

**Сурков Михаил Александрович**

Surkov Mikhail

Ассистент

Assistant Professor

**Пупасов-Максимов Андрей Михайлович**

Pupasov-Maximov Andrey

Научный сотрудник

Scientist

**Чернов Дмитрий Евгеньевич**

Chernov Dmitriy

Научный сотрудник

Scientist

Томский политехнический университет, ЗАО «Сибкон»

Tomsk polytechnic university, JSC «Sibkon»

E-mail: masur@yandex.ru

**Применение экспериментального программного комплекса «Power System Simulation» и оценка возможности укрупненного зонирования территории Российской Федерации на оптимальные структуры комплексов с участием возобновляемых энергоресурсов**

Application of the Experimental software complex «Power System Simulation» and possibility estimation of large scale zoning of the territory of Russian Federation for optimal system structure with renewable energy sources

**Аннотация:** В данной работе рассмотрены расчеты рациональной структуры автономного комплекса электроснабжения (АКЭС) с помощью математической модели выбора оптимального типа энергоснабжения в локальной энергосистеме, включающей как использование традиционных источников электроэнергии, так и возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

**The Abstract:** In the given work the calculation of efficient autonomous power supply complex (APSC) structure with application of mathematic model of optimal type of power suppling for local power system, consist of as conventional power sources as renewed energy sources (RES) is considered.

**Ключевые слова:** Гибридная система, ветрогенератор, фотоэлектростанция, дизель-генератор, гидроэлектростанция, автономный, децентрализованный, моделирование.

**Keywords:** Hybrid system, wind generator, photo power plant, diesel-generator, hydro power plant, autonomous, decentralized, simulating.

\*\*\*

В настоящее время, использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в энергоснабжении рассматривается как перспективный способ решения энергетических проблем. В свою очередь, в данной области существует ряд не решенных технических задач, а также, отсутствует обоснованная методология по внедрению ВИЭ. Для определения целесообразности использования ВИЭ в той или иной ситуации необходим детальный анализ технического решения. При этом меры экономического регулирования позволили бы внедрять современные технологические решения более эффективно.

Возможности современной компьютерной техники позволяют моделировать работу энергосистем принимая во внимание множество факторов и проводить детальный анализ эффективности этих энергосистем с технической и экономической точек зрения. Одним из ярких примеров программного обеспечения (ПО), предназначенного для исследования автономных комплексов энергоснабжения (АКЭС) с использованием ВИЭ является ПО «HOMER» [5]. Разработка ПО «HOMER» проводилась в рамках правительственной программы по электроснабжению сельской местности (Village Power Program). В 2009 году была создана коммерческая компания HOMER Energy, LLC, осуществляющая дистрибуцию ПО «HOMER» во всем мире. Существует еще несколько программных комплексов, позволяющих моделировать работу автономных энергосистем, распространяемых как на коммерческой, так и на некоммерческой основе. В тоже время, эти системы моделирования подразумевают, что пользователь предложит исходную конфигурацию АКЭС (возможно, несколько вариантов). Таким образом, систематический алгоритм определения оптимальной структуры АКЭС в доступном ПО не заложен. Иными словами, имеющееся программное обеспечение в основном нацелено на задачу моделирования, и не решает задачу оптимизации. Большое количество факторов, влияющих на выбор доступных источников энергии, включая экономические, физические, технологические и т.д., делают задачу проектирование оптимальной гибридной системы электроснабжения (АКЭС) нетривиальной. Структура АКЭС, которая зависит от наличия и характера действия тех или иных возобновляемых энергоресурсов, а также от уровня потребления и режима работы потребителей электрической энергии, требует оптимизации и многофакторного анализа влияния параметров источников энергии, потребителей энергии, и характеристик основного энергетического оборудования АКЭС.

