

Опубликовано:

[Шевченко В.В., Лизан И.Я., Шевченко С.Е. Проблемы, перспективы и основные направления развития электроэнергетики и электрооборудования Восточной Украины / Сборник материалов региональной научно-практической конференции "Актуальные проблемы экономического и социального развития региона" к 10-й годовщине кафедры "Экономика и менеджмент" (13 декабря 2007 г.). – Красноармейск: КП ДонНТУ, 2007.- С. 369-383].

УДК 621.313.320

ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ И ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ВОСТОЧНОЙ УКРАИНЫ

В.В. Шевченко¹, к.т.н., доц., **Лизан И.Я.²**, к.т.н., доц., **Шевченко С.Е.³**, маг.

¹Украинская инженерно-педагогическая академия, ЭНФ, г. Харьков

²Украинская инженерно-педагогическая академия, ЭТФ, г. Артемовск

³Харьковский региональный институт проблем общественного здравоохранения

Начало 21 века характеризуется тем, что накопилось много нерешенных проблем: загрязнение окружающей среды, ограниченность топливных и минеральных ресурсов, непрерывный рост населения, потенциальная угроза применения ядерного и других видов оружия массового уничтожения, проблемы хранения отходов классических тепловых и атомных станций и т.д., [1]. Эти проблемы затрагивают все направления жизни человечества, но, в первую очередь, электроэнергетику – отрасль, которая является базовой для любого направления деятельности и для которой основными проблемами является следующее:

1) недостаточная мощность источников электроэнергии (генераторов, установленных на электростанциях), ограниченность запасов топлива для этих электростанций. Классические технологии получения электроэнергии реализуют несовершенные, экологически вредные методы получения энергии из относительно низкопотенциальных источников; мировые запасы топлива для этих технологий будут полностью исчерпаны к середине третьего тысячелетия, останутся только "возобновляемые" энергоресурсы – так называемая "зеленая" энергетика;

2) "зеленая" энергетика снижает уровень экологических проблем, но базируется на источниках еще более низкопотенциальных, чем предыдущие, и поэтому может представлять лишь временное решение, приемлемое тактически, но лишенное перспективы;

3) значительные потери электроэнергии. Плохое техническое состояние электросетей и значительный износ электрооборудования, несовершенные системы учета вызывают увеличение уровня потерь электроэнергии: потери во всех сетях Украины составляют около 15-18 %, а в некоторых регионах потери из-за изношенности электросетей достигают и более существенных значений. Так, например, по данным Дебальцевских РЭС, потери в электрических сетях поселка Мироновка Донецкой области составляют в летний период 22 %, в зимний – 42 %, [1,2].

4) низкая надежность работы энергосистем и электрооборудования из-за их значительного физического и морального износа. Это ограничивает возможность регулирования мощности энергогенерирующих систем и электрооборудования, что весьма важно для нормализации работы систем электроснабжения (СЭС) в соответствии с графиками нагрузок. Надежность работы СЭС – определяющий фактор развития любой отрасли промышленности, быта. Например, для городского электрохозяйства, для осветительных и энергоснабжающих систем городов и поселков наиболее важны сети до 1 кВ. Но именно они на сегодняшний день наиболее изношены и требуют немедленной модернизации, причем с использованием новых достижений, [2].

Силовой энергетический комплекс Украины является составной частью Объединенной энергетической системы (ОЭС), которая осуществляет централизованное энергоснабжение потребителей Украины и взаимобмен электроэнергией с энергосистемами соседних стран. В Украине в ОЭС входят электростанции энергогенерирующих компаний (14 ТЭС, 4 АЭС, 7 ГЭС и 1 ГАЭС, 97

ТЭЦ, 8 ВЭС, мини- и микро-ГЭС и т.д.), магистральные электрические сети национальной энергетической компании (НЭК) «Укрэнерго» и распределительные электросети региональных энерго-снабжающих компаний.

Структура формирования энергосистемы Украины отличается от среднемировой, у которой средние показатели следующие: электростанции, которые работают на нефти (мазуте), вырабатывают 38 % общей выработки электроэнергии, на природном газе – 20%, на угле – 27%, что составляет 85 %. Остальные 15% приходятся на АЭС и на электростанции, работающие от возобновляемых источников энергии («зеленая энергетика»). В Украине в настоящее время АЭС вырабатывают до 45 % общего объема электроэнергии. Общая мощность 13 установленных энергетических блоков на 4 АЭС Украины составляет 11800 МВт, [3,4].

Прослеживается тенденция дальнейшего увеличения вклада АЭС в электроэнергетику Украины. Анализ литературных источников, [3,4], позволяет сделать вывод, что указанная задача будет решаться поэтапно, разными путями:

- повышение единичной мощности установленного электрооборудования;
- продление срока службы АЭС первого поколения;
- достройка новых энергоблоков АЭС высокой степени готовности,
- создание и ввод в строй АЭС нового поколения с высокими показателями уровня безопасности и экономичности.

