

## ГИБРИДНЫЕ ЭНЕРГОКОМПЛЕКСЫ НА ОСНОВЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ<sup>1</sup>

*Г.В. Дерюгина, М.Г. Тягунов, Т.А. Шестопалова, В.А. Юриков*

Приведено описание моделей элементов гибридных энергокомплексов на основе возобновляемых источников энергии, предназначенных для использования в малых распределенных энергетических системах. Описан подход к процедуре технико-экономического обоснования структуры и параметров гибридных энергокомплексов.

*Ключевые слова:* гибридный энергокомплекс; возобновляемые источники энергии; энергоэффективность; модель энергокомплекса.

Необходимость стабильного снабжения энергией потребителей в децентрализованных зонах энергоснабжения, которые составляют более 2/3 территории страны (Крайний Север, Дальний Восток, Сибирь, Бурятия, Якутия, Алтай, Курильские острова, Камчатка, часть Центральной России), а также в энергодефицитных районах развитых территорий России привело к созданию технологической платформы “Малая распределенная энергетика” [1].

Концепция распределенной энергетике строится на трех основных позициях: учет особен-

ностей спроса на количество и качество энергии местными (локальными) потребителями энергии всех видов; единство энергетического комплекса распределенной энергосистемы – от генерации до потребления; максимальное обеспечение потребностей в первичных источниках энергии за счет собственных ресурсов территории, в том числе возобновляемых.

Технологическая платформа “Малая распределенная энергетика” базируется на следующих технологиях:

- использование газотурбинных установок, микротурбин, парогазовых установок малой мощности, газопоршневых установок внутреннего сгорания, роторно-лопастных двигателей внешнего сгорания;
- газификация местных топливных ресурсов;
- когенерация энергии рядом с потребителем;
- использование комплексов генерирующих установок разных типов, в том числе на основе ВИЭ;
- применение новых энергетических технологий (водородная энергетика и т.д.).

---

<sup>1</sup> Статья подготовлена с использованием материалов работы, выполняемой в рамках ФЦП “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы” по направлению “Проведение проблемно-ориентированных поисковых исследований в области малой распределенной энергетике” при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

Развитие малой распределенной энергетики связано с изменением основной парадигмы развития *централизованной энергетики*, формулируемой как надежное и бесперебойное энергоснабжение *эквивалентного неструктурированного потребителя энергии*, питающегося от энергетической (электрической, тепловой и т.д.) сети, связывающей его с *источниками генерации энергии различных типов*.

Парадигма малой распределенной энергетики может быть сформулирована только при четко сформулированных системных свойствах малых распределенных систем энергоснабжения.

Говоря о *системных свойствах систем энергоснабжения*, необходимо рассматривать основные элементы, которые формируют целевую и технологическую структуру системы.

Энергосистемы включают в свой состав потребителей, формирующих спрос на электрическую, тепловую, механическую и др. виды потребляемой энергии, производителей (генераторов) требуемых видов энергии, средств доставки энергии потребителю, гибкую систему резервирования поставщиков энергии и эффективное управление всеми элементами системы.

Важными особенностями малых энергосистем являются:

- относительно небольшое расстояние от места производства до места потребления энергии, что существенно уменьшает величину потерь по длине линий доставки (электрических, механических, гидравлических, тепловых и т.д.);
- сравнительно небольшое число потребляющих энергию установок, единичная мощность которых сопоставима с установленной мощностью всей энергосистемы;
- сравнительно небольшое число генерирующих энергию установок, единичная мощность которых сопоставима с установленной мощностью всей энергосистемы;
- тесная взаимозависимость режимов работы всех элементов энергосистемы, влияющих на устойчивость и надежность ее работы.

Параметры генерирующей части системы выбираются исходя из нужд потребителей, структура и параметры которых не зависят от их энергообеспеченности [2, 3].

Остановимся на свойствах систем, включающих в себя источники (генераторы) энергии на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Генераторы на основе ВИЭ:

- не имеют гарантии выдачи мощности по электричеству (за исключением ГЭС с водохранилищами) или теплу (за исключением теплонасосных установок);

- могут использоваться без существенных ограничений по устойчивости режима энергосистемы, неравномерности выдачи мощности и качеству электроэнергии, если их доля по установленной мощности составляет не более 15 % установленной мощности генераторов энергосистемы [4];
- могут частично компенсировать неравномерность поступления энергоресурсов к энергоустановкам различных типов и повышать надежность энергоснабжения потребителей;
- могут работать совместно с аккумуляторами и преобразователями энергии в иной вид, поддающийся эффективной аккумуляции (электрохимические, водородные, гидравлические, пневматические, механические, электрические и т.д.).