В данной работе рассмотрены расчеты оптимальной структуры АКЭС с помощью математической модели выбора оптимального типа энергоснабжения в локальной энергосистеме, включающей как использование традиционных источников электроэнергии, так и возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Математическая модель была предложена в работе [2] и далее, будут использоваться обозначения, введенные в [2]. Методика выбора энергетических установок были рассмотрены в работах [3] и [4]. Разработанная математическая модель сводит задачу выбора оптимальной структуры локальной энергосистемы на основе формализованных данных по имеющимся технологиям, технологическим решениям, климатическим и геофизическим условиям, тарифам и прогнозам к задаче нелинейной оптимизации. Для проведения расчетов и дальнейшего совершенствования математической модели был создан экспериментальный образец программного обеспечения, условно названный «Power System Simulation» (далее «PSS»). В качестве исходных данных по наличию возобновляемых энергоресурсов в разрабатываемом ПО «PSS» использованы данные современных геоинформационных систем. В качестве исходных данных по техническим, эксплуатационным и экономическим характеристикам генерирующих установок использовались данные производителей и

поставщиков, а также, данные, находящиеся в свободном доступе, которые были собраны, систематизированы и обработаны в соответствующей базе данных.

Структурная схема модели [2] представлена на рисунке 1. В модели рассматривается 4 возможных типа источника энергии, которые обозначаются индексом типа  $X = \{h, s, w, d\}$ , ( $w$  – ветер,  $h$  – вода,  $s$  – Солнце,  $d$  – дизель-генератор). Для каждого источника энергии можно определить технический потенциал  $w_X$ , кВтч/год, то есть количество энергии, которое может быть выработано генератором с фиксированной (единичной) номинальной мощностью за один год работы. При этом, для каждого источника энергии выбрана технология преобразования энергии, что позволяет определить эффективность преобразования ВИЭ. Кроме того, для каждого  $X$  была собрана база данных установок, доступных на рынке. Анализ этих данных позволяет установить ценовую характеристику  $C_X(P_{X,nom})$  руб/кВт: стоимость кВт установленной мощности от номинальной мощности генератора.

