK MANAGEMENT AND PROTECTION IN SMART GRID TECHNOLOGY

S.G. Lebedev, Senior Researcher, Institute for Nuclear Research of RAS, Doctor of Physics and Mathematics, serleb@yandex.ru

N.I. Andriyanov, Head of Department, SRI FRCEC, andrnick@extech.ru

S.P. Yourkevitchus, Leading Researcher, SRI FRCEC, Doctor of Engineering, Assistant Professor, jursp@extech.ru

S.V. Generalova, Senior Researcher, SRI FRCEC, generalova@extech.ru

The article presents materials on the development in Russia of the promising devices that control power grids – contactless carbon current limiters (CCCL). It shows options for their future applications in various fields of technology, including their use as the management system elements of electrical networks and their protection in Smart Grid technology.

Keywords: intelligent power system with active-adaptive network (the Smart Grid), Smart Grid technology, contactless carbon current-limiter (CCCL).

Введение. Действующие системы электроэнергетики в большинстве стран мира (Россия не исключение) созданы достаточно давно, технологически и морально устарели и не соответствуют современным требованиям потребителей по доступности использования электроэнергии, надежности ее получения, качеству и экономичности. По этой причине в ряде стран мира (США, ЕС, КНР, Япония) поставлен вопрос реконструкции энергосистем на основе новых технологий, принципов построения и систем управления. В российской электроэнергетике при выполнении работ по реконструкции ее технологической базы, также поставлен вопрос построения нового облика электроэнергетики, как клиенто- и социально-ориентированной системообразующей инфраструктуры страны. Данная структура получила название – интеллектуальная электроэнергетическая система с активно-адаптивной сетью (ИЭС ААС).

ИЭС ААС – это энергосистема нового поколения, основанная на мульти-агентном принципе управления ее функционированием и развитием. Ее цель – обеспечение эффективного использования всех видов ресурсов (природных, социально-производственных и человеческих) для надежного, качественного и эффективного энергоснабжения потребителей энергии за счет гибкого взаимодействия ее субъектов (всех видов генерации, электрических сетей и потребителей) на основе современных технологических средств и единой интеллектуальной системы управления.

Переход от действующей энергосистемы к *ИЭС ААС* требует использования современных подходов не только в части применения нового оборудования и технологий в силовой части энергосистемы, но и создания и освоения принципиально новых систем управления электроэнергетической системой.

Очевидно, что совершенствование функционирования электроэнергетики, повышение качества и надежности электроснабжения потребителей в современных условиях возможно лишь при условии инновационного развития отрасли на основе достижений фундаментальной науки, создания и внедрения новых эффективных, более надежных и долговечных материалов, оборудования и технологий, глубокого и всестороннего диагностирования, аудита и мониторинга состояния оборудования, энергообъектов, систем управления. Одним из элементов совершенствования являются изменения в системе управления – от управления за счет коммутаций к качественно новой интеллектуальной системе в режиме реального времени.

Среди прорывных и улучшающих технологий, используемых при создании *ИЭС ААС*, значатся и технологии производства и использования токоограничивающих устройств.

Все это потребовало более широкого участия государства в этом процессе и адекватного инвестиционного обеспечения целевых научных и производственных программ по приоритетным направлениям развития электроэнергетики.

В рамках технологической платформы «Интеллектуальная энергетическая система России» в стратегических направлениях исследований особое место занимают направления по разработке принципов, методов и механизмов формирования интегрированных интеллектуальных систем энергоснабжения с активными потребителями и координированным управлением, обеспечивающим повышение надежности, безопасности и экономической эффективности энергоснабжения.