Таким образом, генераторы на основе ВИЭ не могут осуществлять энергоснабжение автономных и иных потребителей самостоятельно, без участия источников гарантированной мощности или использования аккумуляторов. Они могут работать совместно с малыми тепловыми энергоустановками (в качестве дублирующей мощности), обеспечивая экономию топлива по сравнению с работой тепловых энергоустановок в качестве единственного источника энергоснабжения потребителей малых энергосистем или автономных потребителей. При этом следует помнить, что автономные потребители являются по существу потребителями малых распределенных энергосистем.

В связи с отсутствием нормативных определений малых и распределенных энергосистем и их составляющих, будем использовать понятие *гибридный энергетический комплекс*, который включает в себя потребителей, производителей и передатчиков различных видов энергии, которые обеспечивают автономность его функционирования. Под ГЭК часто подразумевают:

- объединение энергоустановок разного типа, в том числе и на основе ВИЭ;
  - объединение генераторов, потребителей и объектов транспортно-коммутиционной сети локального объекта (“локальные энергосистемы” или “изолированные энергосистемы”).
- Выделим следующие системные свойства ГЭК:
- зависимость эффективности использования генераторов (преобразователей энергии разных видов первичной энергии в тепло и электроэнергию) от типов потребителей электроэнергии;
  - необходимость гибкой взаимосвязи генераторов, работающих на разных видах первич-

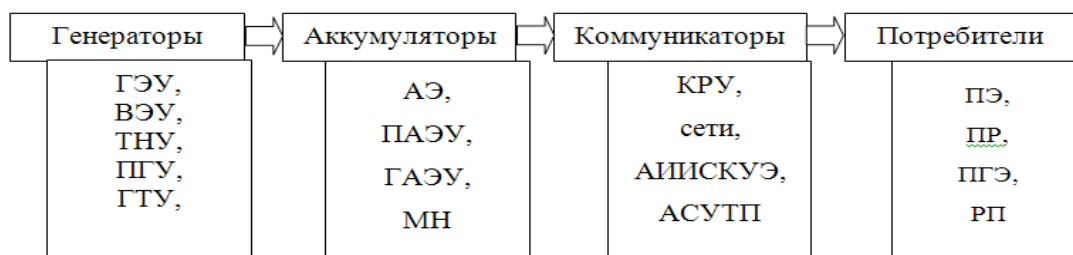


Рисунок 1 – Ориентировочный состав элементов ГЭК: ГЭУ – гидроэнергетические установки, ВЭУ – ветроэнергетические установки, ТНУ – тепло-насосные установки, ПГУ – парогазовые установки, ГТУ – газотурбинные установки, АЭ – аккумуляторы электрохимические, ПАЭУ – пневмоаккумулирующие энергетические установки, ГАЭУ – гидроаккумулирующие энергетические установки, МН – механические накопители, КРУ – комплектные распределительные устройства, АИИСКУЭ – автоматизированная информационно-измерительная система коммерческого учета электроэнергии, АСУ ТП – автоматизированная система технологического управления, ПЭ – потребители энергии, ПР – потребители-регуляторы, ПГЭ – потребители гарантированного энергоснабжения, РП – резервные потребители

ной энергии, и потребителей различного типа и назначения с помощью развитой (умной) сети типа micro-grid;

- зависимость параметров генераторов каждого типа от соотношения параметров потребителей и графика поступления энергетических ресурсов, необходимых для балансирования генерации и потребления мощности и энергии элементов ГЭК.

**Системные свойства элементов ГЭК.** Условимся, что ГЭК представляют собой техническую систему, объединяющую в рамках единого технологического процесса генераторы электрической, тепловой и др. видов энергии различных типов, аккумуляторы энергии, средства коммутации и передачи энергии, средства преобразования в вид, пригодный для использования потребителями.

Такой подход не нов. Аналогично рассматривались энергетические комплексы на основе ВИЭ, например, в [5]. Состав элементов ГЭК, использующих электрическую и тепловую энергию при таком подходе, показан на рисунке 1.

