

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт  
институт  
Электрические станции и электроэнергетические системы  
кафедра

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
I.V. Коваленко  
подпись инициалы, фамилия  
« 5 » 06 2017 г.

## АВТОРЕФЕРАТ

магистерской диссертации

«Оценка и обеспечение надежности сетевых ветроэлектрических станций»  
Утверждена приказом по университету № 17046/с от 10.11.2015

Направление 13.04.02 – Электроэнергетика и электротехника  
Программа 13.04.02.02 – Электроэнергетические системы, сети, линии  
электропередачи, их режимы устойчивость и надежность

Научный руководитель



подпись, дата

к.т.н., профессор

должность, ученая степень

V.A. Тремясов

инициалы, фамилия

Выпускник

подпись, дата

Е.И. Чистякова

инициалы, фамилия

Красноярск 2017

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Магистерская диссертация на тему «Оценка и обеспечение надежности сетевых ветроэлектрических станций» содержит 29 рисунков, 21 таблицу, 2 приложения, 56 использованных источников и выполнена на 71 странице.

**Актуальность** исследования связана с ожидаемым исчерпанием традиционных источников углеводородного сырья, которые на сегодняшний день используются как основные первичные источники энергии.

На сегодняшний день, важным условием экономического развития общества является рациональное использование и экономия топливно-энергетических ресурсов страны. Для части огромной территории Российской Федерации, характерно децентрализованное электроснабжение, которое представлено дизельными электростанциями (ДЭС), работающими на привозном дизельном топливе. Анализ литературы, посвященной изучению ветрового режима РФ, свидетельствует, что именно в этих частях нашей страны расположены энергетические ветровые зоны. Поэтому именно такие области стоит рассматривать, как самые перспективные для размещения сетевых ветроэлектрических станций (ВЭС) работающих параллельно с электроэнергетической системой (ЭЭС), с целью обеспечения бесперебойного покрытия требуемого потребления электроэнергией, генерируемой ветром. Следовательно, их внедрение не только снизит все возрастающие темпы истощения топливно-сырьевой базы, но и окажет благоприятное влияние на состояние окружающей среды, а так же позволит располагать ВЭС в выгодных местах и по максимуму использовать энергию ветра.

**Предмет исследования:** анализ надежности сетевой ветроэлектрической станции.

**Целью** настоящей работы является построение математической модели для оценки и обеспечения надежности ветропарков, объединенных с ЭЭС.

В работе были решены следующие основные задачи:

- дана оценка перспективе развития работы ветроустановки (ВЭУ) в составе ветропарков;
- выбрана схема подключения ВЭУ к сети;
- дана оценка возможности параллельной работы ВЭС и ЭЭС;
- разработаны вероятностные модели надежности систем;
- определена оценка оптимальной периодичности профилактического обслуживания ВЭУ;
- разработано программное обеспечение для оценки надежности параллельной работы ветропарка с традиционной энергосистемой;
- определен потенциал возобновляемого энергоресурса (ветра) в Приморском крае;
- выбрана принципиальная площадка для строительства ВЭС на Юге Приморья;
- дана оценка обеспечения надежной работы ВЭУ в составе единой энергетической системы России (ЕЭС).

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

- разработаны вероятностные модели надежности ВЭС и объединения с ЭЭС;
- создано программное обеспечение для оценки надежности параллельной работы ветропарка с традиционной энергосистемой.

**Структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений, списка литературы (56 источников) и двух приложений.

В **аннотации** кратко отображено содержание диссертации, формулируются цель и задачи диссертации.

Во **введении** обосновывается выбор темы и актуальность проблемы исследования, определяется научная новизна, теоретическая значимость и практическая ценность.

В **первой главе** «Состояние и перспективы энергетики на базе ветровых ресурсов» производится обзор литературы по рассматриваемой проблеме, анализируется динамика развития энергетики на базе ВЭУ в России и в мире.

