

ОТ ЛОКАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ К ГЛОБАЛЬНОМУ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМУ ОБЪЕДИНЕНИЮ: КОНЦЕПЦИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОБЛЕМЫ

Воропай Н.И., Подковальников С.В.

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН

ni.voropai@yandex.ru, spodkovalnikov@isem.irk.ru

Аннотация: В статье анализируются объективные тенденции объединения электроэнергетических систем (ЭЭС) и в конечном итоге создания Глобального Энергетического Объединения (ГЭО). Представлена концепция ГЭО. Ключевой составляющей ГЭО представляется Евро-Азиатский электроэнергетический суперпул. Важную интегрирующую роль в этом суперпуле призвана сыграть Единая энергосистема (ЕЭС) России. Излагаются требования к развитию ЕЭС России в связи с этой ее ролью.

Ключевые слова: электроэнергетические системы, объединение, Глобальное Энергетическое Объединение, Евро-Азиатский суперпул, роль ЕЭС России, требования к развитию.

Введение

Формирование электроэнергетических систем (ЭЭС) берет свое начало с первого десятилетия 20-го века. Это были небольшие локальные системы для снабжения электроэнергией промышленных предприятий, общественных зданий и других небольших локальных потребителей. Объективные выгоды совместной работы и согласованного развития ЭЭС (так называемые системные эффекты) явились причинами объединения локальных ЭЭС в региональные системы, которые объединялись в межрегиональные, национальные, межгосударственные и межконтинентальные электроэнергетические пулы. К середине 1900-х годов в Западной Европе,

Северной Америке, бывшем СССР и Восточной Европе работали межгосударственные электроэнергетические объединения (МГЭО). И процесс создания МГЭО продолжается.

Вероятно, Р.Б. Фуллер был первым, кто сформулировал идею Глобального Электроэнергетического Объединения [1]. Эта идея была доведена до детальной концепции Ю.Н. Руденко и В.В. Ершевичем в [2]. В 1986 г. в Сан-Диего, Калифорния, был учрежден Институт Глобальной Энергетической Сети (GENI) для выполнения исследований по созданию Глобального Электроэнергетического Объединения [3]. Ю.Н.Руденко в 1991 г. была организована международная конференция «Мировая энергетическая система». Эта конференция успешно работала до начала 2000-х. В 1996 г. в Токио был создан международный Азиатско-Тихоокеанский Энергетический Исследовательский Центр (APERC), одной из важных задач которого, помимо прочих, является исследование потенциала и проблем создания межгосударственных энергетических объединений в регионе АТЭС [4, 5]. В 1998 г. Институтом систем энергетики им. Л.А.Мелентьева СО РАН была учреждена международная конференция «Азиатская энергетическая кооперация», проводимая один раз в два года и посвященная проблемам создания межгосударственных энергообъединений в азиатском регионе. Все эти инициативы стимулировали многие исследования в этой важной области [6, 7 и др.].

В 2015 г., с учетом существенного прогресса в технологиях линий электропередачи ультра высоких напряжений [8], идея Глобального Энергетического (Электроэнергетического) Объединения получила новый импульс и была развита в книге [9] Президента Государственной электроэнергетической корпорации Китая Лю Чженья. Книга была издана на китайском, английском и русском языках. Были учреждены международная ассоциация «Организация по развитию глобального энергетического объединения и кооперации» (GEIDCO) и международный журнал “Global Energy Interconnection”.

В данной статье обсуждаются ключевые вопросы создания Глобального Энергетического Объединения (ГЭО): некоторые исходные положения (раздел 1); концепция ГЭО (раздел 2); общесистемный взгляд на возможное Евро-Азиатское супер-объединение как составляющую ГЭО (раздел 3); требования к развитию Единой энергетической системы (ЕЭС) России как важного элемента Евро-Азиатского супер-объединения (раздел 4); заключение (раздел 5).