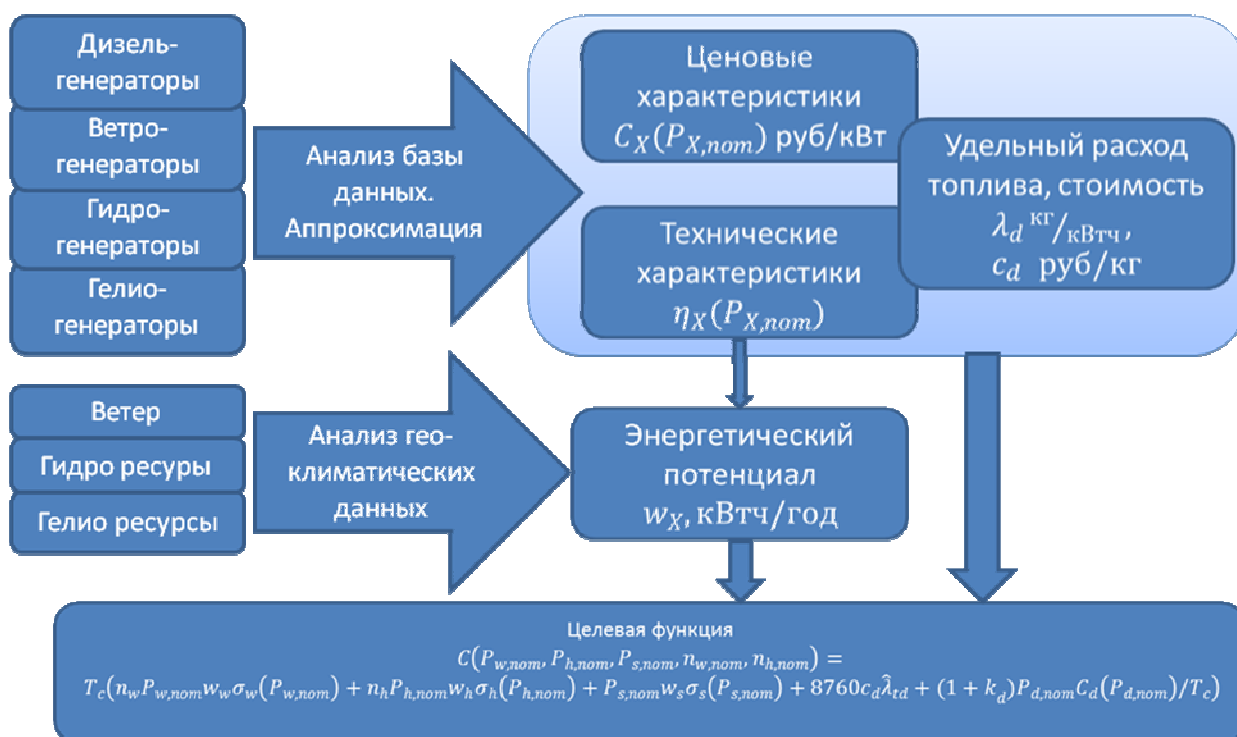


Рис. 1. Математическая модель ВГГД-комплекса

Целевая функция, которая определяет затраты на электроснабжение с помощью автономного Ветро-Гелио-Гидро-Дизельного-комплекса (ВГГД-комплекс), равна сумме капитальных затрат на приобретение и содержание автономного ВГГД-комплекса, а также стоимости потребленного топлива за весь период эксплуатации комплекса и имеет следующий вид

$$C(P_{X,nom}, N_X; k_X, T_c, c_d) = \sum_X (1 + k_X) N_X C_w(P_{X,nom}) + 8760 T_c c_d \lambda_{td} \quad (1)$$

Здесь  $P_{X,nom}$  обозначают номинальные мощности установок, отношение  $N_X/P_{X,nom}$  равно количеству установок типа  $X$ , безразмерные коэффициенты  $k_X$  определяют эксплуатационные затраты. Параметр  $T_c$  равен сроку эксплуатации комплекса в годах. Параметр  $c_d$ , руб/кг – это стоимость дизельного топлива. Последнее слагаемое  $\lambda_{td}$ , кг/час, определяет сред-

ний расход топлива дизель-генератором в час, с учетом выработки электроэнергии за счет ВИЭ.

$W_N$  – обозначает годовое потребление электроэнергии,

Средний часовой расход топлива  $\lambda_{гд}$  сложным образом зависит от номинальных мощностей установок комплекса и потенциала ВИЭ. Часовой расход топлива связан со средним удельным расходом топлива  $\lambda_{гд} = \lambda_d P_N$ . В работе [1] была получена формула для удельного расхода топлива, в зависимости от номинальной мощности генератора и мощности нагрузки:

$\lambda_d = 0,43693 P_{d,ном}^{-0,1} \left( 1 + k_{xx} \left( \frac{P_{d,ном}}{P_N} - 1 \right) \right)$ . Как показано в [2], средний расход топлива с

учетом ВИЭ может быть записан в следующем виде

$$\lambda_{гд} = 0,43693 P_{d,ном}^{-0,1} \left( k_{xx} P_{d,ном} + \frac{(1 - k_{xx})}{8760} (W_N - W_P) \Theta(W_N - W_P) \right),$$

где  $\Theta$  – функция Хевисайда (ступенчатая функция) позволяет корректно учесть избыток энергии,  $W_N$  – годовая потребность в электроэнергии, а  $W_P$  – годовая выработка электроэнергии только от возобновляемых источников энергии, определяемая как

$$W_P = N_w w_w + N_h w_h + N_s w_s.$$

Математическая модель, основанная на построенной целевой функции, позволяет, используя стандартные методы решения нелинейной задачи оптимизации, находить значения установочных мощностей ВГД-комплекса, соответствующие максимальной экономии топлива. Возможные ограничения на переменные модели и их физические смысл рассмотрены в [2]. Отметим, что формула (1) является достаточно общей, и позволяет учесть большее число ВИЭ и других источников энергии. Чтобы записать данную целевую функцию в явном виде, нужно конкретизировать ценовые характеристики  $C_X(P_{X,ном})$ ,  $X = \{h, s, w\}$  и технический потенциал ВИЭ  $w_X$ ,  $X = \{h, s, w\}$ .