Развитие атомной энергетики возможно с одновременным устранением проблем, связанных со значительным износом электрооборудования станций: в Украине уже не стоит вопрос о достаточной степени безопасности АЭС, а появился вопрос о самой технической возможности их эксплуатации. В настоящее время АЭС требуют немедленной модернизации, установленное оборудование практически отработало свой ресурс. По инженерно-экономическим оценкам, модернизация одного энергоблока АЭС оценивается в 130 миллионов долларов, [3]. Уже начаты единичные работы по ремонту и модернизации отдельных блоков, но это не решает проблем атомной энергетики в целом.

Тепловые электростанции оцениваются специалистами аналогично. На 104 блоках тепловых электростанций, работающих на угле, 96% оборудования отработало проектный ресурс, а 73% - превысили граничный ресурс, КПД станций снизился до 30 – 35%, [1,2]. Кроме того, под постоянной угрозой сама поставка твердого топлива на станции. Для тепловых электрических станций нужен импортный уголь, т.к. многие шахты Украины закрыты, а другие являются аварийными. На многих тепловых электростанциях отсутствуют газоочистные сооружения, что приводит к значительному выбросу в атмосферу оксидов азота, двуокиси серы и т.д. Постоянна и проблема быстрорастущих зольных отвалов. То есть и тепловая энергетика находится в состоянии, близком к технической катастрофе.

Можно констатировать, что ни одна из современных технологий получения энергии не имеет перспектив на отдаленное будущее и может решать только временные, сегодняшние проблемы. Кризисное состояние следует отнести к серьезным недоработкам современных технологий получения, распределения и потребления энергии, к недостаточному финансированию энергокомплекса страны. Предлагаемые решения выхода из кризиса, например, "концепция устойчивого развития", базируются на традиционных принципах эволюционного развития энергетики и воздействия на влияющие факторы путем введения ряда ограничений – на выброс газов, на удельное потребление бензина, угля, мазута, газа, на рост населения и т.д.

Существуют предложения по выходу из эколого-энергетического тупика, которые в отличие от эволюционного развития, предлагают революционные решения [3,6,7]. Например, применение децентрализации производства электрической энергии, интенсивное развитие нетрадиционных источников энергии, поиск и внедрение новых источников электроэнергии – новых типов генераторов. Но каждый из этих способов имеет очень много недоработок и на сегодняшний день весьма бесперспективен. Очевидно, что необходимо интенсифицировать научные исследования по поиску принципиально новых источников и способов получения электроэнергии. Этот путь требует вложения значительных материальных средств, но, на наш взгляд, за этим решением - будущее. Проблемой является то, что срок получения практических результатов неизвестен, а электроэнергия нужна каждую минуту.

Все эти проблемы значительно обостряются в Восточной Украине и особенно в Донецком регионе, где сосредоточены основные промышленные мощности страны и самая высокая плотность населения. Именно здесь исторически наиболее рано формировались системы энергоснабжения, строились промышленные предприятия, устанавливалось электрооборудование. Однако годы после развала СССР отличаются тем, что ни ремонт, ни обновление, ни реконструкция энергохозяйства практически не проводились и наиболее пострадали именно промышленные регионы. Таким образом, и проблема стоит здесь наиболее серьезно и наиболее важно найти ее решение.

Как уже указывалось выше, развитие электроэнергетики может, а вероятно и должно, идти параллельно двумя путями: эволюционным, для обеспечения электроэнергией сегодня, завтра, ежедневно, и революционно, с возможностью выработки рентабельной, экологически чистой электроэнергии в будущем. Правильно, конечно, вести одновременное развитие этих направлений, но это требует настолько значительных материальных инвестиций, что для многих стран это сочетание невозможно. Но в пределах допустимых экономических границ, наше мнение, возможно следующее:

1) продление срока эксплуатации действующего оборудования за счет его модернизации, проведение реконструкции с внедрением новых технологий; повышение эффективности энергоустановок классических тепловых, атомных и гидроэлектростанций. Но следует помнить о прогрессирующем старении оборудования крупных энергоблоков электростанций;

2) внедрение нового энергооборудования с высокими энергетическими характеристиками: КПД, коэффициентом мощности, линейными нагрузками, индукцией, плотностью тока и т.д. Это приведет к экономии органического топлива во всех сферах - в промышленности, на транспорте, в быту. Следует также повышать единичную установленную мощность электрооборудования в блоках атомных электростанций до 1500 МВт. В качестве основного варианта замещения выбывающих мощностей предполагается строительство атомных энергоблоков с водо-водяными реакторами типа ВВЭР-1500 и турбоагрегатами мощностью 1500 МВт. Для реализации проекта такого энергоблока следует использовать возможности отечественной промышленности, добиваться минимальных, и, по меньшей мере, экономичных вложений для модернизации имеющихся производственных технологий и экспериментальной базы предприятий.

Уровень технического оснащения и развития отечественного электромашиностроения, в частности, завода «Электротяжмаш» (г. Харьков), и результаты предварительных конструкторских и технологических разработок показывают, что национальные промышленные предприятия в состоянии разрабатывать и изготавливать турбогенераторы мощностью 1500 МВт, как в тихоходном (1500 мин⁻¹), так и быстроходном (3000 мин⁻¹) вариантах. В обоих вариантах предлагается безводородный турбогенератор с полным водяным охлаждением, обеспечивающий взрывопожаробезопасность энергоблока и обладающий повышенной надежностью вследствие низкого уровня нагрева и вибраций, высокой степени отработанности конструкции, [4].

