

**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**

**Разработка и применение экспериментального программного комплекса  
для оценки комбинированного использования ВИЭ**  
Development and application of the Experimental software complex for combined  
employment of RES

**Аннотация:** В данной работе рассматривается актуальная проблема комбинированного использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Целью исследования является поиск путей оптимизации структуры автономных комплексов, использующих ВИЭ. Рассмотрены основные ВИЭ и созданы математические модели энергопреобразования в основных элементах автономной энергосистемы, разработана имитационная модель гибридного автономного комплекса электроснабжения.

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

**The Abstract:** In the given work the actual problem of combined use of renewed energy sources (RES) is considered. The Research objective is search for ways of structure optimisation of the autonomous complexes using RES. Primary RES are considered and mathematical models of power transformation in basic elements of the autonomous power supply system are developed, the simulation model of the hybrid autonomous electrical supply system is designed.

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

\*\*\*

Россия – крупнейшая страна в мире по площади зон децентрализованного электроснабжения, составляющим около 70 % её территории. В зонах, не имеющих централизованного электроснабжения, в России проживает по разным оценкам от 10 до 20 млн. человек. Большинство этих территорий расположены в районах с суровыми климатическими условиями – Сибирь, Дальний Восток, Крайний Север. Задача повышения энергоэффективности локальных комплексов электроснабжения является актуальной и имеет важное значение для социально-экономического развития страны.

Для построения автономных систем электроснабжения преимущественно используются автономные дизельные электростанции (ДЭС), которые имеют как несомненные преимущества, так и очевидные недостатки:

- большой расход органического сырья;
- высокая стоимость вырабатываемой электроэнергии;
- низкая надежность электроснабжения;
- вредное воздействие на окружающую среду.

В тоже время им полноценной замены нет. Повысить надежность и эффективность энергообеспечения децентрализованных зон можно, применяя гибридные комплексы с использованием различных источников энергии (солнце, дизель, ветер и т.п.). Применение возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в составе автономных энергетических систем позволяет снизить топливную составляющую в себестоимости вырабатываемой электроэнергии, что существенно повышает их технико-экономическую эффективность [5].

Перспективность и актуальность применения возобновляемых энергоресурсов для экономики органического топлива сегодня отмечена как отечественными, так и зарубежными специалистами в области электроэнергетики и теплоснабжения. Энергетическая стратегия России на период до 2020 года предусматривает замещение 20 млн. тонн условного топлива традиционных энергоносителей за счет возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Достижение этой отметки невозможно без комплексного рассмотрения многокритериальной задачи повышения технико-экономической эффективности рабочих режимов автономных комплексов электроснабжения (АКЭС) с использованием рассредоточенных источников энергии, часть из которых возобновляемые. [8; 9]

Проведенный анализ работ в области автономных систем электроснабжения с участием ВИЭ выявил отсутствие данных о диапазонах эффективного применения и режимах работы гибридных комплексов электроснабжения в зависимости от: ветровых условий, установленной мощности ветровой электростанции (ВЭС), значений солнечной радиации, наличия и величины водных ресурсов, режимов работы ДЭС.

В то же время, рынок автономных гибридных комплексов за последние 20 лет продвинулся вперед от просто интересной темы, обсуждаемой в научных кругах, до целого ряда реально действующих энергосистем. Практически во всем мире – от Аляски до Антарктиды, от Австралии до Испании – интеграция установок, использующих возобновляемые энергоресурсы, в изолированные энергосистемы успешно прошла испытания временем. Развивающаяся промышленность в сфере ВИЭ и научно-технический прогресс в системах автоматизации и управления, удаленном мониторинге, технологиях аккумулирования электроэнергии являются предпосылками дальнейшего развития гибридных АКЭС и их распространения во все большем количестве изолированных энергосистем.

Целью данной работы является создание программного комплекса, позволяющего проводить оценку затрат на выработку электроэнергии в локальной энергосистеме в зависимости от структуры системы электроснабжения и режимов работы основного генерирующего оборудования.

Для достижения поставленной цели была разработана математическая модель, предназначенная для выбора оптимальной структуры локальной энергосистемы на основе формализованных данных по имеющимся технологиям, технологическим решениям, климатическим и геофизическим условиям, тарифам и прогнозам. Главной задачей создаваемого программного комплекса является определение оптимальной структуры локального комплекса электроснабжения, т.е. такой структуры, для которой стоимость выработки электроэнергии является минимальной.