Как сказал президент РАН В. Фортов в интервью Российской газете 23.03.2015 г.: «Недавно я передал Владимиру Владимировичу Путину четыре больших проекта. Второй проект связан с энергетикой. Речь идет о так называемых парогазовых установках. Их КПД сразу в 2 раза выше, чем у нынешних систем, поэтому внедрение сулит огромный экономический эффект. Точно так же, как и проект «Умные сети». Сейчас это бум в мировой электротехнике. Такие системы в 2–3 раза снижают потери в электрических сетях, многократно повышают их надежность, позволяют легко адаптировать возобновляемые источники энергии».

Вместе с тем, одной из основных проблем электроэнергетики остаются потери в электрических сетях. Сверхнормативные потери электроэнергии в электрических сетях – это не только прямые финансовые убытки электросетевых компаний, но и значительное повышение энергоемкости национального продукта в целом. Экономия от снижения потерь можно было бы направить на техническое переоснащение сетей; увеличение зарплаты персонала; совершенствование организации передачи и распределения электроэнергии; повышение надежности и качества электроснабжения потребителей; уменьшение тарифов на электроэнергию. Другой очевидной проблемой, связанной с передачей и потреблением электрической энергии, являются короткие замыкания в электросетях, приводящие к пожароопасным ситуациям. Борьба с токами короткого замыкания является одной из ключевых задач в электрических сетях, т. к. нагрев в короткозамкнутой сети прямо пропорционален времени, необходимому для срабатывания штатного ограничителя тока, то представляется очень важным иметь наиболее высокую скорость срабатывания автоматических выключателей-ограничи-

телей тока. Кроме того, немаловажной проблемой являются помехи и «шум» в электросетях, в немалой степени обусловленные «дребезгом» контактов при работе инерционных релейных контактов автоматических выключателей-ограничителей тока.

Умные сети могут включать в себя различные наборы «умных» компонентов – от счетчиков до автоматов повторного включения либо отдельные элементы, повышающие эффективность и устойчивость энергосистемы и делающие сети «умными» в какой-то их части.

Таким образом, из концепции умных сетей, наличия потерь в электросетях, и необходимости борьбы с токами короткого замыкания, следует необходимость разработки новых типов токоограничителей с высоким быстродействием, малыми габаритами, отсутствием пожароопасных электрической искры и дуги, а также снижения помех в сети за счет исключения «дребезга» контактов токоограничителей. Кроме того, перспективные токоограничители должны соответствовать концепции умных сетей, т. е. обладать своеобразным «интеллектом» – самостоятельно, без вмешательства оператора, отключаться при достижении током критического для цепи значения.

Разработка бесконтактных углеродных токоограничителей

Среди перспективных научно-технологических направлений развития приборов электротехники помимо сверхпроводимости в России следует выделить разработку и создание прототипов бесконтактных переключателей – ограничителей тока на основе эффекта переключения, обнаруженного в углеродных пленках – бесконтактных углеродных токоограничителей (БУТ).

БУТ – это принципиально новое поколение ограничителей тока, управляемых исключительно электрическим током. К 2025 г. планируется создание достаточного количества и ассортимента «умных рубильников» для отечественных энергоэффективных интеллектуальных энергетических сетей, модернизации энергетических секторов всех отраслей промышленности, в особенности, таких как ЖКХ, РЖД, военно-промышленный комплекс (бортовые энергосети), радиоэлектроника (критические узлы электронных схем). Конечным продуктом являются ограничители тока, отключатели цепи, расцепители, устройства защитного отключения (УЗО), умные микросхемы (Smart chips).

В таблице показаны в сравнении основные параметры трех основных систем токовой защиты.