1 Исходные положения

При обсуждении возможностей создания ГЭО необходимо учитывать ряд важных аспектов, а именно:

- 1) Активно обсуждалась проблема существования технических пределов объединения ЭЭС на параллельную работу с использованием электропередач переменного тока. Эти пределы могли бы быть связаны с возникновением низкочастотных слабо демпфированных колебаний, высокой вероятности крупных системных аварий и др. в таких протяженных энергообъединениях [10 – 13]. Однако такие проблемы активно изучаются и вырабатываются меры по их недопущению. Примером нормально работавшего на переменном токе энергообъединения было энергообъединение «Мир» с протяженностью от Монголии до западных границ стран Центральной Европы. С другой стороны, проблему можно решить рациональным секционированием структуры электрической сети с использованием линий и вставок постоянного тока, устройств FACTS и др. при реализации необходимых принципов и законов управления, прежде всего в аварийных условиях.
- 2) С точки зрения экономической эффективности объединения ЭЭС существует мнение, что увеличение размеров энергообъединения ограничивается малыми темпами роста экономики стран-партнеров [12]. Однако это мнение разделяется не всеми исследователями. Более корректно говорить о том, что существуют экономические пределы обмена электроэнергией на далекие расстояния, но это не является препятствием для объединения ЭЭС: в таком энергообъединении, наоборот, появляются дополнительные возможности обменов электроэнергией на экономически обоснованные расстояния [13 – 15].
- 3) Энергетическая независимость стран и электроэнергетических компаний в условиях стимулирования рыночных отношений между компаниями является фактором ослабления централизованного управления функционированием и развитием МГЭО. Этот фактор ограничивает масштабы обменов электроэнергией между странами, при этом такие обмены тем ниже, чем сложнее политические взаимоотношения между странами-партнерами. В то же время наличие МГЭО стимулирует экономическую кооперацию участвующих стран,

что способствует рациональному использованию энергии и других ресурсов и в долгосрочном плане обеспечивает политическую стабилизацию в регионе [15].

- 4) Опыт развития ЭЭС показывает, что хотя дискуссии о необходимости крупномасштабных электропередач на большие расстояния продолжаются, в то же время планируются и реализуются электропередачи значительно меньших масштабов. В любом случае тенденции развития ЭЭС показывают, что рост электропотребления и генерирующих мощностей, расширение энергообъединений и межсистемных обменов увеличивает возможности ЭЭС партнеров по обеспечению надежности электроснабжения потребителей.
- 5) Электроэнергетика уже сейчас играет важную инфраструктурную роль, и эта роль будет усиливаться в будущем. Указанный фактор стимулирует создание межнациональных и межконтинентальных электроэнергетических объединений и формирование ГЭО в перспективе.
- 6) В удаленной перспективе технические возможности дальних электропередач и повышения эффективности объединяемых ЭЭС будут повышаться при использовании новых технологий, таких как, например, высокотемпературная сверхпроводимость.

2 Концепция Глобального Энергетического Объединения [9]

2.1 Основные положения стратегии

Концепция ГЭО базируется на стратегии замены топлива экологически чистыми энергетическими ресурсами и повышения доли электроэнергии в конечном энергопотреблении. Ожидается крупномасштабное развитие генерирующих источников на возобновляемых энергоресурсах (ветер, солнце, гидроэнергия). Некоторые страны будут развивать ядерную энергетику, основанную на закрытом топливном цикле с реакторами на быстрых нейтронах 16. Планируется развитие электрической сети ультравысоких напряжений с протяженными линиями электропередачи для связи удаленных частей ГЭО друг с другом.

В течение 2000 – 2013 гг. доля возобновляемых энергетических ресурсов (исключая гидроэнергию) в мировом производстве электроэнергии увеличилась с 1.8 % до 4.8 %. При такой динамике доля чистых энергетических ресурсов может составить в мировом производстве электроэнергии 80 % к 2050 году, что потребует коренного пересмотра моделей функционирования ЭЭС. Повышение доли электроэнергии в конечном энергопотреблении планируется, в том числе, за счет прямого использования угля, продуктов нефтепереработки и природного газа в промышленности и домашних хозяйствах. Сейчас, например, доля электрообогрева в европейских странах составляет 90 %. Электроэнергия существенно отличается от других первичных энергоресурсов удобством использования, экологической безопасностью и эффективностью по стоимости, как при передаче, так и при потреблении. Около трети мирового энергопотребления падает на транспорт. Однако эффективность использования энергии продуктов нефтепереработки составляет 15 -20 % и возможности ее повышения незначительны. В то же время эффективность преобразования электроэнергии в кинетическую энергию, имея в виду эффективность зарядных систем для батарей, составляет 80 %. Доля электроэнергии в мировом энергопотреблении за 1990 – 2012 гг. выросла с 34,0 % до 38.1 %. При такой динамике эта доля может вырасти до 80 % к 2050 г. [17].