Исходными данными являются параметры потребителя электрической энергии и потенциал возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в данном регионе, а также, характеристики доступных на рынке генерирующих установок. В качестве независимых переменных выступают номинальные мощности генерирующих установок, использующих разные ВИЭ. В первом приближении можно ограничиться рассмотрением простейшей энергосистемы состоящей из набора генераторов. Данный набор обязательно включает генератор на органическом топливе (ДЭС), а также комбинацию из генераторов на энергии ветра, солнца или воды. Поскольку одно из основных требований к автономной энергосистеме заключается в бесперебойности электроснабжения, мощность ДЭС в рассматриваемой модели является фиксированной величиной, определяемой пиковым потреблением электроэнергии.

При решении задач с множеством переменных более удобно перейти к непрерывному аналогу. Основная идея заключается в аппроксимации гладкими (непрерывными) функциями параметры, характеризующие энергосистему в целом и ее блоки в частности. Можно выделить три основные функциональные зависимости:

1) Ценовая характеристика генератора, использующего ресурс типа  $X = \{h, s, w, d\}$ , ( $w$  – ветер,  $h$  – вода,  $s$  – Солнце,  $d$  – дизель-генератор), это зависимость удельной стоимости кВт установленной мощности от номинальной мощности генератора,  $C_X(P_{\text{н.м.ст}})$  руб/кВт. Ценовые характеристики задаются путем аппроксимации данных о стоимости генераторов различной мощности.

2) Характеристика доступных энергетических ресурсов, или энергия, вырабатываемая генератором с фиксированной (единичной) номинальной мощностью за один год работы,  $W_X$ , кВтч/год. Доступные энергетические ресурсы зависят от потока энергии в предполагаемом месте использования комплекса и от эффективности преобразования энергии генератором. Для заданного положения, доступные энергетические ресурсы выражаются набором трех констант (принимается условие, что дизельное топливо имеется в необходимых количествах).

3) Характеристики источников энергии (скорость ветра, поток солнечной энергии, расход воды, расход топлива).

Рассмотрим целевую функцию, которая определяет затраты на электроснабжение с помощью автономного Ветро-Гелио-Гидро-Дизельного-комплекса (ВГГД-комплекс). Данная целевая функция 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

$$C(P_{w,ном}, P_{h,ном}, P_{s,ном}, n_{w,ном}, n_{h,ном}) = T_c (n_w P_{w,ном} w_w \sigma_w(P_{w,ном}) + n_h P_{h,ном} w_h \sigma_h(P_{h,ном}) + P_{s,ном} w_s \sigma_s(P_{s,ном}) + 8760 c_d \bar{\lambda}_{гд} + (1 + k_d) P_{d,ном} C_d(P_{d,ном}) / T_c) \quad (1)$$

Переменные снабжены индексами, причем первый индекс обозначает тип источника энергии ( $w$  – ветер,  $h$  – вода,  $s$  – Солнце,  $d$  – дизель-генератор). Целевая функция (1) зависит от пяти независимых переменных, которые определяют мощность и число установок, формирующих ВГГД-комплекс:

$P_{w,ном}, P_{s,ном}, P_{h,ном}$ , кВт – обозначают номинальные мощности установок,

$n_h, n_w$  – число установок данного типа,

$W_N$  – обозначает годовое потребление электроэнергии,

$T_c$ , год – срок эксплуатации комплекса,

$c_d$ , руб/кг- стоимость дизельного топлива,

$\bar{\lambda}_{гд}(P_{w,ном}, P_{h,ном}, P_{s,ном}, P_{d,ном}, n_{w,ном}, n_{h,ном})$ , кг/час – средний расход топлива дизель-генератором в час.

Функции  $\sigma_X(P_{X,ном})$ ,  $X = \{h, s, w\}$  задают стоимость выработки кВт·ч электроэнергии на установке заданного типа и являются определяющими функциями рассматриваемой модели. Они связаны с ценовой характеристикой  $C_X(P_{X,ном})$ , доступными энергетическими ресурсами  $w_X$  и эксплуатационными затратами следующим образом

$$\sigma_X(P_{X,ном}) = \frac{(1 + k_{X,эк}) C_X(P_{X,ном})}{T_c w_X}$$

Здесь  $k_{X,эк}$  – коэффициент эксплуатационных затрат для генератора типа X.