Для сравнения, зарубежные фирмы при создании турбогенераторов мощностью свыше 1000 МВт ориентируются на четырехполюсное исполнение с частотой вращения 1500 мин⁻¹ (50 Гц) или 1800 мин⁻¹ (60 Гц). Это генераторы мощностью 1150... 1360 МВт, изготовленные в Японии (Мицубиси), США (Дженерал Электрик, Вестингауз), Германии (Крафтверкюнион), Швейцарии (Брун Бовери). Наибольшей мощности, 1485 МВт, достигла Франция (Альстом), [4].

В машинах предельной мощности основные проблемы возникают с охлаждением и механическим креплением обмоток ротора, в торцевых зонах сердечников, при решении вопроса крепления лобовых частей обмоток статора. При расчетах турбогенератора предельной мощности (1500 МВт) следует использовать новый подход к выбору числа фаз обмоток статора (т.е. рассмотреть варианты трехфазного и шестифазного исполнения обмоток статора).

Шестифазный турбогенератор имеет существенные преимущества по сравнению с трехфазным. Прежде всего, вдвое снижается объем тока в пазу, что ведет к повышению надежности крепления обмотки статора. Во-вторых, значительно снижаются добавочные потери на поверхности ротора из-за меньшего содержания высших гармонических в кривой намагничивающей силы обмотки статора. Это ведет к снижению нагрева отдельных элементов, т.е. к повышению КПД. Номинальное напряжение генератора мощностью 1500 МВт принимают равным 27 кВ. Это облегчает

задачу разработки генератора, т.к. при увеличении активной длины по сравнению с генератором ТВВ-1200-2-У3 (производство НПО «Электросила», г. Ленинград), имеющим напряжение 24 кВ, удельные электромагнитные нагрузки возрастают не в 1,25 раза, а в 1,11 раза. При проектировании такой машины следует сохранить наиболее интересные технические решения:

- высокую перегрузочную способность, низкий уровень тепловых деформаций и, следовательно, стабильность и надежность работы изоляции, имеющей класс нагревостойкости F, [1,3].

- для ротора следует выбрать водоохлаждаемую демпферную обмотку, уложенную под пазовые клинья;

- на полюсах следует выполнить продольные пазы с магнитным наполнителем. Это обеспечит полное выравнивание изгибной жесткости ротора в плоскостях полюсов и обмотки возбуждения без создания концентраторов напряжений, т.е. позволит выровнять жесткость «бочки» неявнополюсного ротора по окружности.

Сегодня мы можем сказать, что одно из направлений развития электроэнергетики – повышение мощности в единице энергетической установки, - возможно и подкреплено созданием высокоэффективного турбогенератора предельной мощности, [1,3]. Такие генераторы востребованы для энергоблоков атомных станций, но само развитие атомной энергетики вызывает определенные вопросы из-за целого ряда проблем:

- Чернобыльская катастрофа заложила устойчивую психологическую неприязнь и страх не только у среднестатистического гражданина, но и у представителей руководящих органов, которые устанавливают объемы финансирования на научные исследования по атомной энергетике;

- общемировая тенденция по развитию энергетики - сворачивание объектов ядерной энергетики, т.е. АЭС. И в нашей стране необходимо было бы уже сегодня постепенно снижать вклад АЭС в общий объем производства электроэнергии, от 45 % до 10-15 %, как в других странах. Иначе ожидается резкий удар по энергетике через 10-20 лет, когда действующие атомные реакторы выработают свой ресурс, а строительство новых экономически не осуществимо из-за отсутствия финансирования, [4]. Но в плане развития электроэнергетики до 2030 года планируется увеличение вклада АЭС в общую картину электроснабжения Украины до 51-52 %;

- Проблема энергетической безопасности остается довольно острой, поскольку на данное время все ядерное топливо для украинских АЭС поступает из России, а перспективы строительства отечественного топливного ядерного цикла до сегодня остаются неопределенными. Учитывая большие естественные запасы урановых и циркониевых руд, прогнозируемый рост мировых цен на урановое сырье, наличие значительного промышленного и научно-технического потенциала, в Украине следует создавать объекты собственного ядерно-топливного цикла, что существенно повысит уровень энергетического самообеспечения страны.

- Вызывает опасение и принятый для Украины вариант сухого хранения отработанного ядерного топлива – система СХОЯТ. В настоящее время Украина не имеет возможности переработки отработавшего ядерного топлива (ОЯТ), не может принять отходы после переработки, т. к. нет ни заводов по переработке, ни хранилища для радиоактивных отходов. В результате тщательного сравнительного анализа возможных технологий хранения ОЯТ для крупнейшей украинской атомной станции: Запорожской АЭС, - была выбрана американская система сухого хранения ОЯТ в бетонных вентилируемых контейнерах, устанавливаемых на бетонной площадке в пределах охраняемой территории АЭС, [1]. Принятие такого решения определялось тем, что в процессе работы АЭС происходит накопление отработавшего топлива в специальных бассейнах выдержки внутри энергоблоков. А после развала СССР сократилась возможность вывоза ОЯТ на хранение в Россию, и как следствие — переполнение приреакторных бассейнов выдержки ОЯТ. Обеспечение безопасной эксплуатации энергоблоков становилось все более проблематичным. Использовались в экстренных случаях внутристанционные перевозки ОЯТ с блока на блок. Однако, это был лишь временная мера решения проблемы, но она требовала больших затрат и существенно снижала выработку электроэнергии. В результате произошло бы полное заполнение бассейнов выдержки и энергоблоки были бы остановлены. Останов АЭС – это значительные экономические потери на станции. в промышленности и т.д., т.к. убытки от простоя блока на 1000 МВт составляют около 10 тыс. грн. в сутки. Это обосновывало необходимость сооружения на АЭС стационарных хранилищ ОЯТ, наличие которого снимает зависимость станций от решения проблемы вывоза ОЯТ с ее территории и обеспечит возможность работы станции еще на 30 лет. Срок хранения ОЯТ в хранили-