**Потребители.** Важным аспектом разрабатываемого подхода к проектированию ГЭК является дифференциация потребителей энергии по типам: потребители энергии (ПЭ), потребители-регуляторы (ПР), потребители гарантированного энергоснабжения (ПГЭ), резервные потребители (РП) [5]. Потребители энергии – тип потребителя, в состав которого технологически встроен накопитель энергии того или иного вида, например, нагреватели систем горячего водоснабжения с баками-накопителями горячей воды.

Потребители-регуляторы – тип потребителя, график энергопотребления которого может быть выбран в зависимости от существующего графика

ка генерации мощности (электрической, тепловой и т.д.).

Резервные потребители – тип потребителя, который включается для производства дополнительного продукта, в частности, вторичных аккумулируемых энергоресурсов (водород, кислород, сжиженный газ и т.д.).

Потребители гарантированного энергоснабжения – потребители, работающие по заданному графику энергопотребления и требующие полного, бесперебойного энергоснабжения с заданными параметрами качества энергии.

Потребители указанных типов могут потреблять электроэнергию (на постоянном или переменном токе), тепло, механическую энергию (водо- и иные подъемники или транспортеры), а также производить энергоресурсы для дальнейшего использования (производство водорода, сжатого воздуха и т.д.).

**Аккумуляторы** энергии могут иметь разную физическую природу и принципы работы. Среди известных технических решений могут быть названы электрохимические аккумуляторные батареи, емкостные и индуктивные накопители, маховики, тепло-, гидро- и пневмоаккумулирующие установки. При этом предполагается, что накопленная в любом виде энергия будет использована объектами ГЭК. Производители энергоресурсов для энергоустановок, не входящих в состав ГЭК, включаются в блок “Потребители”.

**Коммуникаторы.** Под это определение попадают все элементы электро- и теплокоммуникационной структуры, а также механические, гидравлические и пневматические системы связи, обеспечивающие передачу энергии между блоками “Генераторы”, “Аккумуляторы” и “Потребители”,

а также между элементами каждого из блоков. Понятие “сети” объединяет все виды цепей передачи электрической, тепловой, механической и т.д. энергии. Коммуникаторы ГЭК включают в себя не только средства передачи энергии и коммутации различных элементов схемы, но и средства мониторинга, контроля, диагностики и управления всеми элементами этого блока.

**Генераторы.** В качестве генераторных установок (генераторов) рассматриваются гидроэнергетические установки (ГЭУ), ветроэнергетические установки (ВЭУ), теплонасосные установки (ТНУ), а также установки гарантированного энергоснабжения, такие, как газо-, паротурбинные и дизель-генераторные установки.

Генераторы ГЭК имеют общую структуру и рассматриваются как объединение следующих элементов:

- источников первичной энергии;
- накопителей первичной энергии;
- преобразователей первичной энергии в заданный вид (по требованиям потребителей или иным условиям).

Модели генераторов ГЭК включают в себя:

- модели поступления энергоресурсов (валовой потенциал первичной энергии) для заданной площадки (места расположения ГЭК) в нормированных точках (для ветроэнергетических ресурсов, например, скорость ветра на высоте 10 м от поверхности земли);
- модели определения технического потенциала первичной энергии – количество энергии, которое может быть получено после применения мероприятий технического характера (концентрация напора на ГЭУ, определение скорости ветра на высоте установки ветроколеса ВЭУ, определение теплоотдачи или градиента температуры земли на различной глубине установки ТНУ и т.д.);
- модели накопителей первичной энергии (водохранилища ГЭУ, пруда-накопителя ТНУ, хранилища ресурсов для ПГУ, ГТУ, ДГУ).

*Ресурсные модели.* Модели поступления энергоресурсов строятся на основе рядов наблюдений характерных параметров (расход воды для ГЭУ, теплоотдача земли для ТНУ, скорость ветра для ВЭУ, график поставки дизельного топлива и газа) или в ином виде, позволяющем провести расчет использования энергоресурса на заданном интервале времени. В некоторых случаях эти зависимости задаются в виде вероятностных характеристик поступления энергоресурса, на основе которых могут быть определены соответствующие ряды характерных параметров. Для оценочных расчетов выход-

ные данные модели поступления энергоресурсов будут представляться в детерминированном виде.