2.2 Стадии создания

Глобальное энергетическое объединение за период до 2050 г. может связать все континенты и большие области концентрации возобновляемых и других энергоресурсов. Формирование ГЭО представляется многостадийным процессом [9].

На первой стадии до 2030 г. необходимо обеспечить согласованное развитие национальных и межгосударственных ЭЭС, а также форсировать освоение везде в мире экологически чистых энергоресурсов. Генерируемая электроэнергия будет доставляться потребителям путем использования существующих и вновь вводимых линий сформированных межгосударственных энергообъединений. При этом будут максимально использоваться системные эффекты, перечисленные в [18], что обеспечит эффективность функционирования и развития ЭЭС.

Ключевыми целями второй стадии (2030 – 2040 гг.) будет развитие крупнейших кластеров в Арктике и экваториальных районах, в которых концентрируются возобновляемые энергоресурсы, а также формирование континентальных МГЭО. На этой стадии начнется строительство основных

электропередач между континентами. Одной из важных целей является разработка принципов кооперации между странами по созданию ГЭО и управлению его функционированием.

Третья стадия 92040 – 2050 гг. будет связана с завершением формирования ГЭО путем создания системы технологического и коммерческого управления, которая может базироваться на различных принципах и структуре в различных территориальных секторах ГЭО [18 и др.]. Это позволит обеспечить рациональные межгосударственные и межконтинентальные обмены электроэнергией, сокращение ее стоимости, реализацию высокой надежности электроснабжения потребителей при высоком качестве электроэнергии.

2.3 Ключевые технологии

В ГЭО будут использованы экологически чистые технологии для производства и передачи электроэнергии на ультравысоких напряжениях.

Основным направлением совершенствования ветрогенерации является разработка низкоскоростных ветроагрегатов, обеспечение возможностей их работы в экстремальных климатических условиях, развитие оффшорных ветропарков, повышение точности прогнозирования скорости ветра. Для солнечной генерации перспективным направлением является производство высокоэффективных фотоэлектрических материалов и тонкопленочных солнечных панелей, упрощение их производства и установки, а также развитие методов управления фотоэлектрическими установками с учетом переменной солнечной активности.

В настоящее время технологии ветрогенерации развиваются достаточно активно. Возможный для использования потенциал ветроэнергии представлен в 19. В соответствии с этими оценками к 2040 году доля ветрогенерации в общем объеме генерации электроэнергии при благоприятных условиях может составить 30 %. Интенсивное развитие технологий в первой декаде 21 века привело к созданию ветротурбины 8 ГВт при сокращении стоимости электроэнергии, вырабатываемой ветроагрегатами, на 90 %. В текущем десятилетии можно ожидать сокращение стоимости электроэнергии от ветротурбин еще на 50 % за счет роста их единичной мощности.

Благодаря субсидированию правительствами многих стран дорогой пока электроэнергии, вырабатываемой солнечными электростанциями, установленная мощность фотоэлектрических станций в мире в 2015 г. достигла 200 ГВт. Основная проблема заключается в повышении эффективности преобразования солнечной энергии, которая сейчас составляет приблизительно 20 %. Тем не менее, теоретическая эффективность монокристаллических и поликристаллических кремниевых ячеек находится на уровне 38 %. Стоимость электроэнергии, вырабатываемой фотоэлектрическими установками к 2025 году, может сократиться на 55 %.

Технологии тепловой солнечной генерации активно развиваются с 1970-х. В настоящее время эффективность тепловых солнечных электростанций достигает 25 – 30 %. Согласно прогнозам к 2050 году стоимость электроэнергии тепловых солнечных электростанций будет ниже, чем традиционных.