ще должен составлять не менее 50 лет с обеспечением возможности последующего вывоза отработанных тепловыделяющих сборок (ОТВС) на переработку или постоянное захоронение. Ввод в эксплуатацию проекта СХОЯТ, вместо вывоза отработавшего топлива в Россию, позволяет Запорожской АЭС экономить 393 млн.грн./год, [1].

Но нет решений по дальнейшей судьбе отработавших ОТВС, хранящихся в СХОЯТ-ах. Нет отработанной технологии по безопасному вскрытию контейнеров, не понятно, как поведут себя ТВЭЛ-ы даже после 50-летней выдержки в герметичном контейнере СХОЯТ. Перспективным может оказаться использование для атомных реакторов новых тепловыделяющих элементов (ТВСА), у которых, за счет изменения конструкции, в 2-3 раза увеличен срок эксплуатации по сравнению с обычными ТВЭЛ-ами. Это ведет к снижению объема отработанных топливных элементов, упрощает задачу хранения ОЯТ.

Достаточно медленно идет внедрение экономичных электроприводов с использованием частотноуправляемых асинхронных двигателей. Дешевые, надежные, легкие, простые асинхронные двигатели вполне конкурентоспособны в электроприводах, где исторически из-за хорошей регулировочной способности, т.е. способности плавно, просто, в широких пределах регулировать частоту вращения, были установлены дорогие, сложные в создании, эксплуатации и обслуживании двигатели постоянного тока. На наш взгляд, замена тяговых двигателей постоянного тока в приводе городского наземного и подземного электротранспорта, в приводе электричек и пассажирских поездов на частотноуправляемый асинхронный привод весьма рентабельно. Но если и начаты работы по замене приводов подвижного состава городских хозяйств, то только в отдельных регионах Западной Украины. На Востоке, где сосредоточена основная масса населения, т.е. и транспортные сети (к тому, давно требующие замены), эти работы практически не ведутся.

3) снижение потерь различными путями во всех элементах энергосистемы. Решение этой проблемы должно, по нашему мнению, идти как традиционно (установка нового электрооборудования с исходно более высокими значениями КПД, интенсификация охлаждения, что позволит поднять удельную нагрузку и т.д.), так и искать новые пути. Например, мы считаем целесообразным пересмотреть существующий ряд предпочтительных чисел формирования значений мощности силовых трансформаторов напряжения, т.е. вопрос «учащения» шкалы стандартных мощностей силовых трансформаторов. Например, добавить между существующими ступенями мощности 630 и 1000 кВА значение мощности 750-800 кВА. Это позволит проводить выбор оборудования с выполнением рекомендаций по коэффициенту загрузки трансформаторов, исключит или снизит проблему их эксплуатации в режимах недогрузки и перегрузки, позволит сократить число устанавливаемых трансформаторов в цехах промышленных предприятий (снизит занимаемые площади, сократит используемую аппаратуру и приборы, число обслуживающего персонала). Целесообразно повышение роли ГАЭС в общей картине генерации электроэнергии, т.к. введение их в единую энергосистему позволит разгружать сети и повышать качество электроэнергии в часы снижения электронагрузок, причем без риска аварий, как это было бы при попытке снижать выработку невостребованной электроэнергии за счет разгрузки и перевода в ненормальные режимы (режим холостого хода) генераторов атомных станций (Чернобыльская АЭС).

4) внедрение новых инженерных решений и нового оборудования при проведении работ по реконструкции, обновлению, восстановлению. Например, в НЭК «Укрэнерго» разработана и успешно реализуется программа реконструкции и модернизации магистральных электросетей, рассчитанная до 2010 г., в которой предусмотрена замена изношенного оборудования только на современные его виды, включая элегазовые и вакуумные коммутационные аппараты, измерительные трансформаторы, полимерную изоляцию, микропроцессорные и цифровые приборы релейной защиты и противоаварийной автоматики. Для современных ВЛЭП предлагается использовать грозозащитные тросы с вмонтированными оптоволоконными кабелями связи, современные аккумуляторные батареи, автотрансформаторы, шунтирующие реакторы, изолированные провода и т.д. Для надежного электроснабжения жителей городов Украины необходимо провести замену устаревших линий электропередач напряжением 0,4-6,0 кВ. Эти линии требуют немедленной модернизации, т.к. исчерпали себя не только физически, но и морально. При модернизации город-