Модели определения технического потенциала первичной энергии задаются в виде алгоритмов пересчета параметров, полученных при помощи моделей поступления (или накопления) энергоресурсов, и определяют параметры генерирующих установок, соответствующие рассматриваемым техническим решениям (возможного повышения уровня воды в водохранилище, подъема гондолы ВЭУ на различную высоту над поверхностью земли, возможной глубины скважины для подземного отбора низкопотенциального тепла для ТНУ, возможности работы иных элементов группы “Генераторы” в условиях рассматриваемой площадки).

Модели должны ориентироваться на все доступные данные об условиях использования предполагаемых технических средств на площадках<sup>1</sup>, которые, например, могут быть ограничены транспортной доступностью площадки для спецтехники, использование которой необходимо при определении значений параметров конструкции ГЭК (высота башни ВЭУ, например, определяет необходимость использования тяжелой подъемной техники).

Модели накопителей первичной энергии обычно задаются зависимостью объема накапливаемой первичной энергии от габаритных размеров накопителя (с учетом внешних ограничений по природоохранным, хозяйственным и иным факторам, если таковые имеют место). Они должны позволять определять внутренние параметры накопителя, связанные с технологией его использования и безопасностью работы.

*Модели аккумуляторов.* Одним из важных компонентов ГЭК и интеллектуальных сетей являются накопители энергии (аккумуляторы). Для накопления большого количества энергии применяются электрохимические, инерционные (маховики), тепловые, пневматические, гидравлические и др. аккумуляторы.

Модели аккумуляторов должны содержать основные характеристики устройств и зависимости, позволяющие определить эти характеристики.

Для моделей инерционных (механических) накопителей (гравитационных, кинетических, пружинных, газовых) будут характерны масса, габаритные размеры, скорость вращения (для маховиков), высота подъема (для гравитационных на-

<sup>1</sup> Под площадкой понимается место расположения ГЭК с заданными географическими координатами, описанием климатических условий, данными о народонаселении, хозяйственном использовании и транспортной доступности.

копителей), удельная энергия и время сохранения кинетической энергии. Время отдачи энергии не ограничено.

Для моделей тепловых аккумуляторов с жидким теплоносителем характерны параметры: теплоемкость, теплопроводность, габаритные размеры, масса, время сохранения тепла и скорость его отдачи.

Для гидроаккумуляторов важны масса, объем, габаритные размеры, напор, пропускная способность и механические свойства водоводов.

Для пневмоаккумуляторов – объем, давление, прочность стенок резервуара, скорость отдачи энергии.

Основными параметрами моделей аккумуляторов будут их энергетические показатели: накопленная энергия, потери энергии при хранении, скорость отдачи накопленной энергии, а также массо-габаритные показатели.

Электрическая сеть – совокупность подстанций, распределительных устройств и соединяющих их линий электропередачи, предназначенная для передачи и распределения электрической энергии (ГОСТ 24291–90).

Тепловая сеть – совокупность устройств (включая центральные тепловые пункты, насосные станции), предназначенных для передачи тепловой энергии, теплоносителя от источников тепловой энергии до теплопотребляющих установок<sup>1</sup>.

Основными элементами моделей сети (электрической, тепловой и др.) должны быть модели потокораспределения с учетом минимизации электрических (гидравлических, тепловых и др.) потерь в транспортной системе, схемы соединения элементов распределительных устройств и тепловых пунктов, оперативных переключений, обеспечивающих коммутацию сети в оптимальной для заданного критерия конфигурации.

Для целей выбора структуры и параметров ГЭК модели сети и распределительных устройств (пунктов) могут быть представлены схемами соединений генерирующего, аккумулирующего, потребляющего оборудования и линий, соединяющих различные элементы ГЭК.

Важным свойством транспортно-коммуникационного комплекса является его способность своевременно определять факт и место возникновения нештатных ситуаций, оценку причин и ожидаемых последствий, своевременное проведение операций по переключению коммутационных устройств для обеспечения безопасного, надежного и экономично-

го режима работы ГЭК. Эти функции возлагаются на существующие системы автоматизированного управления (включая средства оперативной диагностики состояния оборудования) и системы коммерческого учета электроэнергии. Алгоритмы управления являются неотъемлемыми элементами модели управления транспортно-коммутационным комплексом и обеспечивают его эффективную работу.