Сравнение параметров продукта проекта с аналогами

Наименование модели	Стадия	Страна	Критический ток	Время переключения	Дуга, дребезг искра	Цена продажи, \$
ETIMAT	На рынке	Германия	63–100 А	секунды	есть	10–100
COT	На рынке	США	1000 А	миллисекунды	нет	1000–10000
	Разработка	Россия			нет	
БУТ	Разработка	Россия	Сейчас – 3А, через 2 года – 100 А, через 4 года – 1000 А	100 мксек	нет	10–100

От существующих инерционных автоматических выключателей типа ETIMAT и им подобных БУТ отличается отсутствием инерционных элементов типа реле, биметаллических контактов, что увеличивает быстродействие, уменьшает пожароопасность и повышает помехозащищенность электрических сетей. Сверхпроводящий ограничитель тока (COT) требует криогенного охлаждения и работает при сверхнизких температурах, тогда как БУТ работает при тем-

пературах до 350 °С, по сравнению с СОР имеет гораздо меньшие габариты и цену и отличаются полным отсутствием тока в состоянии «выключено», т. е. является отключателем цепи.

Существующие на рынке решения не удовлетворяют потребностям по энергоэффективности из-за малого быстродействия, наличия электрической дуги, искры и «дребезга», которые отсутствуют в предлагаемом продукте. Все это создает весьма благоприятные перспективы активных продаж БУТ продуктов на российском и мировом рынках.

Графитоподобные гранулярные пленки вот уже 40 лет привлекают к себе внимание своими аномальными электромагнитными свойствами, и в настоящее время, работы, особенно теоретические, по графитоподобным гранулярным системам, графену, идут полным ходом [1–3].

В Институте ядерных исследований РАН работы с углеродными пленками ведутся со второй половины 80 гг. прошлого века. В результате проведения предварительных поисковых исследований по предлагаемой тематике, были обнаружены аномальные электромагнитные эффекты в углеродных наногранулярных пленках, такие как: скачок сопротивления на несколько порядков величины при критических токах 10–1000 мА, детектирование СВЧ – излучения, осцилляции намагниченности в магнитных полях 1–5 Т, генерацией оптического излучения во временной окрестности скачка сопротивления. Указанные эффекты объясняются существованием в пленках среды джозефсоновских контактов [3], в роли которых могут выступать графитоподобные гранулы, помещенные в матрицу из аморфного углерода [4–5]. Оптимизация структуры гранулярных графитоподобных пленок с целью усиления указанных выше эффектов позволит разработать новый чрезвычайно перспективный функциональный материал для создания устройств некриогенной джозефсоновской электроники. Так, многие авторы серьезно рассматривают возможность высокотемпературной (точнее, даже горячей) сверхпроводимости в таких системах с критической температурой до 650 К [3,9–10]. А это значит, что для работы органических транзисторов на основе фуллеренов, которые уже в течение длительного времени разрабатываются в США [11], не потребуется криогенное охлаждение жидким гелием. Работы по исследованию наноструктурированных углеродных пленок, а также графена находятся на переднем крае современной наноэлектроники во всем мире [6–8].

Разработка подобного материала может оказаться настоящим прорывом России в области наноэлектроники. Полученные результаты являются абсолютно новыми, часть из них получена впервые.

Работа по созданию БУТ продолжается вот уже 15 лет [12]. За это время частично исследованы эффекты переключения проводимости, осцилляций намагниченности, генерации и детектирования СВЧ, генерации ИК – излучения в момент переключения проводимости, а также их временные, полевые и температурные зависимости.

БУТ представляют собой тонкие, толщиной ~ 1 мкм наноструктурированные углеродные пленки, нанесенные на кварцевую подложку с размерами в плане $0.5 \times 1 \text{ см}^2$. Данные размеры могут быть уменьшены до микронных масштабов без ущерба для работоспособности БУТ. Переключение из состояния с низким сопротивлением в состояние с высоким (в 104–105 раз большим, т. е., практически, изолятор) сопротивлением происходит за время порядка 100 мкс, по сравнению с секундами у традиционных выключателей-автоматов, используемых ныне в бытовых электросетях. Столь высокое быстродействие существенно снижает опасность поражения электрическим током и пожароопасность при использовании в бытовых и промышленных электрических сетях.