Следует отметить, что средний часовой расход топлива  $\bar{\lambda}_{гд}(P_{w,ном}, P_{h,ном}, P_{s,ном}, P_{d,ном}, n_{w,ном}, n_{h,ном})$  сложным образом зависит от номинальных мощностей установок комплекса и потенциала ВИЭ. Часовой расход топлива связан со средним удельным расходом топлива  $\bar{\lambda}_{гд} = \bar{\lambda}_d \bar{P}_N$ . Причина, по которой в данной модели используется почасовой расход топлива связана с тем фактом, что удельный расход топлива дизель-генератора на холостом ходу становится бесконечно большим (дизель-генератор работает, потребляет топливо, но не вырабатывает электроэнергию), в то время как почасовой расход топлива всегда является конечной величиной. В работе [1] была получена формула для вычисления удельного расхода топлива, в зависимости от номинальной мощности генератора и мощности нагрузки:

$$\lambda_d = 0,43693 P_{d,ном}^{-0,1} \left( 1 + k_{xx} \left( \frac{P_{d,ном}}{P_N} - 1 \right) \right)$$

После выполнения операции усреднения и переходу к почасовому расходу получим следующую зависимость

$$\hat{\lambda}_{та} = 0,43693 P_{д,ном}^{-0,1} \left( k_{кк} P_{д,ном} + \frac{(1 - k_{кк})}{8760} (W_N - W_P) \Theta(W_N - W_P) \right),$$

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

$$W_P = n_w P_{w,ном} W_w + n_h P_{h,ном} W_h + P_{s,ном} W_s.$$

Заметим, также, что переменные  $n_x$  входят во все выражения разрабатываемой модели только как множители при номинальных мощностях, поэтому осуществляется переход к новым переменным,  $n_x P_{x,ном} = N_x$ , которые имеют смысл полной установочной мощности соответствующего компонента энергосистемы с учетом числа установок.

Поскольку гибридный комплекс электроснабжения подбирается таким образом, что при необходимости ДЭС способна полностью обеспечить потребителя электричеством (т.е. является гарантирующим источником электроэнергии в автономной системе электроснабжения), а снижение стоимости кВт·ч вырабатываемой электроэнергии осуществляется за счет экономии топлива благодаря энергии, вырабатываемой ВИЭ, то средняя мощность нагрузки на ДЭС равна:

$$\hat{P}_N = \frac{W_N - W_P}{8760}$$

В рассматриваемой модели имеются следующие ограничения:

$$0 \leq P_{x,ном} \leq N_x \leq n_{x,max} P_{x,ном},$$

$$N_w + N_h + P_s \leq k_{ov} P_{д,ном}.$$

Первый набор ограничений связан с тем, что мощности установок могут быть только неотрицательными: мощность компонента АКЭС должна быть больше либо равна мощности отдельных установок, и фиксируется максимальное число установок в компоненте АКЭС  $n_{x,max}$ .



Рисунок 1. Блочная структура программы «PSS.exe»

Математическая модель, основанная на построенной целевой функции, позволяет, используя стандартные методы решения нелинейной задачи оптимизации, находить значения установочных мощностей ВГГД-комплекса, соответствующие максимальной экономии топлива. Чтобы записать данную целевую функцию в явном виде, нужно конкретизировать ценовые характеристики  $\sigma_X(P_{X,nom})$ ,  $X = \{h, s, w\}$  и параметры ВИЭ  $w_X$ ,  $X = \{h, s, w\}$ .

Структура энергокомплекса определяется набором характеристик отдельных блоков, описывающих свойства только одного энергоресурса и преобразующей его в электрическую энергию установки (рис. 1).

В частности, для модуля ВЭС используются следующие входные данные [6; 7]:

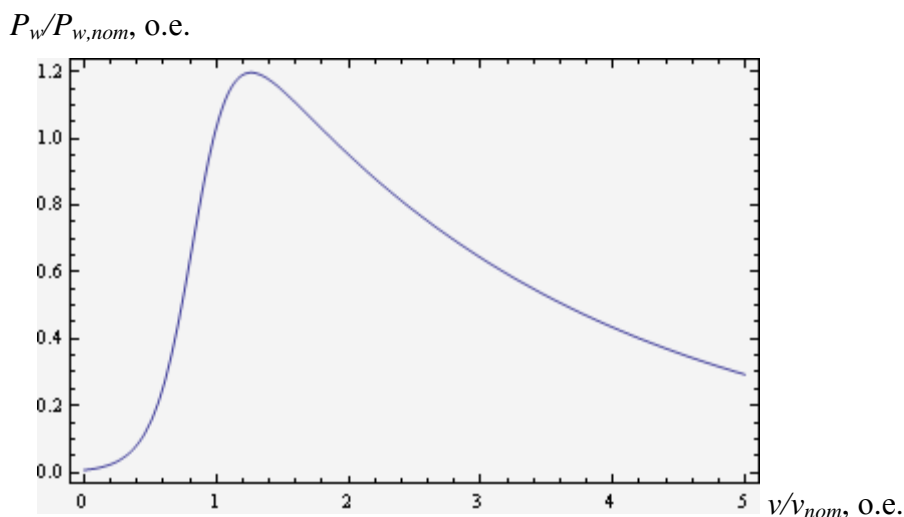
а) Характеристика первичного энергоресурса. Основные энергетические параметры ветра описываются распределением Вейбулла (параметры  $v, k$ ), которое задает плотность вероятности для скорости ветра