Модель потребителей энергии представляет собой среднеинтервальное значение мощности потребления или значение потребляемой энергии за заданный интервал времени. Для потребителей этого типа может быть задан произвольный график потребления мощности при обязательном удовлетворении интегрального ограничения по величине интервальной выработки и ограничениях по минимальной (технический минимум) и максимальной (установленная или плановая рабочая) мощности. В случае необходимости могут быть построены модели каждого потребителя этого типа отдельно, а затем проведено его эквивалентирование до типового потребителя с суммарными параметрами и минимальной областью допустимых значений параметров.

Модель потребителей-регуляторов будет представлена зависимостью обратной разности между графиком потребления и графиком генерации электрической и тепловой (механической) энергии.

Модель потребителей гарантированного энергоснабжения выражается графиком потребления активной (и реактивной) электрической, тепловой и т.д. мощности, которая при необходимости может быть суммирована и представлена в виде графика нагрузки генераторов ГЭК.

Модель резервных потребителей представляется ступенчатой функцией, ограниченной максимальной и минимальной мощностью РП, а для динамических режимов ГЭК и зависимостью мощности в переходных процессах.

Модели потребителей строятся на основе известных зависимостей машин и аппаратов с заданными свойствами.

Состав потребителей и их мощность выбираются с учетом конкретных требований к структуре и параметрам потребителей ГЭК, а также с учетом состава и параметров генерирующего и распределяющего оборудования ГЭК.

**Структура ГЭК и методика обоснования его параметров.** Параметры ГЭК определяются путем оптимизации по заданному множеству критериев параметров каждого из элементов ГЭК при работе на определенном горизонте планирования, определяющимся особенностями поступления возобновляемых энергоресурсов (суточные, недель-

<sup>1</sup> Федеральный закон “О теплоснабжении” от 27 июля 2010 г. № 190-ФЗ.



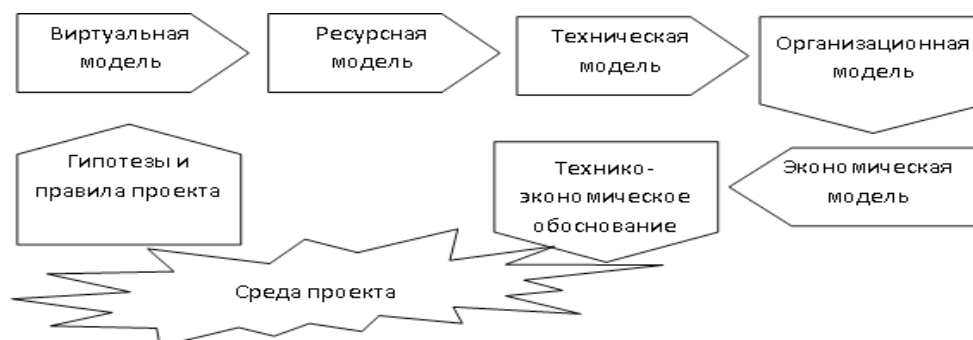


Рисунок 2 – Общая схема разработки технико-экономического обоснования проекта ГЭК

ные или сезонные колебания) при заданном способе раскрытия неопределенности их поступления; особенностями потребления различных видов энергии (суточные, недельные, сезонные и др. колебания); режимными особенностями элементов ГЭК (переключения, переходные процессы разных видов, условия безопасности и т.д.).

При этом не нужно забывать, что под выбором параметров подразумевается не только выбор параметров генерирующего оборудования, но и выбор параметров передающей системы и параметров потребителей.

Процесс проектирования проходит несколько стадий: от зарождения идеи до ее осуществления. Первые этапы жизненного цикла проекта будут связаны с разработкой и оценкой реализуемости идеи, планированием и получением технико-экономической оценки привлекательности проекта. Для проектирования ГЭК необходимо так же пройти ряд этапов [6]. Процедура оптимизации параметров физической системы ГЭК будет строиться в соответствии с общей процедурой проектирования, которая представлена на рисунке 2.