Прогноз будущего ГЭО должен учитывать ускоренное развитие безопасной и надежной ядерной энергетики, учитывая, в том числе, захоронение ядерных отходов. Россия является первой в мире по совершенствованию этой важной технологии, имея в виду работающий на Белоярской АЭС быстрый бриддерный реактор БН-800 [16].

Развитие технологий хранения электроэнергии, особенно интенсивное в последних декадах, чрезвычайно важно для крупномасштабного использования возобновляемых энергоресурсов, а также надежного и экономически эффективного функционирования ЭЭС. Накопители электроэнергии имеют ключевую перспективу в будущем ГЭО.

Для передачи больших объемов электроэнергии на дальние расстояния предлагается развитие электрической сети путем строительства линий ультравысоких напряжений постоянного и переменного тока. Первая в мире ЛЭП 1000 кВ переменного тока введена в Китае в 2009 году. Китай сейчас имеет 6 успешно работающих передающих линий постоянного тока +/-800 кВ. Бразилия и Индия вводят многие ЛЭП постоянного тока этого класса напряжения. Изучается и тестируется оборудование на +/-1100 кВ постоянного тока для передачи электроэнергии на расстояния порядка 3000 км при пропускной способности до 12 ГВт.

Важным элементом сети постоянного тока является выключатель постоянного тока. В настоящее время в Китае на пятитерминальной системе постоянного тока работает выключатель +/-200кВ. В стадии тестирования находится выключатель +/-500 кВ, разрабатывается выключатель +/-800 кВ.

Очень важное значение имеют кабельные электропередачи ультравысокого напряжения, которые обеспечивают электрические связи объединяемых ЭЭС через водные преграды и снабжение электроэнергией от офшорных электростанций. С 1990-х годов существует тренд доминирования кабельных ЛЭП постоянного тока в сравнении с другим оборудованием, вводимым в работу в мире. В случае успешного развития кабельных электропередач +/-800 кВ постоянного тока это будет возможность преодолевать водные преграды на расстояния до 1000 км.

2.4 Возможные вызовы

Как и многие амбициозные проекты, концепция ГЭО дает большие возможности использования передовых технологий и прогрессивных решений, однако встречает и обоснованную критику. Идеологи концепции [9] также выделяют потенциальные угрозы. Например, не исключается вероятность таких геополитических конфликтов, как нефтяной кризис 20-го столетия и более локальные события, инициирующие проблемы энергетической безопасности стран-участниц. Создание и функционирование ГЭО невозможны без скоординированных действий и сотрудничества всех стран, предоставляющих необходимых экспертов. Например, причиной несогласия может оказаться распределение экономических эффектов среди стран-участниц ГЭО. Помимо этого, вследствие масштаба объединения, проблемы технологического управления и рыночного взаимодействия могут оказаться значимыми.

С учетом сказанного создание международной ассоциации организаций и экспертов «GEIDCO» имеет принципиальное значение. Это международное коллегиальное образование будет проводить развитие идеологии, организацию исследований многочисленных проблем, и выбор единственного вектора развития мировой электроэнергетической отрасли как межгосударственной инфраструктуры, обеспечивающей экономичное, надежное и устойчивое электроснабжение потребителей.

3 Общесистемный взгляд на Евро-Азиатское суперобъединение

В последнее время имеет место тенденция формирования крупных электроэнергетических объединений на Евро-Азиатском континенте. Электрические связи между этими объединениями в конце концов приведут к созданию совместной Евро-Азиатской электроэнергетической инфраструктуры. Наряду с развитием электрической сети переменного тока сверхвысоких напряжений на территории континента будут достаточно широко по различным причинам строиться электропередачи постоянного тока.

Такая протяженная межгосударственная электроэнергетическая инфраструктура, как любая большая система, должна иметь иерархическую структуру в виде взаимодействующих электроэнергетических зон (зональных объединений). Условия выделения зон могут быть связаны с возможными проблемами технологического управления, локализацией зональных электроэнергетических рынков, ограничиваемых большими расстояниями передачи электроэнергии по ЛЭП ограниченной пропускной способности, и др. Например, ЭЭС России может быть представлена в виде иерархической структуры, которая включает 7 объединенных ЭЭС, управляемых своими диспетчерскими центрами, координируемые диспетчерским центром ЭЭС России. Каждая объединенная ЭЭС состоит из нескольких региональных ЭЭС, имеющих свои региональные диспетчерские центры, координируемые соответствующими межрегиональными диспетчерскими центрами. ENTSO-E и энергообъединение США и Канады имеют иерархическую организацию другого типа.