ских линий электроснабжения и осветительных сетей целесообразно заменять провода марки АС на новый тип проводов – самонесущие изолированные провода (СИП). Такой выбор позволит значительно повысить надежность ВЛЭП, продлить их срок эксплуатации, уменьшить аварийность, сократит объем работ, связанных с неплановыми ремонтами, прорубкой просек и подрезкой деревьев, уменьшит материальные расходы РЭС по компенсации потерь и порчи электробытовой техники у населения и снизит возможность воровства электроэнергии, воровство самих проводов. Это позволит персоналу РЭС проводить плановые ремонты, обслуживание, модернизацию оборудования, что также повысит надежность и снизит энергопотери. Эти линии имеют меньший вес, повышенную надежность в зонах интенсивного гололедообразования, снижена возможность возникновения пожара из-за короткого замыкания при захлестывании проводов и их обрыве. При этом, т.е. при замене «голых» проводов ВЛЭП на СИП, могут быть использованы ранее установленные опоры, на тех же опорах, вместе с СИП, могут крепиться телефонные провода, что было недопустимо для «голых» проводов, т.е. расходы незначительны, срок окупаемости около 4 месяцев, [2]. Важно также то, что прослеживается высокая безопасность для обслуживающего персонала, случайных прохожих и животных.

5) внедрение принципа децентрализации производства электрической энергии. Т.е. следует развивать полиэнергетику, что предполагает снижение единичной мощности энергоустановок, приближение источников выработки электроэнергии к потребителям, сокращение и упрощение передающих кабельных и воздушных сетей. Но следует помнить об остром дефиците органического ископаемого топлива. Децентрализация выработки электроэнергии требует развития оборудования для автономных источников энергии, делает рентабельной нетрадиционную энергетику. Так, по оценкам специалистов, [1], на территории Украины на 4-4,5 % площадей рентабельны для развития ветроэнергетики. Говорить о значительном возможном вкладе ветростанций в общую картину нельзя, но решать задачи местного электроснабжения, в территориально удаленных пунктах с невысоким энергопотреблением интересно (хутора, фермы, поселки в горах и т.д.). Целесообразно и весьма перспективно развитие гидроэнергетики. Причем основное внимание следует уделять развитию не крупных электростанций, а созданию малых или даже микроэлектростанций, (микро- и мини-ГЭС). Это рентабельно в районах, где есть горные массивы, то есть естественные перепады высот. Такое решение позволит приблизить источники электроэнергии к потребителям, сократив расходы на создание ЛЭП и кабельных сетей.

6) Улучшение системы учета распределения и потребления электроэнергии, совершенствование систем управления технологическими процессами выработки электроэнергии.

Для получения реальной картины потребления и распределения электроэнергии необходим точный учет, что возможно только при наличии современных счетчиков. Замена устаревших счетчиков требует материальных затрат, но точный учет позволит исключить неправильное или нерентабельное распределение электроэнергии, что позволит достаточно быстро окупить затраты. Но замена счетчиков должна идти не только по пути физического обновления, необходимо внедрять современное оборудование. В последние годы существенно изменилась не только величина, но и характер нагрузки, увеличился вклад в суммарную картину нагрузки мощных однофазных электроприемников, силовых преобразовательных систем, реактивный характер нагрузок. Это усиливает асимметрию, нелинейность, нестационарность параметров электроэнергии в сети. Увеличился спектр высоких гармоник, выходящих в сеть, [5]. Учет по современным счетчикам идет только по первой гармонике и не учитываются другие составляющие, а их вклад непрерывно растет. По данным литературных источников, [5], убыток от некачественной электроэнергии в США в год составляет до 15 – 26 млрд. долларов, а в промышленности Европейского Союза - до 10 млрд. евро в год. Причем половина потерь возникает из-за несинусоидальности напряжения. Этот показатель и несимметрия становятся все более существенными факторами в объеме дополнительных потерь, но ни один реактивный счетчик не учитывает потери из-за нестационарности нагрузки, т.к. в них не предусмотрено учет по данным усреднения реактивной мощности на рассматриваемых временных интервалах. Поэтому и расчет реактивной энергии идет неполный.

7) Поиск новых решений в получении электроэнергии. Особое внимание следует уделять исследованиям криогенного и сверхпроводящего электрооборудования.

Электрические машины традиционного исполнения не имеют перспектив радикального улучшения массогабаритных показателей путем повышения электромагнитных нагрузок, по крайней мере, в диапазоне малых и средних единичных мощностей. Сейчас использование активной стали и изоляционных материалов в электрических машинах находится на технически допустимом пределе. Возможно улучшение параметров электрооборудования, существенное снижение их удельной массы путем перехода на повышенные частоты вращения или на увеличение частоты тока для трансформаторов. Можно ожидать улучшение характеристик машин при использовании сверхпроводников (СП-ков) с высокой температурой перехода в безрезистивное состояние.