Механизм переключения БУТ основан на квантовом эффекте локализации носителей с повышением температуры. Электронная подсистема носителей тока испытывает перегрев относительно фононной подсистемы атомных ядер и в пределах времени релаксации характеризуется своей собственной температурой, значительно 6–10 раз превосходящей стационарную температуру. При этом длина пробега носителей тока резко уменьшается, и носители локализуются, что приводит к резкому увеличению электросопротивления материала.

Отключение БУТ происходит из-за резкого уменьшения длины пробега носителей тока и их квантовой локализации внутри нанокристаллов графита. Данный процесс полностью управляется электрическим током, поэтому БУТ с полным правом можно назвать «умными рубильниками».

Немаловажным преимуществом БУТ является его способность к автоматическому повторному включению (АПВ).

На основе БУТ будут построены интеллектуальные энергетические сети в различных областях промышленности: ЖКХ (умные дома), энергетика (Smart Grid), РЖД (тяговые сети), ВПК (бортовые энергосети), спецпроизводства с повышенной пожаро- и взрыво- опасностью, радиоэлектроника (умные микросхемы).

Разработка БУТ и последующее его внедрение в различных отраслях может оказаться настоящим прорывом России в области хайтека, а также создать базис для экспансии данных российских технологий на глобальном рынке.

Драйвером роста продаж может быть замена в Smart Grids инерционных плавких ограничителей тока, а также дорогих и габаритных СОТ на дешевые и компактные БУТ в тех же сетевых конфигурациях (БУТ+трансформатор, при этом исключается пожароопасное трансформаторное масло).

В конечном счете, в силу преимуществ БУТ по сравнению с другими типами токоограничителей (инерционными, сверхпроводящими, полупроводниковыми), будет создана новая индустрия интеллектуальных БУТ – «умных рубильников».

Результатами должно стать достижение следующих эффектов [12]:

1. Разработка, патентование, изготовление технической документации, сертификация, внедрение в производство и производство достаточного количества и необходимого ассортимента БУТ с токами отключения до 100 А для сектора ЖКХ, спецприменений (пожаро-, взрыво- опасные производства) – объем рынка в России к 2025 г. составит более 100 млрд руб., а в мире – более 6 трлн руб. (в ценах середины 2014 г.).

2. Разработка, патентование, изготовление технической документации, сертификация, внедрение в производство и производство достаточного количества и необходимого ассортимента БУТ с токами отключения до 1000 А для промышленности, РЖД, ВПК, энергосетей – объем этого рынка в России к 2025 г. составит 900 млрд рублей.

3. Разработка, патентование, изготовление технической документации, сертификация, внедрение в производство и производство достаточного количества и необходимого ассортимента БУТ (матричной структуры) с токами отключения до 10 кА для мощных энергетических сетей.

4. Замена 70–80 % сверхпроводящих токоограничителей и оборудования на БУТ, объем рынка в 2020 г. составит 8,5 трлн руб.

По инерционным выключателям, учитывая большой износ оборудования и расширение рынка в связи с новым строительством, можно ожидать ежегодного прироста в России в размере не менее 20 % (по данным www.iqelectro.ru).

Основной технологией получения углеродных пленок, используемых при производстве бесконтактных токоограничителей, является химическое осаждение из газовой фазы (CVD). Данная технология широко используется в промышленности и легко адаптируется к условиям массового производства. Проектом предусмотрена оптимизация параметров CVD процесса для получения нанографитовых (НГ) пленок нужной структуры, толщины, шероховатости поверхности, типа подложки.

Другой принципиально важной для выполнения проекта технологией является вакуумное осаждение металлических тоководов на поверхность НГ пленки с применением метода литографии, возможно, даже нанолитографии. Данные технологии в настоящее время достаточно хорошо отработаны при производстве интегральных схем и печатных плат.

Основные риски проекта сосредоточены в технологической плоскости. Для минимизации этих рисков необходимо завершение НИОКР по повышению токов, увеличению кратности переключения, вариации технологии осаждения пленки для получения плоской однородной поверхности, а также условий охлаждения БУТ во время работы.