Согласно данным отчета Европейской ассоциации ветроэнергетики за 2015 год в 28 странах Европейского союза (ЕС), среди всех новых установленных мощностей в энергетике 44,2 % приходилось на ветер, в общей сумме подключено к сети 12,8 ГВт, где 9,766 ГВт – это суммарная мощность установок расположенных на суше и 3,034 ГВт – оффшорные установки. Увеличение количества ветровых установок по сравнению с 2014 годом составило 6,3 %. Общий объем ветровой энергетики в ЕС составляет 142 ГВт, а это 11,4 % всех потребностей в энергии. В том же отчете сообщается, что, несмотря на рост мировой экономики, в 2015 году концентрация СО<sub>2</sub> в атмосфере осталась неизменной по сравнению с 2014 годом.

На сегодняшний день, несмотря на наличие значительных ресурсов ветровой энергии, в России имеет место существенное отставание от мирового уровня, это отражается в том, что 70 % территории нашей страны, где проживает 10 % населения, находится в зоне децентрализованного энергоснабжения, то есть в зоне потенциальных ветроресурсов.

Оценка перспективы развития работы ВЭУ в составе ветропарков напрямую зависит от скорости ветра. Как видно из рисунка 1, скорость ветра величина непостоянная, следовательно, и генератор будет работать не равномерно, поэтому пульсации мощности единичной установки должны сглаживаться большим количеством агрегатов.

Рассматриваются схемы подключения ВЭУ к сети и требования по оценке возможности параллельной работы ВЭС и ЭЭС.

При работе ВЭС параллельно с сетью степень взаимного влияния ВЭУ друг на друга определяется мощностью сети и оказывает влияние на качество электроэнергии, загрузку сетей (технические границы), загрузку сетей при коротких замыканиях и баланс мощностей и энергий. Для поддержания стабильности работы системы и параметров частоты и напряжения в сети энергоснабжения по исследованиям, проведенным английским университетом

*ETSU* и опыт Дании, говорят о том, что общая установленная мощность ВЭУ не должна превышать 10 – 20 % мощности энергосистемы, в противном случае возникает проблема сохранения устойчивой работы.