Десятая часть всей производимой в мире электроэнергии расходуется на потери, на нагрев медных и алюминиевых проводов. Между тем уже 100 лет хорошо известно, как этого избежать. Достаточно использовать СП-ники, обладающие при низких температурах нулевым сопротивлением. Электроток, возбужденный в кольце из подобного материала, способен годами течь без всякой внешней подпитки. В настоящее время использование СП-ков в промышленности, на транспорте и, в том числе, и в энергетике теперь имеет не только смысл, но требуют немедленного исследования и внедрения, т.к. созданы СП-ки с температурой выше 77,3 К, т.е. выше температуры кипения азота. До 90-х годов высокая стоимость сверхпроводящих материалов и необходимость охлаждения до сверхнизких температур мешали их массовому применению в энергетике. Активность и интерес к СП-никам, достигшие значительной высоты в 70-х годах, затем резко снизились, т.к., согласно теории Бардина-Купера-Шриффера (БКШ), СП-мость может существовать только до 25-30 К. Это определяло необходимость охлаждения СП-щего материала жидким гелием ($T_K=4,2$ К), а затем защиту самого гелия жидким азотом. Практическое использование СП-ков оценивалось, как высокочрезвычайно, ненадежное, и оно стало перспективным и практически обоснованным после открытия высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП).

В начале 1987 году появились сообщения о разработке керамического материала со структурой $YBa_2Cu_3O_7$, в котором сверхпроводящее состояние наступает при 93 К в поле с $B_{кр}=5,7$ Тл. Такие материалы имеют структуру типа перовскита (минерала $CaTiO_3$). В системах Y-Ba-Cu-O в настоящее время достигнута допустимая плотность тока до 10^4 А/см², что меньше, чем в металлических СП-никах. Наиболее перспективны для промышленного использования висмутовые системы $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_x$, температура перехода которых достигает 115 К. Есть сведения о получении высокотемпературных сверхпроводников с критической температурой 250 К.

Поскольку теория БКШ отвергала такую возможность, для объяснения механизма существования ВТСП необходимо было искать другой механизм, отличный от БКШ – теории формирования куперовских пар, - и один из возможных подходов описан американским физиком Литтлом. Он предположил, что в органических веществах особого строения возможна СП-мость при комнатных температурах, если удастся получить своеобразную полимерную нитку с регулярно расположенными электронными фрагментами. Корреляция электронов, движущихся вдоль цепочки, осуществляется за счет поляризации этих фрагментов, а не кристаллической решетки. Поскольку масса электрона на несколько порядков меньше массы любого иона, поляризация электронных фрагментов может быть более сильной, а критическая температура более высокой, чем при фоновом механизме (теория БКШ). В основе основной теоретической модели ВТСП, разработанной академиком В.Л. Гинзбургом, лежит так называемый экситонный механизм взаимодействия электронов: в электронной системе существуют особые волны - экситоны. Подобно фононам, они являются квазичастицами, перемещающимися по кристаллу и не связанными с переносом электрического заряда и массы. Модельный образец такого СП-ника представляет собой металлическую пленку в слоях диэлектрика или полупроводника. Электроны проводимости, движущиеся в металле, отталкивают электроны диэлектрика, то есть окружают себя облаком избыточного положительного заряда, который и приводит к образованию электронной пары. Такой механизм корреляции электронов предсказывает весьма высокие значения критической температуры ($T_K=200$ К). Открытие ВТСП опять активизировало интерес, и, соответственно, объем материальных вложений в развитие технологий изготовления промышленно применяемых СП-ников.

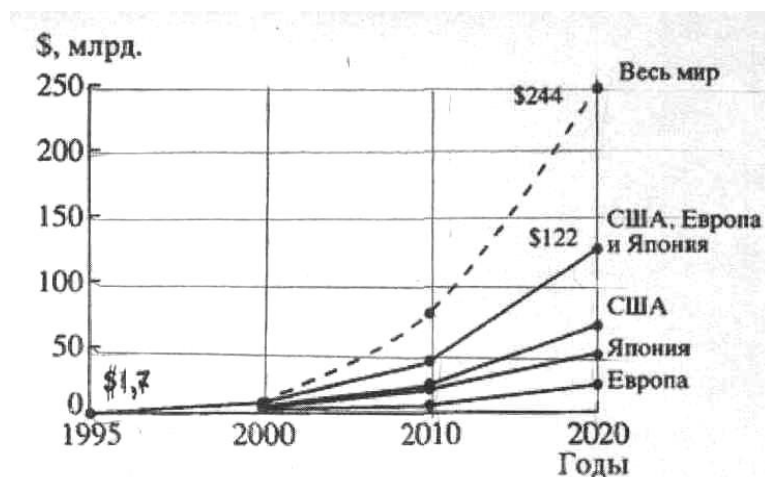
Сверхпроводимость - квантовое упорядочение коррелированной по спину зарядовой системы в макроскопических масштабах кристалла. Такое коллективное состояние с "аномальными"

электронными корреляциями может возникать безотносительно к конкретному механизму спаривания только в системах с максимальной делокализацией зарядовых состояний, обеспечивающей дальний порядок. В противном случае корреляции не будут носить квантовый макроскопический характер. В сверхпроводящих металлах и сплавах делокализация электронов - ситуация общего положения. В смешанных оксидах - типичных ионных соединениях с локализованными, как правило, носителями, делокализация - исключительное свойство.