Имеющиеся наработки и ноу-хау защищены патентами РФ № 2212735, и № 2420831, и более чем 30 научными публикациями и монографиями, большое количество информации о технологиях производства и дальнейшем развитии проекта – увеличении переключающих токов до 10 кА сохраняется в режиме ноу-хау и требует патентования, в том числе, за рубежом.

Для изучения природы и особенностей аномального электромагнетизма углеродных конденсатов были предприняты комплексные и дорогостоящие исследования в Лаборатории сверхпроводимости Университета г. Лейпцига (Германия) и Хьюстонском Центре сверхпроводимости (США) с использованием СКВИД – магнитометрии, электронной микроскопии, магнитной силовой микроскопии, измерений температурных зависимостей электросопротивления и джозефсоновских сигналов. Средства для реализации перечисленных выше исследований на конкурсной основе были получены в качестве гранта Немецкого Научного Общества в 2001 г.

На данный момент достигнуто соглашение с ОАО «СКТБ по релейной технике» г. Великий Новгород по разработке конструкторской документации и изготовлении опытного образца БУТ.

Что касается последующих за минимизацией технологических рисков с помощью НИОКР работ по коммерциализации продуктов БУТ, то имеется большое количество заинтересованных частных структур, венчурных компаний и институтов развития, готовых на полное финансирование отдельных стадий проекта, так и на их софинансирование. Вот не полный список этих структур: Atom&Partners, Физтех Венчурс, Технопарк Якутия, Венчурная компания Якутия, УК Лидер, Waarde Capital, International Center of Innovation Development, FinEX Plus, УК «Сбережения и инвестиции», 15 бизнес-ангелов.

Проект разработки БУТ дважды выходил в финал Конкурса русских инноваций, вышел во второй тур Всероссийского конкурсного отбора инновационных проектов аспирантов и студентов «Индустрия наносистем и материалы», был представлен на Общероссийском совещании ученых-экспертов в области наноуглеродных материалов в Троицком институте сверхтвердых и новых углеродных материалов (ФГУ ТИСНУМ) в 2006 г., конференции «Инновации РАН–2007», первом Международном форуме по нанотехнологиям в Москве 3–5 декабря 2008 г. По итогам работы была написана научно-популярная статья «Поиски высокотемпературной сверхпроводимости в гранулярных углеродных пленках», вошедшая в число победителей конкурса среди держателей грантов РФФИ. По результатам исследований по тематике проекта были опубликованы: статья в журнале «Краткие сообщения по физике ФИАН», две статьи в журнале Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, обзор в журнале «International Review of Physics», статья в международном сборнике «Superconducting Thin Films: New Research» Editor: Arnold H. Burness, Nova Science Publishing, 2008, две научно-популярных статьи в журналах «Природа» и «Химия и жизнь», монография «Unconventional Electromagnetics in Carbonaceous Materials» Nova Science Publishing, 2010.

На круглом столе кластера энергоэффективных технологий с участием сетевых компаний 28 февраля 2012 г. подписано предложение о сотрудничестве с техническим директором Межрегиональной распределительной сетевой компании (МРСК) Б.И. Механошиным.

Результаты работы обсуждены на 23 Международной Конференции исследователей углеродных мишеней (INTDS) в Японии.

За рубежом осуществляется мощная государственная поддержка внедрения технологий Smart Grids в целом, но проектов по созданию БУТ на текущий момент времени – нет.

Заключение. Целью проекта разработки БУТ в России является создание к 2025 г. достаточного количества и ассортимента «умных рубильников» для создающихся отечественных энергоэффективных интеллектуальных энергетических сетей, модернизации энергетических секторов всех отраслей промышленности, в особенности, таких как ЖКХ, РЖД, военно-промышленный комплекс ВПК (бортовые энергосети), радиоэлектроники (критические узлы электронных схем). Кроме того, в силу преимуществ БУТ по сравнению с другими типами токоограничителей (инерционные, сверхпроводящие, полупроводниковые), необходимо обеспечить экспансию БУТ на международном рынке.