В рассматриваемом контексте выражение типа «Евро-Азиатское супер энергообъединение» в определенном смысле условно. Не совсем корректно говорить о маневрировании потоками электроэнергии от Тихого океана до Атлантического, например, для совмещения суточных графиков нагрузки потребителей, расположенных в разных часовых зонах на противоположных концах энергообъединения, или взаимопомощи резервами на такие большие расстояния. Важно то, что создается развитая электроэнергетическая инфраструктура, позволяющая использовать потенциальные системные эффекты наиболее рациональным образом в любой части такого суперобъединения в зависимости от конкретных локальных условий (пропускная способность связей, потери в электрической сети, маневренность генерирующего оборудования и др.).

4 Требования к развитию ЭЭС России

Изложенная концепция формирования Евро-Азиатской электроэнергетической инфраструктуры предопределяет интегрирующую роль ЭЭС России. С этих позиций рассмотрим требования к развитию ЭЭС России для трех направлений: западного, восточного и южного.

Западное направление не предполагает каких-либо новых требований к усилению интеграции ЭЭС России с ЭЭС Западной, Северной, Центральной и Восточной Европы. В этом направлении важными задачами являются увеличение установленной мощности электростанций и усиление основной электрической сети переменного тока для обеспечения активного участия ЭЭС России в европейском рынке электроэнергии, а также усиление основной сети в зонах, прилегающих к возможным линиям и вставкам постоянного тока (ВПТ) для реализации «электрических мостов» Восток-Запад, Балтийское кольцо, электропередача постоянного тока (ППТ) Россия-Турция. Необходимо отметить приоритетность реализации связей ЭЭС России с ENTSO-E при использовании ППТ и ВПТ с точки зрения требований совместного функционирования [20].

Восточное направление (регионы Северо-Восточной Азии) требует более серьезного рассмотрения в плане развития генерации и усиления электрической сети, включая линии между ЭЭС Восточной Сибири и Дальнего Востока [21].

Говоря о генерации, необходимо иметь в виду существенные экологические ограничения на ввод электростанций на традиционном органическом топливе в Японии, Южной Корее и Китае. В этих условиях российская электроэнергетика может предложить более предпочтительный экологически дружелюбный путь на основе использования электроэнергии ГЭС и АЭС для участия в электроэнергетических рынках рассматриваемых стран в сравнении с электроэнергией тепловых электростанций на ископаемом органическом топливе. В этих условиях роль планируемой Приморской АЭС становится значимой.

В связи с рассматриваемыми проблемами необходимо обратить внимание на необходимость создания приемлемых инвестиционных условий для строительства в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке ГЭС малой и средней мощности. Некоторые из таких ГЭС находятся на предпроектной стадии рассмотрения. В соответствии с общей оценкой суммарной установленной мощности таких ГЭС в операционной зоне ОЭС Востока может быть до 9.9 ГВт, включая в Амурской области (без Зейской, Бурейской и Нижне-Бурейской ГЭС) – до 3.4 ГВт, в Хабаровском крае (без Тугурской приливной электростанции 8 ГВт) – до 0.9 ГВт, в Приморском крае – до 0.6 ГВт, на юге Республики Саха (Якутия) – до 5 ГВт. Имеются подобные проекты в Восточной Сибири – например, Мокская ГЭС мощностью 2 ГВт.

Определенный рост генерации в этом регионе можно также ожидать в результате программ газификации регионов (республик, краев, областей) частично при государственном стимулировании строительства тепловых электростанций на базе газотурбинных установок, а также путем замены старых котельных в городах и поселках городского типа на малые газотурбинные ТЭЦ с использованием высокоэффективного оборудования. Оценки показывают, что суммарная установленная мощность таких мини ГТУ- ТЭЦ может составить в Восточной Сибири – до 3 ГВт, на Дальнем Востоке – до 2 ГВт [22].