Свойства ВТСП зависят от химического состава и технологии. Наиболее простой способ состоит в размоле металлических оксидов, прессования смеси и отжиге в атмосфере кислорода при температуре 900°C. Новое вещество образуется в результате химической реакции. Для устранения межгранулярных прослоек и получения более упорядоченной ориентации кристаллов полученное соединение подвергают плавке с последующим охлаждением. Лучшие СП-ские свойства получаются в пленочных образцах, пропускающих ток $\sim 10^6$ А/см². Сравнительно небольшие плотности критических токов ВТСП - одна из главных причин, сдерживающих их практическое применение. Поэтому поиски методов синтеза СП-ков с повышенными плотностями критических токов представляют несомненный интерес. Одним из путей повышения плотностей критических токов и критических температур оксидных ВТСП является введение в них различных модифицирующих добавок. Так, модифицирование таллий-содержащих ВТСП некоторыми металлооксидами приводит к улучшению критических параметров, некоторое возрастание обнаружено в Тl-содержащих ВТСП, модифицированных тонкодисперсной платиной. Образцы тщательно гомогенизировались в этаноле и высушивались при температуре 105°C. Высушенные смеси прессовались в таблетки под давлением 2 т/см² и отжигались при температуре 870°C в течение 10 - 20 мин с последующей закалкой на воздухе. Вследствие обильного газовыделения полученные образцы обладают высокой пористостью. Для уменьшения пористости они подвергались сухому перетиранию, прессовались и повторно отжигались при тех же условиях. Обнаружено, что модифицированные таким путем образцы имеют более высокое содержание СП-щей фазы, меньший размер зерен и обладают более резким переходом в СП-щее состояние по сравнению с образцами, полученными при тех же условиях, но без добавок фторидов. Перспективным методом получения длинномерных ВТСП композитов сложной формы является металлоорганический синтез, позволяющий формировать материалы в виде нитей, тканей, сеток с уровнем критического тока $2 \cdot 10^4$ А/см² (77 К, 0 Тл). Гибкость и прочность солевых форм ионообменных материалов дают возможность проводить их навивку на конструкционные материалы для создания различного вида изделий.

Многие технологии построены на использовании серебряных компонентов. Все описанные выше и другие технологические процессы объясняют высокую стоимость ВТСП-ков. Однако, за последние несколько лет цены на СП-ки упали в 7-8 раз, причем эксперты прогнозируют их дальнейшее снижение, [6,7].

С конца 90-х годов 20 века началось промышленное использование СП-ков в самых разных отраслях промышленности. По оценкам Всемирного банка, уже через 10 лет рынок СП-никового электротехнического оборудования будет составлять 70 млрд. дол., а через двадцать лет превысит 240 млрд. дол. (рис.), [6].



Рост объема продаж сверхпроводящего электротехнического

Повсеместное внедрение СП-ков в промышленность пока ограничивается сложной, дорогой технологией их изготовления.

Для электроэнергетики наиболее интересны направления внедрения высокотемпературных СП-ков:

1) Генераторы и линии электропередач, накопители электроэнергии. Использование СП-щих электромагнитов для систем возбуждения, может повысить КПД генераторов большой мощности до 99,5%, по сравнению с максимально достигнутым значением коэффициента полезного действия обычных (теплых) генераторов 98,6 %. Ежегодная экономия топлива составит 1%. Экономически рентабельными сверхпроводниковые линии электропередач, особенно при стабильной передаче по ним большого количества энергии. Сверхпроводящие накопители энергии с охлаждением жидким азотом на 3% дешевле, чем обычные, а общие капитальные затраты уменьшаются еще на 5 %.

2) Поезда на магнитной подушке - наиболее перспективное применение сверхпроводников для скоростных поездов. Стоимость сооружения пути длиной 500 км обойдется в 1,5 – 4,5 миллиардов долларов, что незначительно превосходит строительство обычной железной дороги. При этом стоимость самих поездов составит не более 10% от общей суммы затрат, а системы охлаждения - всего 1%.

3) Силовые кабели. Одним из возможных практических применений изделий из ВТСП могут стать токоподводящие элементы в различных схемах электропередачи. Для этого, например, порошок синтезированного $YBaCuO$ с добавлением термопластичного пластификатора (5-7 мас.%) экструдировался при температуре 200°C и давлении около 3 кбар. В зависимости от сечения и профиля выходной матрицы можно было получить провод, шину, трубу. После экструзии изделия обладали определенной пластичностью. Так, провод диаметром 1 мм без разрушения мог быть намотан на цилиндр $d \sim 4$ см. Для удаления пластификатора образцы медленно нагревались до 350 °C. Спекание проводилось путем нагрева до 1050 °C, кратковременной, в течение 10 мин, выдержки при этой температуре и отжига при 960°C в течение 12 часов с последующим медленным охлаждением и насыщением кислородом при 420 °C. Достаточно распространено изготовление ВТСП-ков по технологии «порошок в трубе». Этим методом можно получать кабельные изделия любой формы, используя процессы волочения, прокатки и прессования, как при комнатной, так и при повышенных температурах. В микрокомпозитах серебро неупорядоченно распределено по объему и находится в основном в порах и на границах зерен. С точки зрения описания концентрационных зависимостей свойств такие материалы представляют собой двух- (с учетом пор - трех-) компонентную среду с известными свойствами компонентов и неопределенной микрогеометрией их распределения по объему образца.