В статье приведены результаты, полученные при выполнении работ в рамках Государственного задания 2015/Н7 Минобрнауки России по теме № 3246.

Список литературы

1. Antonowicz K. et al. Carbon. 1972. V. 10. P. 81–86.
2. Antonowicz K. et al. Carbon. 1973. V. 11. P.1–5.
3. Antonowicz K. Nature. 1974. V. 247. P. 358–360.
4. Lebedev S.G. Nucl. Instr. Meth. 2004. V A521. P. 22–29.
5. Lebedev S.G., Lebedev A.S. Exploration of Josephson-Like Behavior of Thin Granular Carbon Films. Edited Collection «Superconducting Thin Films: New Research», Editor: Arnold H. Barness, Nova Science Publishers, Inc., 2008. ISBN: 978-1-60456-307-8.
6. Novoselov K.S., et. al., Science (2004) 306, 666.
7. Zhang Y., Tan Y.W., Stormer H.L., Kim.P. Nature 438, 201 (2005).
8. Novoselov K.S. et. al. Room-Temperature Quantum Hall Effect in Graphene Science 315, 1379 (2007).
9. Breda N., Broglia R.A., Colo G., Onida G., Provasi D. and Vigezzi E. Phys.Rev. B 62 (2000) 130–133.
10. Zhao G.M., Wang Y.S. ArXiv: cond-mat/0111268v2.
11. Schun J.H., Kloc Ch., Haddon R.C., Batlogg B. Science. 2000. V. 288. P. 656–659.
12. Лебедев С.Г. Аналитический документ «Выявление ведущих тенденций и основных факторов, определяющих развитие сферы исследований и разработок в тематической области “Энергоэффективность и энергосбережение”». ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, 2014 г.

References

1. Antonowicz K. et al. Carbon. 1972. V. 10. P. 81–86.
2. Antonowicz K. et al. Carbon. 1973. V. 11. P.1–5.
3. Antonowicz K. Nature. 1974. V.247. P. 358–360.
4. Lebedev S.G. Nucl. Instr. Meth. 2004. V. A521. P. 22–29.
5. Lebedev S.G., Lebedev A.S. Exploration of Josephson-Like Behavior of Thin Granular Carbon Films. Edited Collection «Superconducting Thin Films: New Research», Editor: Arnold H. Barness, Nova Science Publishers, Inc., 2008. ISBN: 978-1-60456-307-8.
6. Novoselov K.S., et. al., Science (2004) 306, 666.
7. Zhang Y., Tan Y.W., Stormer H.L., Kim.P. Nature 438, 201 (2005).
8. Novoselov K.S. et. al. Room-Temperature Quantum Hall Effect in Graphene Science 315, 1379 (2007).
9. Breda N., Broglia R.A., Colo G., Onida G., Provasi D. and Vigezzi E. Phys.Rev. B 62 (2000) 130–133.
10. Zhao G.M., Wang Y.S. ArXiv: cond-mat/0111268v2.
11. Schun J.H., Kloc Ch., Haddon R.C., Batlogg B. Science. 2000. V. 288. P. 656–659.
12. Lebedev S.G. (2014) *Analiticheskiy dokument «Vyyavlenie vedushchikh tendentsiy i osnovnykh faktorov, opredelyayushchikh razvitie sfery issledovaniy i razrabotok v tematicheskoy oblasti «Energoeffektivnost' i energosberezhenie»* [Analytical paper «Identifying leading trends and the main factors determining the development of research and development in the thematic area “Energy-efficiency and energy saving”», *FGBNU NII RINKTsE* [SRI FRCEC]