$$f(v) = \frac{k}{v} \left(\frac{v}{v}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{v}\right)^k\right).$$

б) Энергопреобразование. Непосредственно преобразование первичного энергоресурса в механическую энергию, а затем в электрическую энергию, описывается зависимостью (см. рисунок 2)

$$P_w(v) = 1,04P_{w,nom} \left(1 + \operatorname{Tanh}\left(\frac{v - 0,85v_{nom}}{0,3v_{nom}}\right)\right) \exp\left(-\frac{0,4v}{v_{nom}}\right),$$

где  $v_{nom}$  – номинальная скорость ветра ВЭС, т.е. такая скорость ветра, при которой ВЭС развивает номинальную мощность. Значения численных параметров, входящих в выражение для вырабатываемой ВЭС мощности, определяется аппроксимацией собранных данных по ветрогенераторам. [2; 3] Данные по каждой установке сначала приводятся к относительным единицам, затем объединяются, после чего проводится аппроксимация. В рассмотренном примере использовались данные для вертикально-осевых генераторов (ГРЦ-Вертикаль) в диапазоне до 50 кВт.



**Рисунок 2.** Усредненная характеристика ветрогенератора в относительных единицах скорости и мощности.

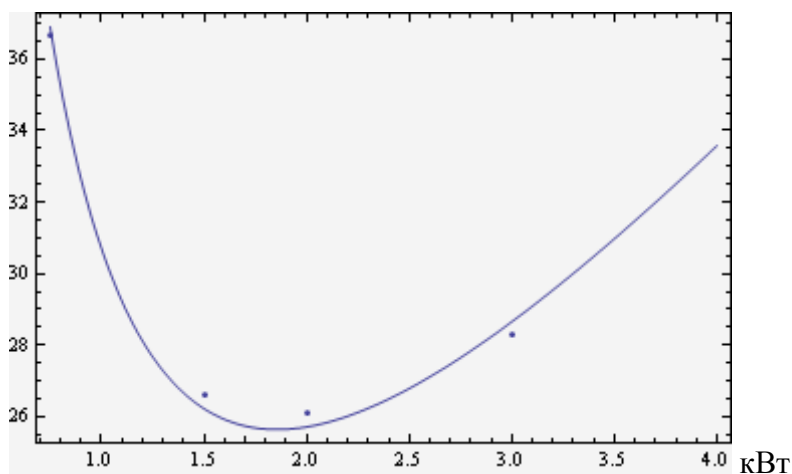
в) Стоимость ВЭС. Зависимость «Стоимость кВт установленной мощности генератора»

$$C_w(P_{w,nom}) = A_{wc}/P_{w,nom} + B_{wc} P_{w,nom}, \text{ тыс. руб./кВт.}$$

Например, для ветроэнергетических установок в диапазоне до 40 кВт можно использовать с параметрами  $A_{wc}=23,8$ ;  $B_{wc} = 6,91$  [4].

Уточнение характеристики стоимости и расширение диапазона мощностей, в котором аппроксимация будет адекватной, осуществляется путем увеличения выборки установок. На рисунке 3 представлен пример ценовой характеристики ветрогенераторов в диапазоне до 4 кВт установленной мощности одного агрегата.

Тыс.руб.