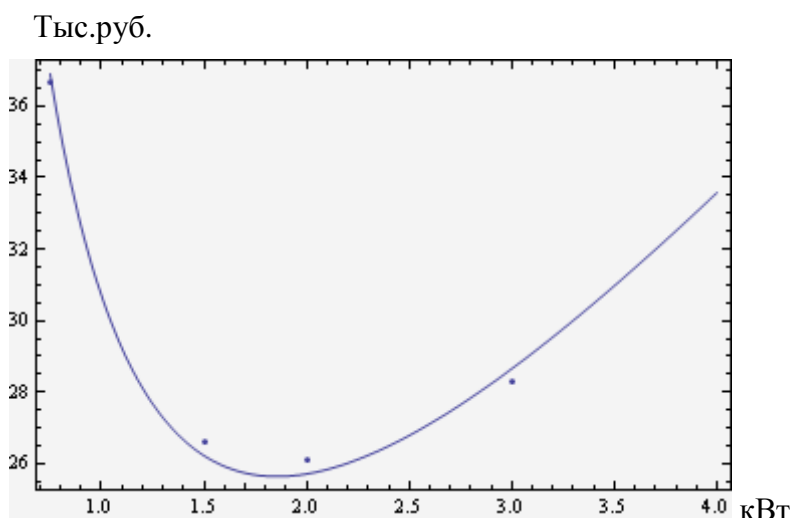


Рис. 2. Ценовая характеристика ветрогенераторов

На рисунке 2 представлен пример ценовой характеристики ветрогенераторов в диапазоне до 4 кВт установленной мощности одного агрегата. Методика определения технического потенциала приведена в [2].

Полученная модель обладает открытой архитектурой, адекватно отражает процессы распределения балансов мощностей и позволяет проводить исследования работы гибридного АКЭС в широком диапазоне установленных мощностей основного энергетического оборудования. В настоящий момент, предложенная модель реализована в виде программного комплекса «PSS». Динамически обновляемая база данных установок позволяет уточнять функции, входящие в целевую функцию и таким образом улучшать предсказательную силу модели.

Программный комплекс «PSS» позволяет анализировать как каждый из энергоресурсов в отдельности, так и в составе ВГГД комплекса (см. рисунок 3). Кроме того, в программном комплексе «PSS» реализована возможность динамического моделирования работы ВГГД комплекса, позволяющая оценить адекватность выбора, получить информацию о структуре затрат и вклад каждой расходной статьи в итоговую себестоимость вырабатываемого кВт·ч электроэнергии. Разработанный программный комплекс обладает интуитивно понятным интерфейсом и позволяет даже не подготовленному оператору производить анализ структуры автономной системы электроснабжения.