Серебро может быть введено в ВТСП - материалы как на стадии синтеза (в этом случае не исключено частичное замещение им ионов меди в кристаллической решетке), так и после, образуя механическую смесь. Ввод может быть осуществлен как в твердой фазе (мелкодисперсный порошок металлического серебра окисла или соли), так и в виде осаждения из раствора. Наиболее перспективны технологии, в которых каждая частица порошка ВТСП- соединения предварительно покрывается серебром (напылением, осаждением и т.д.), после чего происходит прессование; это первый шаг к контролируемой морфологии композита с оптимальным распределением серебра. Рассмотрено влияние концентрации серебра на сверхпроводящие характеристики композитов (критическую плотность тока, критическую температуру). Показано, что критическая температура уменьшается лишь незначительно вплоть до больших концентраций нормального металла (50~60% об.). Данные по критической плотности тока не столь однозначны; большая часть результатов свидетельствует о наличии максимума на ее концентрационной зависимости в районе 10-20% об. Описанные технологии позволяют получать одножильные и многожильные провода из порошка керамики любого состава. Для получения высоких значений необходимо оптимизировать металлургическими способами (температурой и обработкой давлением) состав и структуру сверхпроводящего ядра в серебряной оболочке.

Есть данные о внедрении ВТСП-щих кабелей в промышленность. В апреле 2005 года группа китайских разработчиков (CAS, IEE, TIPC) и компания American Superconductor объявили об успешной демонстрации 76-метрового трехфазного кабеля с теплым диэлектриком в действующей

сети, $U_{\text{ном}} = 6,6$ кВ. С декабря 2004 года по апрель 2005 года данный кабель питал заводы компании Changtong Power Cable в городе Байин (Китай). Для подвода электроэнергии к одному из кварталов Детройта (США) был проложен сверхпроводящий кабель (длиной 3 км); примеру Детройта собираются последовать и некоторые другие американские города.

Многофакторная и неоднозначная связь между параметрами состава, структуры и токонесящей способностью приводит к тому, что на сегодняшний день каждый исследователь изучает свойства конкретного порошка и конкретного изделия и вынужден эмпирически подбирать оптимальные условия формования сверхпроводящей ленты и режимы ее термообработки, т.е. разрабатывать новые, собственные технологические процессы. Это также усложняет положение на рынке ВТСП-ков.

ВЫВОДЫ:

1) современные электроэнергетика – основа любого промышленного комплекса, сельского хозяйства, медицины, науки, т.д. - требует немедленного изучения во всех аспектах, поиска и решения проблем ее будущности.

2) Развитие, реконструкции, обновление парка электрооборудования должно идти эволюционным путем, в поисках решений традиционного развития и модернизации. Но необходим и поиск принципиально новых решений, несмотря на то, что последнее требует значительных экономических вливаний.

3) При работе по решению проблем электроэнергетики нельзя пренебрегать ни одним из видимых вариантов их устранения, внедрять новое оборудование, как известное ранее, так и раньше не применявшееся. Вносить изменения в государственные стандарты. Следует внедрять достижения новых направлений в науке, осуществлять поиск возможных областей применения в электроэнергетике новых открытий в физике и технике. В частности, необходимо вести работы по практическому применению нетрадиционных, автономных источников энергии (ветроэнергетика, мини- и микро-ГЭС), заниматься изучением, созданием и внедрением в технику высокотемпературных сверхпроводников.

4) Следует признать, что настоящая электроэнергетика и электроэнергетика ближайшего будущего невозможна без атомных электростанций. Следует признать это и заниматься очень пристально вопросами повышения надежности электрооборудования электростанций, хранением, переработкой и утилизацией радиоактивных отходов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шевченко В.В. Проблемы и основные направления развития электроэнергетики в Украине. // Электроэнергетика та електрифікація. - 2007, № 7, с. 11-16.

2. Шевченко В.В., Цурак С.М., Лизан И.Я. Перспективы внедрения и особенности проектирования ВЛЭП с изолированными проводами. // Системи обробки інформації. Збірник наукових праць. Вип. 4(62), 2007 г., с. 127-134.

3. Кузьмин В.В. О нетрадиционном сценарии развития энергетики в XXI веке // Новини енергетики, 1999, № 2, с. 49-59.

4. Кузьмин В.В. Энергетика Украины в третьем тысячелетии - пути преодоления кризиса и задачи научных исследований. // Региональный европейский форум WEC "Киев-2000", доклады. Киев, 2000. С. 135-140.

5. Кизилев В.У. Концепции компенсации некачественности потребителя электроэнергии // Энергетика и Электрификация, №1, 2007, с. 50-52.

6. Шевченко В.В., Шевченко С.Е. Направления и перспективы использования специальных типов генераторов для энергетических установок с возобновляемыми источниками энергии // Системи обробки інформації. Збірник наук. праць.- Вип. 9. С.213-218.

7. Шевченко В.В., Гавриш А.Ю. Современное состояние и перспективы применения сверхпроводников в электроэнергетике. // Системы обробки інформації. Збірник наукових праць. Вип. 5(45). - Харьков, 2005, с. 194-204.