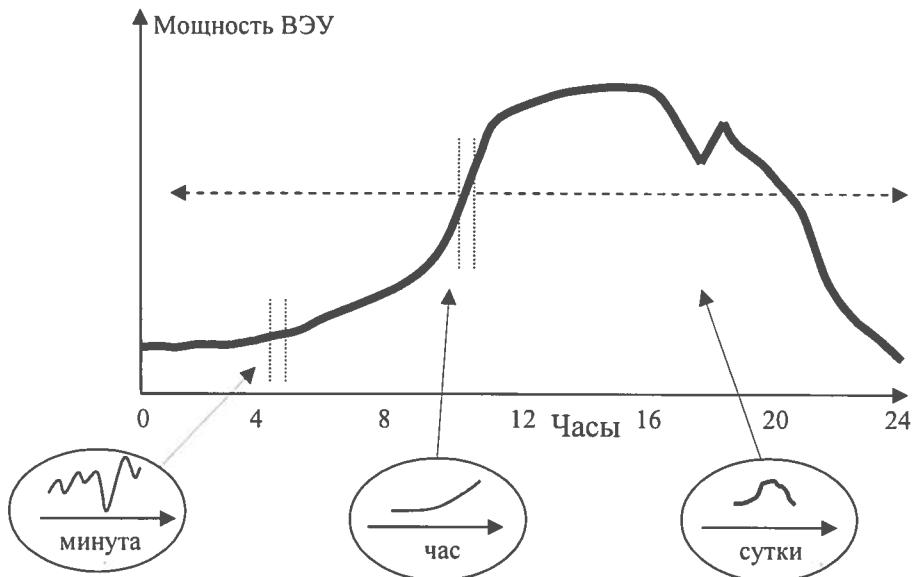


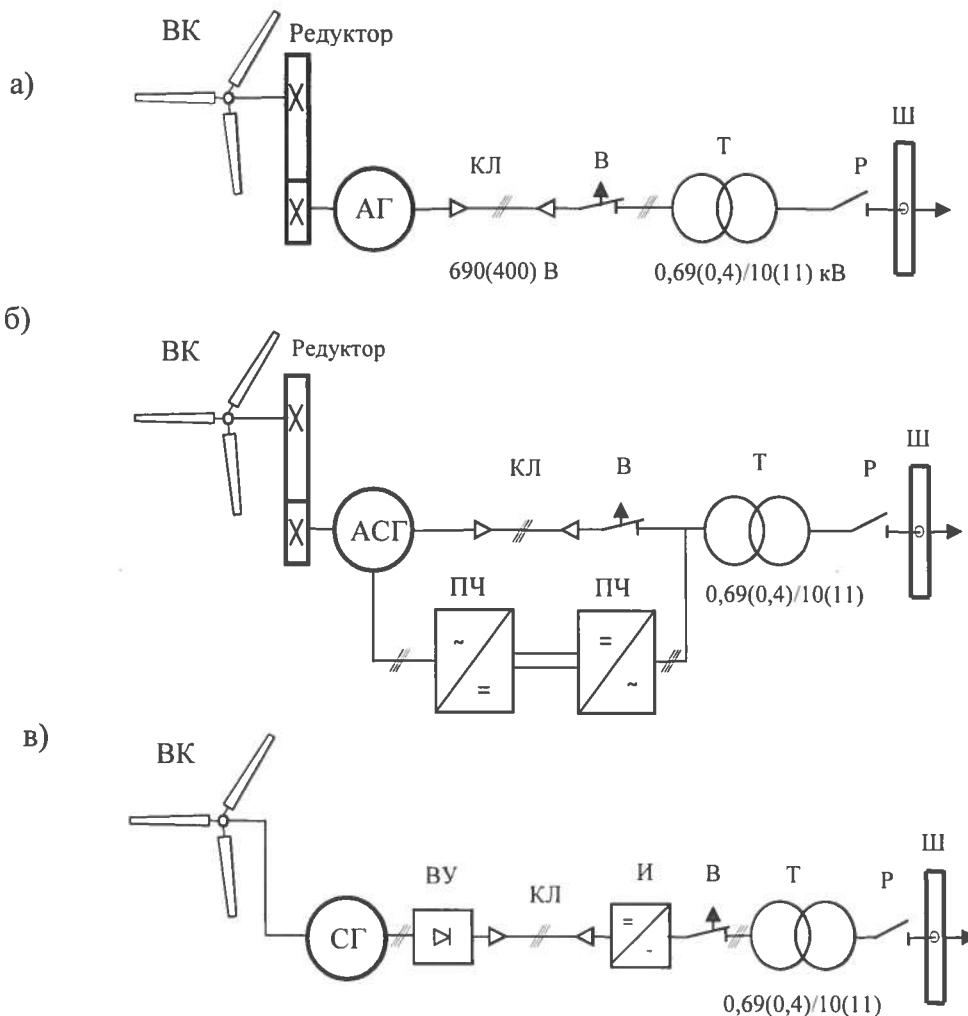
Рисунок 1 – Колебания мощности ВЭУ

Так же было выделено три основных схемы подключения ВЭУ к сети представленных на рисунке 2.

Так на ВЭУ постоянной скорости применяются асинхронные генераторы (АГ) с короткозамкнутым ротором (рисунок 2, а), он характеризуется постоянством скорости вращения ветроколеса, что с точки зрения использования энергии ветра является не оптимальным. На ВЭУ переменной скорости используются асинхронизированные синхронные генераторы (АСГ) (рисунок 2, б), то есть через щеточные устройства соединяют обмотки ротора двигателя с пусковыми сопротивлениями. При постоянном напряжении статора двигателя меняя величину пускового сопротивления включенного в обмотки ротора, можно изменить скорость вращения генератора. На рисунке 2, в, ВЭУ переменной скорости – кольцевые синхронные генераторы (СГ) совместно с преобразователем по схеме переменная частота, переменное напряжение – стабилизированное напряжение, фиксированная частота. Это означает, что ветроустановка может участвовать в регулировании напряжения сети в точке присоединения ВЭУ к энергосистеме.

Во второй главе «Вероятностные модели надежности энергосистем с ветроэлектрическими станциями» рассматриваются показатели надежности энергосистемы и ветропарка, а так же разрабатываются их вероятностные модели, которые в свою очередь позволят дать оценку оптимальной периодичности профилактического обслуживания ВЭУ, с целью сокращения ущерба от аварий.