Эта схема может быть названа формальной схемой разработки проекта. В ней использованы:

- базисные гипотезы проекта, которые определяют цели (дерево целей), правила и учитываемые факторы окружения проекта, перечень условий осуществления проекта, основанных на результатах сравнительного анализа;
- виртуальная модель – структурно-функциональная модель (СФМ) объекта, включающая все возможные элементы конструкции из числа возможных элементов состава ГЭК, перечень задач, которые должны быть решены для удовлетворения главной цели проекта;
- ресурсная модель, которая представляет собой динамическую модель поступления энергоресурсов – как возобновляемых, так и не возобновляемых (например, характеристика поступления топлива);

- техническая модель – конкретные технические решения, позволяющие реализовать функцию, определенную в СФМ, наличие готовых технических средств или ресурсов для их изготовления на заказ;
- организационная модель – модель выполнения работ по сооружению ГЭК и условий его нормального функционирования, включая характеристику окружения проекта для оценки дополнительных затрат (например, строительства дорог для движения тяжелой техники), возможные риски и способы их снижения;
- экономическая модель – оценка технических и организационных решений в экономических (финансовых) показателях, позволяющая оценить экономическую реализуемость проекта: соответствие условий выполнения проекта возможностям его инициатора и заказчика;
- технико-экономическое обоснование (ТЭО) ГЭК – документ, содержащий информацию, достаточную для принятия решения о продолжении проекта или его прекращении.

Выполнение условий завершения каждого из приведенных в формальной схеме этапов предполагает переход к следующему этапу. В случае если одно или несколько условий не выполняются, осуществляется переход к предыдущему элементу формальной схемы, вплоть до изменения системы целей проекта.

Таким образом, процедура технико-экономического обоснования ГЭК представляет собой проектную процедуру, основанную на последовательном сужении множества вариантов выбора с получением в конце одного или нескольких альтернативных вариантов состава ГЭК, причем в разных вариантах структуры проектные параметры элементов ГЭК будут различными.

Создание единой методики проектирования и экспертизы проектов ГЭК в части обоснования их структуры и параметров позволит автоматизировать процесс обработки информации и суще-

ственно ускорить процедуру согласования проектных параметров с экспертами и инвесторами, особенно в случае, если они представляют различные государства, имеющие различное законодательство и международные обязательства. Она также сможет выполнять функцию межгосударственного координатора стратегии развития нетрадиционной энергетики.

**Выводы.** Развитие малой распределенной энергетики должно базироваться на парадигме комплексного проектирования всех составляющих *энергетического комплекса*, состоящего из генерирующих источников, транспортной сети и потребителей, включенных в единый контур управления.

Гибридные *энергетические комплексы*, включающие в состав генераторов энергии установки на основе ВИЭ, проектируются на основе единой методики оптимизации параметров всех элементов ГЭК – от ресурсообеспечения до производства вспомогательных продуктов и утилизации отходов.

Методика технико-экономического обоснования ГЭК должна включать в себя оптимизацию параметров математических моделей элементов ГЭК в едином комплексе структурно-функциональных и режимных моделей.

Использование единой методики обоснования параметров ГЭК позволит снизить затраты на проектирование, оценку инвестиционной привлекательности и технико-экономическую экспертизу проектов.

### *Литература*

1. О распределенной энергетике начистоту // ТЭК. Стратегии развития. 2011. № 2, март-апрель.
2. Экономика энергетики: учеб. пособие для вузов / Н.Д. Рогалев, А.Г. Зубкова, И.В. Мастерова и др.; под ред. Н.Д. Рогалева. М.: Изд-во МЭИ, 2005. 288 с.
3. Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Вып. 61. Проблемы исследования и обеспечения надежности либерализованных систем энергетики / отв. ред. Н.И. Воропай, А.Д. Тевяшев. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2011. 543 с.
4. Renewable energy. Markets and Prospects by technology. By Adam Brown, Simon Müller and Zuzana Dobrotkova. Information paper of IEA, 2011 // [http://www.iea.org/papers/2011/Renew\\_Tech.pdf](http://www.iea.org/papers/2011/Renew_Tech.pdf).
5. *Харитонов В.П.* Автономные ветроэлектрические установки. М.: ГНУ ВИЭСХ, 2006.
6. *Тягунов М.Г.* Структурно-функциональное моделирование процессов при управлении проектами // Сб. трудов пятого межд. симп. “Управление проектами: Восток–Запад – грань тысячелетий” (СОВНЕТ 99). Том 1. М.: СОВНЕТ. С. 386–391.