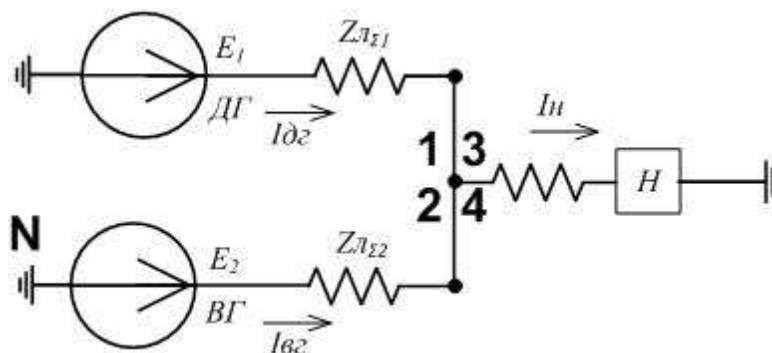
**Рисунок 3.** Ценовая характеристика ветрогенераторов

г) Срок службы основного энергетического оборудования ВЭС  $T_w$ ,  $N$  лет ( $T_w = 20$ ).

Используя эти данные, определяются константа  $w_w$  и функция  $\sigma_w(P_{w,ном})$ , при этом

$w_w = 8760 \int_0^{v_{max}} dv f(v) P_w(v) / P_{w,ном}$ . Выполняя аналогичные расчеты для других компонент АКЭС, полностью определяется целевая функция.

Исследование режимов работы гибридных АКЭС показало, что влияние особенностей распределенной генерации в учете потерь электроэнергии в ЛЭП оказывает значительно меньшее влияние на энергоэффективность работы гибридных АКЭС в целом в сравнении с влиянием таких параметров, как соотношение установленных мощностей ВЭС и ДЭС, СЭС, ГЭС, режима работы ДЭС и условий согласования работы основного энергетического оборудования. Соответственно, первоочередной задачей становится исследование гибридных АКЭС в зависимости от отмеченных определяющих факторов. Учитывая это, целесообразно использовать упрощенную модель, где все исследуемые энергоисточники находятся в непосредственной близости друг от друга, что является частным случаем распределенной генерации (рис. 4)



**Рисунок 4.** Схема электроснабжения с распределенными в пространстве источниками энергии, где  $Z$  – сопротивление линии,  $H$  – электрическая нагрузка,  $I$  – ток в линии,

$ВГ$  – ВЭС,  $ДГ$  – ДЭС



Система согласования загрузки ДЭС настроена так, чтобы развивать только недостающую мощность, которую не могут обеспечить энергоисточники, использующие возобновляемые ресурсы энергии. Данный принцип управления можно выразить как:

$$P_{ДЭС} = P_H - P_{ВИЭ} \text{ (при } P_{ВИЭ} \leq P_H),$$

где  $P_{ДЭС}$  – мощность ДЭС, необходимая;  $P_{ВИЭ}$  – совокупная развиваемая мощность источников энергии на возобновляемых энергоресурсах;  $P_H$  – текущая мощность нагрузки.

При  $P_{ВИЭ} > P_H$  избыток вырабатываемой энергии может обеспечивать заряд аккумуляторных батарей (АБ), либо рассеиваться на балластном сопротивлении (нагревательный элемент). Так как мощность, вырабатываемая возобновляемыми энергоисточниками, покрывает текущие потребности в электрической энергии, дизель-генератор будет работать на холостом ходу ( $P_{ДЭС} = 0$ ), либо находится в «горячем резерве» и работать в наиболее экономичном режиме на минимальных устойчивых оборотах, либо отключаться.

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. Предложенная модель реализована в виде программного комплекса «PSS.exe», связанного с базой данных. Динамически обновляемая база данных установок позволяет уточнять функции, входящие в целевую функцию и таким образом улучшать предсказательную силу модели.

Разработанный программный комплекс «PSS.exe» 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.