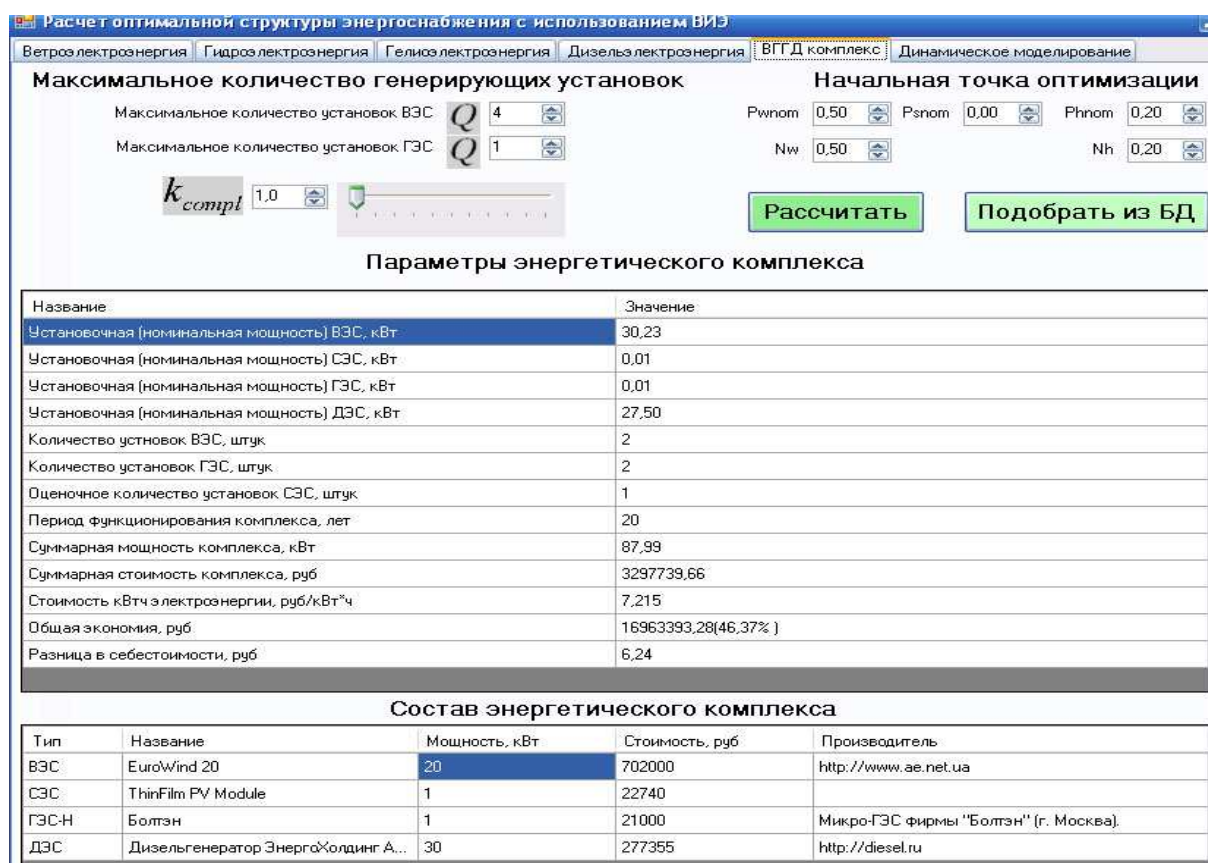


Рис. 3. Интерфейс программного комплекса

В качестве примера применения разработанного программного обеспечения (ПО) рассмотрим расчет оптимального ВГГД-комплекса со следующими исходными данными места дислокации ВГГД-комплекса:

- Географическое положение: с. Новоникольское Александровского района Томской области, 59° 47' северной широты, 79° 13' восточной долготы; 41 метр над уровнем моря;
- Потребности в электроэнергии: максимальная нагрузка 110 кВт, средняя нагрузка 70 кВт, годовая потребность 600 тыс. кВт·ч;
- Стоимость дизельного топлива: 30 руб/кг;
- Устаревшая ДЭС. Удельный расход топлива на выработку электроэнергии 0,47 кг/ кВт·ч;
- Текущие затраты на выработку электроэнергии 14 руб/ кВт·ч.

На первом этапе определим потенциал возобновляемых источников энергии (с учетом средних коэффициентов преобразования генераторов):

- Солнечная энергия: 1465 кВт·ч на кВт установленной мощности за год (оптимальный угол наклона модуля 49°, ориентация на юг);
- Энергия ветра: 1520 кВт·ч на кВт установленной мощности за год (средняя скорость ветра 4,1 м/с, номинальная скорость ветроустановки 8 м/с);
- Гидроэнергетический потенциал (определяется ПО по геоклиматической информации из обновляемой БД).

Для оценки эффективности электроснабжения по критерию минимальной себестоимости генерируемой электроэнергии выделим три основных варианта электроснабжения рассматриваемого поселка:

- Вариант «А»: Замена устаревшего дизель-генератора (результаты расчетов для других вариантов сравниваются с вариантом А)
- Вариант «Б»: Сценарий сохранения уровня потребления (ограничивает возможности роста энергопотребления)
- Вариант «В»: Сценарий возможного роста потребления на 10 процентов

Результаты расчетов для исследуемых трех вариантов сведем в таблицу.