Необходимо рассматривать развитие электрической сети 500 кВ для усиления связей ЭЭС Восточной Сибири и Дальнего Востока в соответствии с потребностью развития ЭЭС России. Это будет решать проблемы электроснабжения Байкало-Амурской железнодорожной магистрали и южной зоны Транссибирской магистрали и повысит надежность электроснабжения потребителей Дальнего Востока. Одновременно линии 500 кВ могут быть использованы для небольших приграничных поставок электроэнергии в Китай и Монголию.

Более мощные линии постоянного тока могут послужить связями между ЭЭС стран региона Северо-Восточной Азии. В связи с этим необходимо иметь в виду потенциальную связь постоянного тока «Усть-Илимск – Южно-Якутский гидроэнергетический комплекс (ГЭК) – Хабаровск» [23]. Эта линия свяжет ОЭС Сибири и Востока, а также будущие крупные ГЭК: Тугурскую приливную электростанцию на побережье Охотского моря; Южно-Якутский ГЭК, включая Учурскую и Тимптонскую ГЭС; Мокскую ГЭС на реке Витим. Терминалы этой электропередачи будут служить отправными точками для ввода межгосударственных ППТ для связи с ЭЭС Китая, Японии, КНДР и Республики Корея.

Таким образом, рассматриваемая ППТ может стать мощной и важной связью в межгосударственном электроэнергетическом объединении Северо-Восточной Азии. Эта электропередача будет многофункциональной и будет способствовать реализации различных системных эффектов от объединения ЭЭС. Оценки показывают потенциальную эффективность

этого комплексного проекта даже при очень низкой эффективности Тугурской приливной электростанции. Отказ от ее строительства приведет к повышению ожидаемой эффективности рассматриваемой электропередачи.

Южное направление (Центральная Азия, Южная Азия и Ближний Восток) требует развития объединенных ЭЭС Сибири и Урала и их связей между собой и с ЭЭС Казахстана. Учитывая то, что связи между этими ОЭС проходят сейчас в основном через территорию другого государства, что ограничивает возможности управления их режимами, необходимо вернуться к рассмотрению достаточно мощной линии между ОЭС Сибири и ОЭС Урала по территории России, которая обсуждалась в середине 1990-х годов.

Чтобы реализовать независимое управление перетоками по этой связи, ее надежность и участие ЭЭС России в электроэнергетических рынках Центральной Азии, а затем Южной Азии и Ближнего Востока, сооружение линии между ОЭС Сибири и ОЭС Востока было бы предпочтительно на постоянном токе, в то время как предпроектные разработки рассматривали линию 1150 кВ переменного тока.

Усиление связи «Урал – Сибирь», а также потенциальное участие ОЭС Урала и ОЭС Сибири в электроэнергетических рынках Центральной Азии, потребуют усиление связей по направлению «Урал- Средняя Волга-Центр», которые логично реализовать на переменном токе.

В связи с рассматриваемыми аспектами возможные направления развития генерации в Западной Сибири и на Урале могли бы быть связаны с расширением использования углей Канско-Ачинского бассейна, однако потребуются высоко эффективные и экологически чистые технологии их переработки и обогащения. Оцениваемые объемы развития генерирующих мощностей составляют до 3 ГВт в Западной Сибири и до 5 ГВт на Урале. При этом потребуются государственная поддержка программ газификации углей и использования газотурбинных установок и агрегатов комбинированного цикла.

Заключение

Формирование региональных и межгосударственных электроэнергетических объединений и создание на их основе Глобального Энергетического Объединения является важной долгосрочной тенденцией развития ЭЭС вследствие возможности реализации известных системных эффектов и повышения инфраструктурной роли электроэнергетики. Создание межгосударственных электроэнергетических пулов, наблюдаемое последнее время на Евро-Азиатском континенте, приведет в будущем к формированию Евро-Азиатского суперпула. Ряд факторов, прежде всего иерархическая система управления режимами, определяют иерархическую структуру такого суперпула. ЭЭС России объективно будет играть интегрирующую роль в Евро-Азиатском МГЭО, что предопределяет вполне определенные требования к развитию ее генерирующих мощностей и системообразующей электрической сети.