Оценка надежности ВЭУ необходима для более точного определения ее выработки электроэнергии, так как по причине отказа основных узлов, ВЭУ вырабатывает электроэнергии меньше расчетного количества.



ВК - ветроколесо; АГ – асинхронный генератор с короткозамкнутым ротором; АСГ – асинхронизированный синхронный генератор; СГ – синхронный генератор; ВУ - выпрямительная установка; КЛ - кабельная линия; И - инвертор; В - выключатель; Т - трансформатор; Р - разъединитель; ПЧ - преобразователь частоты; Ш - шина.

Рисунок 2 – Структурные схемы подключения ВЭУ к сети

Наиболее простой путь для вычисления надежности объединенных систем состоит в том, чтобы рассматривать их как одну систему. Каждый узел ЭЭС, объединенной энергосистемы (ОЭС) и ЕЭС можно моделировать как концентрированную энергосистему. Связи между узлами энергосистем, как и связи между системами, представляют собой группу одноцепных или двухцепных линий электропередач (ЛЭП). Из теории надежности известно, что одноцепная ЛЭП моделируется двумя состояниями: нормальной работы и простоя. Вероятность состояния простоя  $q = \lambda \cdot \tau$ , где  $\lambda$  – параметр потока отключений (аварийных и профилактических),  $\text{год}^{-1}$ ;  $\tau$  – средняя продолжительность одного отключения, год. Вероятность нормальной работы с

номинальной пропускной способностью  $C$  равна  $p = 1 - q$ . В случае двух цепей, связь представленная в таблице 1 моделируется четырьмя состояниями с различными пропускными способностями  $C(i)$  и вероятностями  $P[C(i)]$ .

Таблица 1 – Модель надежности связи между ЭЭС

$i$	$C(i)$	$P[C(i)]$
1	0	$q_1 \cdot q_2$
2	$C_1$	$p_1 \cdot q_2$
3	$C_2$	$p_2 \cdot q_1$
4	$C_1 + C_2$	$p_1 \cdot p_2$

На примере ветропарка рассмотрим группу, состоящую из  $n$  одинаковых по номинальной мощности  $N$  и показателем надежности генерирующих блоков. Вероятность просто  $m$  блоков из  $n$  определяется по формуле биномиального закона:

$$P_n^m = C_n^m p^m q^{(n-m)}, \quad (1)$$

где  $C_n^m = [n! \times (n-m)!] / [m!]$ .

Применение формулы Бернулли при больших значениях  $n$  приводит к произведению очень больших ( $n!$ ) и очень малых чисел ( $p^m$  и  $q^{(n-m)}$ ), что плохо с вычислительной точки зрения. Поэтому рассмотрим ситуацию, где число блоков  $n$  в схеме Бернулли неограниченно увеличивается, а вероятность наступления события  $q$  в каждом блоке стремится к нулю таким образом, что произведение  $pq$  остается величиной постоянной (среднее число простаивающих агрегатов), которую обозначим  $a = pq$ , тогда воспользуемся приближенной асимптотической формулой Пуассона:

$$P_n^m = [a^m \exp(-a)] / [m!], \quad (2)$$

Если принять, что при  $k$ -м снижении располагаемой мощности мощность простаивающих  $k$  агрегатов из  $n$  составляет  $X(k) = kN$ , то располагаемая мощность  $Y(k) = (n-k)N$ , а вероятность  $k$ -го снижения мощности определяется по формуле:

$$P(k) = P_n^k = [a^k \exp(-a)] / [k!]. \quad (3)$$

При объединении двух систем  $A$  и  $B$  с помощью связи  $C$  образуется единая система  $U$ . На всем множестве значений  $S_A(k)$ ,  $S_B(j)$  и  $C(i)$ , где  $S_A(k)$  и  $S_B(j)$  – множество значений мощности для систем  $A$  и  $B$  соответственно,  $C(i)$  – множество значений пропускной способности ЛЭП, задаются распределения вероятностей состояний с избытком мощности для систем  $A$  –  $P[S_A(k)]$ ,  $B$  –  $P[S_B(j)]$  и пропускной способностью ЛЭП  $P[C(i)]$ . Множество состояний системы  $U$  со своими значениями избытка мощности  $S(U)$  образуются с

помощью матриц размером  $n_A \times n_B$ , где  $n_A$  и  $n_B$  – числа состояний. Число матриц  $n_A \times n_B$  равно числу состояний  $C$ .