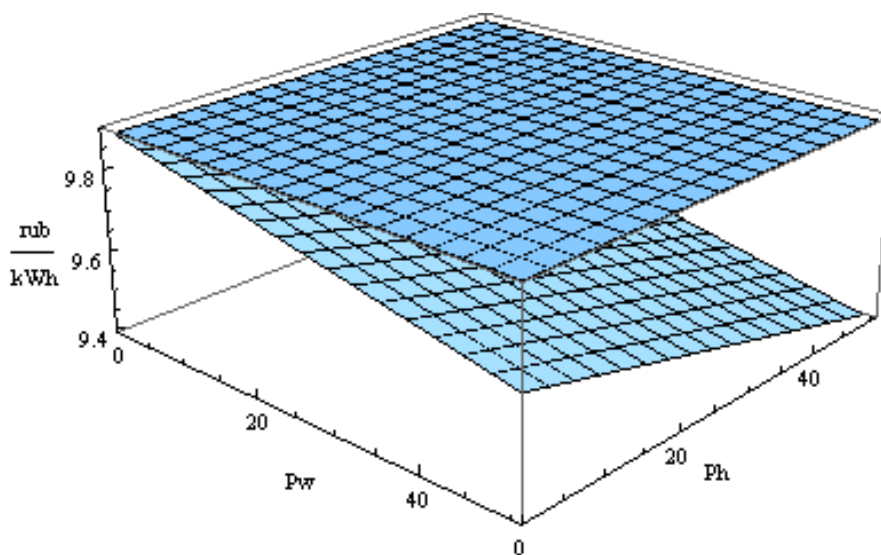
В рамках исследовательской работы был проведен анализ потенциальных площадок внедрения гибридных автономных комплексов электроснабжения, который включает оценку технического потенциала ветровых ресурсов, водных и гелиоресурсов, уровни экономически обоснованных тарифов в изолированных энергоузлах, подбор основного оборудования гибридных АКЭС. На рисунке 5 представлен пример расчета себестоимости электроэнергии для автономного комплекса электроснабжения с сельскохозяйственным графиком нагрузки, состоящего из ДЭС, ВЭС и микроГЭС. Мощность нагрузки (максимальная)  $P_H = 100$  кВт.

В данной статье предложена методика определения оптимального состава АКЭС, основанная на нелинейной задаче оптимизации. Определена целевая функция и показано, как осуществляется переход от дискретной задачи оптимизации к непрерывной. В качестве примера обработки данных по установкам, использующим ВИЭ, приводятся основные характеристические функции модели: ценовая характеристика ВЭС в диапазоне до 40кВт, усредненная зависимость вырабатываемой мощности от скорости ветра. Приведен пример графика целевой функции для трехкомпонентного АКЭС.

Необходимость проведения данного исследования продиктована как растущей стоимостью дизельного топлива с одной стороны, так и увеличивающимся износом оборудования дизельных электростанций с другой стороны. Данные проблемы вынуждают удаленные насе-

ленные пункты искать альтернативные методы энергоснабжения. В течение последних лет, для снижения потребления дизельного топлива, все чаще используется энергия ветра, обеспечивающая экономические, экологические и социальные преимущества, а также большую безопасность энергоснабжения населенных пунктов. С учетом недавних поправок в ФЗ «Об электроэнергетике», касающихся системной поддержки ВИЭ, исследование особенно актуально. Результаты подтверждают, что развитие ветроэнергетики и накопленный опыт в сфере использования гибридных автономных комплексов электроснабжения вкупе с другими отработанными технологиями повышения энергоэффективности могут решить ряд технических вопросов и способствовать достижению высокой экономической эффективности. Это в свою очередь, делает возможным снижение тарифов на электро- и теплоэнергию в полтора-два раза, что ощутимо для населения и промышленных предприятий удаленных регионов РФ».

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).



**Рисунок 5.** Себестоимость электроэнергии для гибридного АКЭС (ДЭС+ВЭС+микроГЭС), где  $P_w$  – установленная мощность ВЭС,  $P_h$  – установленная мощность

## 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. Лукутин Б.В., Муравлев А.И. Режимы работы асинхронного генератора ветроустановки // Известия вузов. Проблемы энергетики, 2008 - т. 1, - № 7-8/1. - с. 164-170
3. Лукутин Б. В. , Сарсикеев Е. Ж. Методика исследования динамических характеристик ветрогенераторов // Научно-технический вестник Поволжья. - 2011 - №. 1 - С. 140-143
4. Каталог ветрогенераторов [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://inventory.ru/category/vetogenerator/>, свободный. Дата обращения: 03.03.2012.
5. Сурков М. А., Лукутин Б. В., Коновалова Л. П. Эффективность децентрализованного электроснабжения Томской области с использованием энергии ветра // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета, 2007. - т. - № 2. - с. 35-39
6. 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
7. 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
8. Nehrir, M.H.; Wang, C.; Strunz, K.; Aki, H.; Ramakumar, R.; Bing, J.; Miao, Z.; Salameh, Z. A Review of Hybrid Renewable/Alternative Energy Systems for Electric Power Generation: Configurations, Control, and Applications // IEEE Transactions on Sustainable Energy. – 2011 – Volume: 2 , Issue: 4 – pp.392-403
9. Haruni, A.M.O.; Gargoom, A.; Haque, M.E.; Negnevitsky, M. Dynamic operation and control of a hybrid wind-diesel stand alone power systems // Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE – 2010 – pp.162-169