Примечание

Работа выполнена по государственному заданию, проект 17.6.2 программы фундаментальных исследований СО РАН, рег. № АААА-А17-117030310447-3.

Литература

1. *Fuller R.B.* Critical path. - New York: St. Martin's Press, 1981. - 336p.
2. *Rudenko Yu.N., Ershevich V.V.* Is it possible and expedient to create a global energy network? // International Journal of Global Energy Issues. Vol. 3. 1991, No. 3. - P. 159-165.
3. Global Energy Network Institute, <http://www.geni.org>
4. Power interconnections in the APEC region: current status and future potential. Tokyo: APERC, 2000. - 154p.
5. Electric power grid interconnections in the APEC region. Tokyo: APERC, 2004. - 172p.
6. *Voropai N.I., Koshcheev L.A.* Conceptual view on the Eurasian superpool and requirements to Russia's unified electric power system development // 2003 CIGRE Symposium on Development and Operation of Interconnections in the Restructuring Context.
7. *Belyaev L.S., Chudinova L.Yu., Khamisov O.V., Podkovalnikov S.V., et al.* Studies of interstate electric ties in Northeast Asia // International Journal of Global Energy Issues. Vol. 17. 2002, No. 3. - P. 228-249.
8. *Liu Zhenya.* Ultra high voltage AC/DC grids. London: Elsevier Academic Press. 2014. - 758 p.
9. *Liu Zhenya.* Global energy interconnection. London: Elsevier Academic Press. 2015. - 396 p.

10. *Paris L., Zini G., Valtorta M., Manzoni G., et al.* Present limits of very long distance transmission systems // 1984 CIGRE Session.
11. *Antimenko Yu.L., Yershevich V.V., Rudenko Yu.N., Voropai N.I., et al.* The USSR United Power Grid: the experience and problems of development // 1992 CIGRE Session.
12. *Mueller H.-G., Haubrich H.-J., Schwarz J.* Technical limits of interconnected systems // 1992 CIGRE Session.
13. *Meslier F.* How should we make best use of the potential of interconnected systems? // 1993 UNIPED Conference on Development and Operation in Large Interconnection Systems..
14. *Straub L.* Opportunities of the development of cooperation between the electricity-generating industries of East and West Europe // 1993 UNIPED Conference on Development and Operation in Large Interconnection Systems.
15. *Voropai N.I., Shutov G.V., Filippov S.P.* Possible directions in development of the global electric network // Perspectives in Energy. Vol. 3, 1994 – 1995, - P 29- 297.
16. *Пономарев-Степной Н.Н.* На пути к устойчивому развитию // Российское Энергетическое Агентство, 2016, № 1. - С. 31 – 39.
17. *Коваленко П., Осинцев К.* Анализ развития Глобального Энергетического Объединения // Труды Международной конференции «Электроэнергетика глазами молодежи», Казань, Россия, 2016, 7 с.
18. *Voropai N., Podkovalnikov S., Osintsev K.* From interconnections of local electric power systems to Global Energy Interconnection // Global Energy Interconnection. Vol. 1. 2018, No. 1. - P 4- 10.
19. Global wind report 2015 – annual market update // Global Wind Energy Council, 2015. - 124p.
20. Monitoring, control and protection of interconnected power systems / Edit by U.Haeger, Ch.Rehtanz and N.Voropai. Berlin: Heidelberg e.a.: Springer, 2014. - 391p.
21. *Беляев Л.С., Подковальников С.В., Савельев В.А.* Эффективность межгосударственных электрических связей. Н: Наука, 2008. -239с.
22. *Voropai N.I.* Use of new energy technologies in the Asian part of Russia // IEEE Power Engineering Review. Vol. 21. 2001, No. 7. - P 7-10.
23. *Belyaev L.S., Chudinova L.Yu., Koshcheev L.A., Podkovalnikov S.V., et al.* The high voltage direct current bus “Siberia – Russian Far East” // 2003 IEEE PES General Meeting, Toronto, Canada, July 13 – 17, 2003, 5 p.