Правила определения  $S(U)$  при различных сочетаниях  $S_A(k)$ ,  $S_B(j)$  и  $C(i)$  следующие:

- 1) если  $S_A(k) \geq 0$  и  $S_B(j) \geq 0$ , то  $S(U) = S_A(k) + S_B(j)$ ;
- 2) если  $S_A(k) \leq 0$  и  $S_B(j) \leq 0$ , то  $S(U) = S_A(k) + S_B(j)$ ;
- 3) если  $S_A(k) > C(i)$ ,  $S_B(j) < 0$ ,  $|S_B(j)| \leq C(i)|$ , то  $S(U) = S_A(k) + S_B(j)$ ;
- 4) если  $S_B(j) > C(i)$ ,  $S_A(k) < 0$ ,  $|S_A(k)| \leq C(i)|$ , то  $S(U) = S_A(k) + S_B(j)$ ;
- 5) если  $S_A(k) > C(i)$ ,  $S_B(j) < 0$ ,  $|S_B(j)| \geq C(i)$ , то  $S(U) = S_B(j) + C(i)$ ;
- 6) если  $S_B(j) > C(i)$ ,  $S_A(k) < 0$ ,  $|S_A(k)| \geq C(i)$ , то  $S(U) = S_A(k) + C(i)$ ;
- 7) если  $S_A(k) > 0$ ,  $S_B(j) < 0$ ,  $|S_A(k)| \leq C(i)$ , то  $S(U) = S_A(k) + S_B(j)$ .

Вычисление вероятностей значений  $S(U)$  производится по формуле:

$$P(S(U)) = \sum_{k=1}^{n_S} \sum_{j=1}^{n_S} \sum_{i=1}^{n_S} [P(S_A(k))P(S_B(j))P(C(i))] B(k, j, i, u), \quad (4)$$

$$B(k, j, i, u) = \begin{cases} 1, & \text{если } S(k, j, i) = S(U) \\ 0, & \text{если } S(k, j, i) \neq S(U) \end{cases}. \quad (5)$$

где  $S(k, j, i)$  – элемент матрицы  $i$  на пересечении  $k$ -й строки и  $j$ -го столбца.