**Таблица**

Результаты расчетов вариантов электроснабжения п. Новоникольское Томской области

	<b>ВЭС: Мощность, тип, цена</b>	<b>ДЭС: Мощность, тип, цена</b>	<b>Стои- мость комплек- са*</b>	<b>Затраты на выработку электро- энергии</b>	<b>Годо- вой расход топли- ва</b>	<b>Годо- вая эконо- мия</b>	<b>Срок оку- пае- мости</b>
А	0	110 кВт, Ausonia VO0150 SWD 0,92 млн. руб	0,92 млн. руб	10,4 руб/ кВт•ч	210 т		
Б	100 кВт, EuroWind10 0 3,48 млн. руб	110 кВт, Ausonia VO0150 SWD 0,92 млн. руб	4,4 млн. руб	8,9 руб/ кВт•ч	180 т	0,9 млн. руб	6 лет
В	120 кВт (в БД нет данных по указанной номиналь- ной мощ- ности)	110 кВт	5,6 млн. руб	8,7 руб/ кВт•ч	174 т	1,1 млн. руб	6 лет

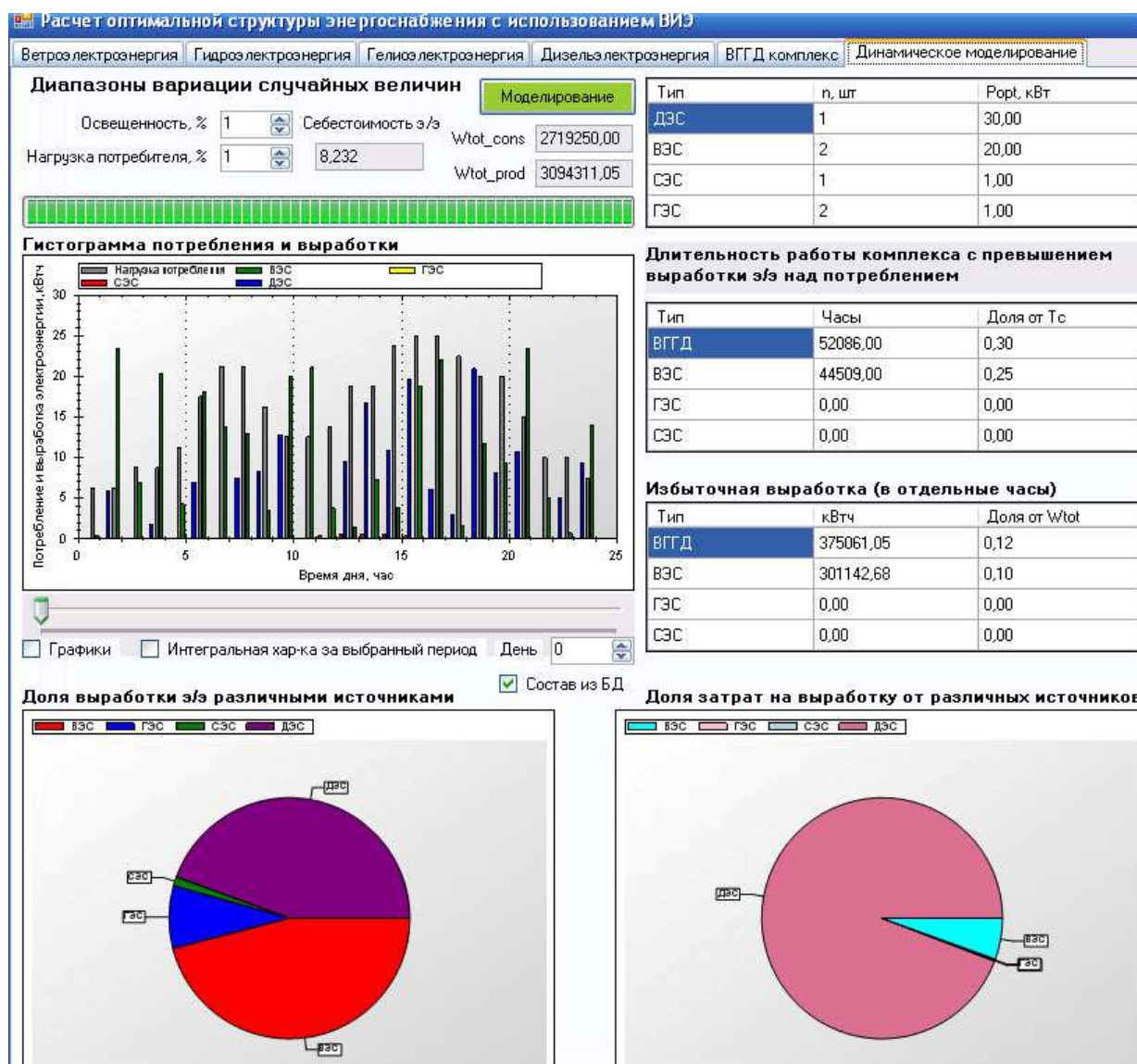
Проанализировав полученные данные можно отметить, что:

- все варианты приводят к уменьшению уровня затрат по сравнению с имеющимся значением 14 руб/ кВт•ч;
- вариант «В» предпочтителен, поскольку при схожем с вариантом «А» сроке окупаемости учитывает перспективный рост электропотребления;
- себестоимость 1 кВт•ч электроэнергии в варианте «В» будет ниже варианта «А» только в случае повышения электропотребления.

При оценке срока окупаемости вариантов электроснабжения использовалось значение ставки дисконтирования 8 %.

В программном комплексе «PSS» заложена возможность анализа предложенного решения на базе имитационного моделирования параметров схемы электроснабжения. При моделировании учитывается стохастический характер первичного энергоресурса (ветер, облачность и т.п.) и возможное изменение графика нагрузки потребителя электроэнергии. Пример вкладки с анализом предложенного решения представлен на рисунке 4.





**Рис. 4.** Вкладка имитационного моделирования и анализа предложенного решения в программном комплексе «PSS»

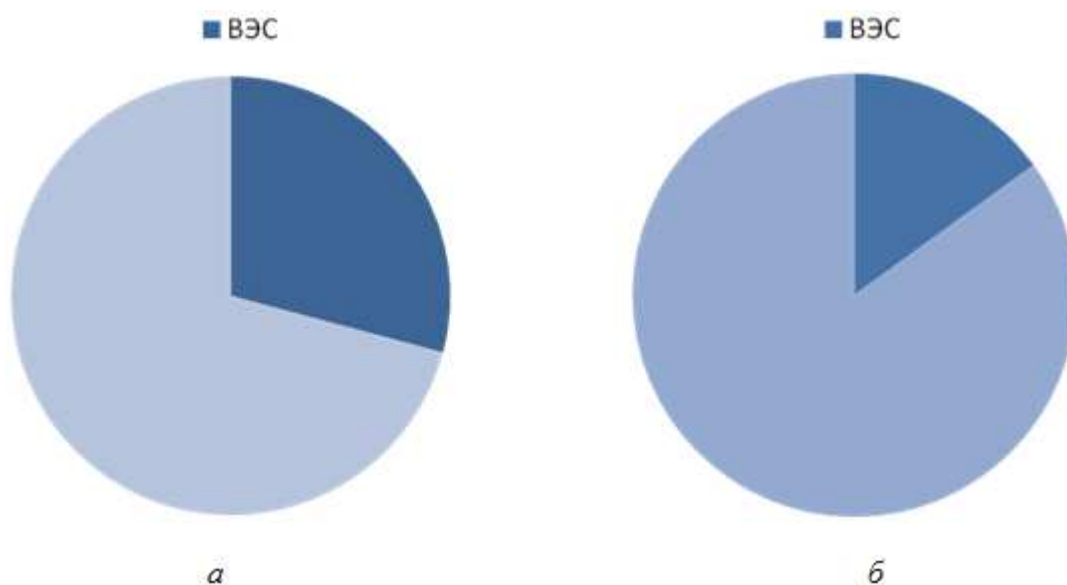
На рисунке 5 представлен результат анализа электроснабжения п. Новоникольское. На основе полученных данных можно сделать следующие заключения:

- Оптимальным является использование двух видов ресурсов из четырех возможных – дизельное топливо и ветер;
- Выработка на ВЭС более эффективна, но дальнейшее увеличение мощности ВЭС нецелесообразно (низкая плотность ветроэнергетических ресурсов в месте установки комплекса), однако в дальнейшем возможны корректировки при условии изменения внешних факторов, учитываемых программой (скорость ветра и его направление, стоимость дизельного топлива и т.д.).

В заключении отметим ключевые моменты данной работы. На основе предложенной математической модели была разработана программа для ЭВМ «PSS», которая обеспечивает функционал по оптимизации структуры АКЭС, отсутствующий в других системах моделирования (ПО HOMER и ПО RetScreen [6]). В рамках построенной математической модели воз-



можно детальное изучение затрат на выработку электроэнергии и эффективности АКЭС в зависимости от всех существенных параметров, что может оказать влияние на разработку АКЭС в дальнейшем. Разработанный программный комплекс «PSS» позволяет связать первичные энергоресурсы (ветер, гидроресурсы, солнечная энергия, дизельное топливо), нагрузки потребителей и процессы энергопреобразования в элементах автономного комплекса электроснабжения, что дает возможность провести всестороннее исследование режимов совместной работы оборудования с точки зрения минимизации себестоимости генерируемой электроэнергии, определять границы энергоэффективного использования оборудования в составе микросети и задать основные принципы эффективного построения автономного комплекса электроснабжения с участием возобновляемых источников энергии. В статье рассмотрен пример расчета оптимальной структуры для случая низкого технического потенциала ВИЭ. В данном примере вычислена предполагаемая экономия от внедрения АКЭС. Установлено, что в рассматриваемом случае использование ВИЭ целесообразно.



**Рис. 5.** Пример анализа предложенного решения в программном комплексе «PSS.exe»: а – доля выработки электроэнергии различными источниками энергии; б – доля затрат на каждый источник энергии в себестоимости производимого кВт·ч электроэнергии

Отметим также перспективы использования ПО «PSS». С помощью модели можно будет определять критические уровни технологических решений для использования ВИЭ: стоимость технологии ВИЭ и эффективность преобразования энергии, при котором использование данного технологического решения станет целесообразным. Таким образом, возникает перспектива постановки обоснованных конструкторских задач разработчикам ВИЭ, кроме того, могут быть выработаны стандартные решения по автономному энергоснабжению и созданы соответствующие геоинформационные системы.

В перспективе, внедрение результатов проекта приведет к снижению временных затрат на срок проведения экспресс-экспертизы проекта по внедрению АКЭС.

Работа выполнена в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы» (гос. контракт № 07.514.11.4079).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лукутин Б.В. и др. Исследование режимов работы автономного ветродизельного комплекса энергоснабжения: монография / Б.В. Лукутин, Р.М. Мустафина, М.А. Сурков. – Павлодар: Киреку, 2012. – 169 с.
2. Сурков М.А. и др. «Разработка и применение экспериментального программного комплекса для оценки комбинированного использования ВИЭ»//Интернет-журнал «Наукоедение». 2012 №2 (10) [Электронный ресурс].-М. 2012- Ид. номер ФГУП НТЦ "Информрегистр" 04212001360029. – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/sbornik11/11-5.pdf>, свободный – Загл. с экрана
3. Сурков М. А., Лукутин Б. В. Расчет вырабатываемой мощности ветроэнергетической установки. // Вестник Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности – Чита: РИК ЧитГУ, 2010. – Т15, №4. – с. 133-137
4. Сурков М. А., Обухов С. Г., Хошнау З. П. Методика выбора ветроэнергетических установок малой мощности // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. - 2011 - №. 2 - С. 25-30 - 5603-2011
5. <http://homerenergy.com/index.html>
6. <http://www.retscreen.net/ru/home.php>