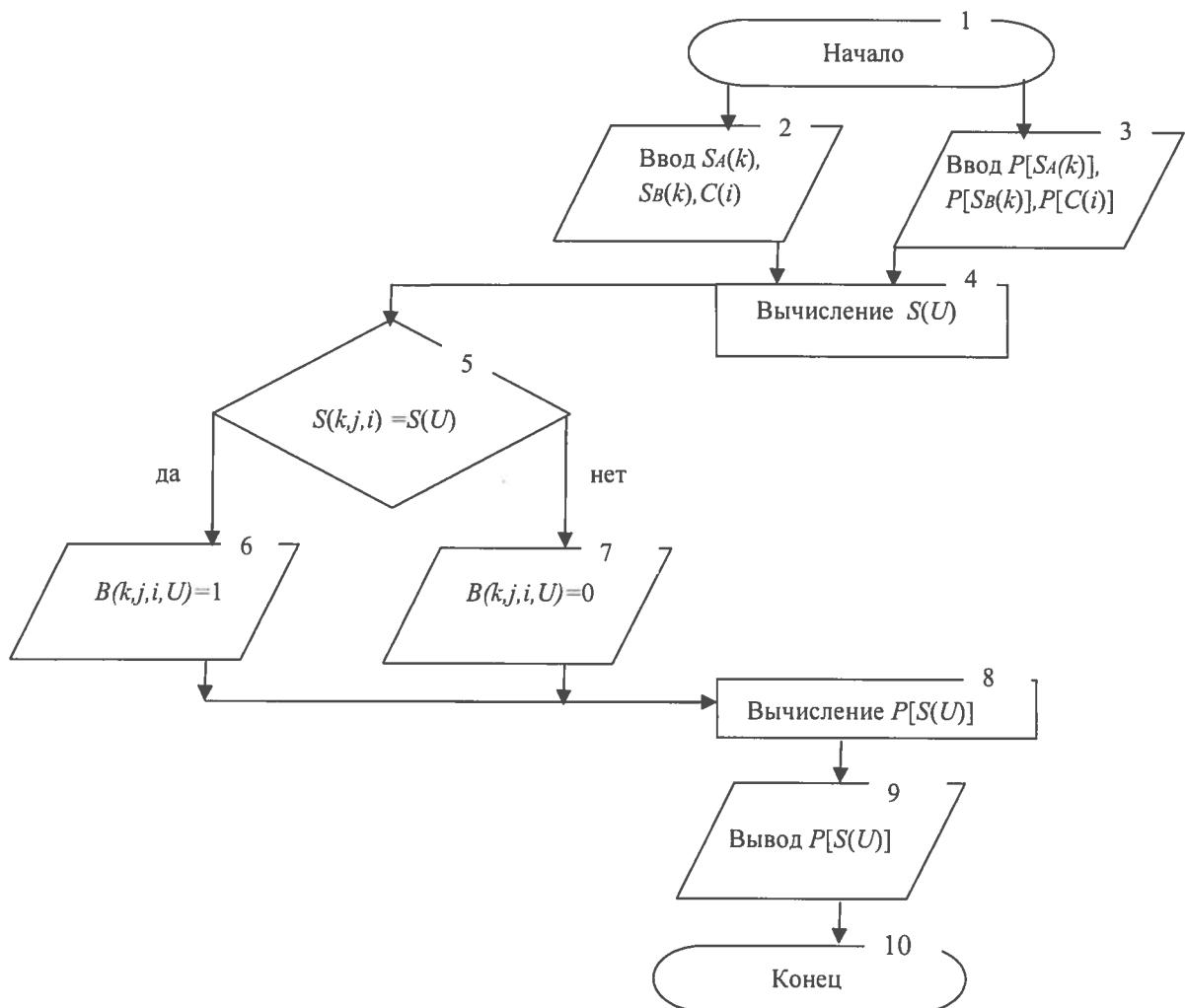
Если предположить отсутствие ограничения по пропускной способности межсистемной связи, то можно показать, что объединение ЭЭС снижает недоотпуск энергии при любых сочетаниях ЭЭС: избыточной с избыточной; избыточной с дефицитной; двух дефицитных; двух сбалансированных.

В третьей главе «Разработка алгоритма и компьютерной программы для оценки надежности объединения ветропарка и энергосистемы» на основании ранее описанной вероятностных моделей надежности, было разработано программное обеспечение для оценки надежности объединения двух энергосистем. Для реализации программного продукта применима любая операционная система, среда исполнения: веб-браузер.

Алгоритм программы приведен на рисунке 3.

Для начала, все введенные пользователем значения заносятся в массивы переменных  $S_A(k)$ ,  $S_B(j)$ ,  $C(i)$ ,  $P[S_A(k)]$ ,  $P[S_B(j)]$  и  $P[C(i)]$ . Размерность массивов значений вероятностей для каждой энергосистемы соблюдаются, индексы массивов соответствуют друг другу, поэтому каждому элементу массива значений состояний соответствует каждый элемент массива вероятностей. Затем для каждого элемента массива  $C(i)$  с использованием циклического оператора *for* происходит формирование матрицы состояния системы  $U$  с учетом пропускной способности межсистемной ЛЭП и с учетом дефицита или избытка мощности в каждой из энергосистем. Программа формирует матрицы последовательно – построчно, слева направо и сверху вниз. При вычислении результата состояния  $S(U)$  сразу же происходит проверка на соответствие

целевому значению  $S(U)$ , введенному пользователем. Если значения совпадают, программа берет произведение соответствующих значений вероятностей  $P[S_A(k)]$ ,  $P[S_B(j)]$ ,  $P[C(i)]$  и прибавляет к нему уже существующее значение  $P[S(U)]$ , хранящееся в переменной  $f_{res}$ .



1 – ввод количества значений  $S_A(k)$ ,  $S_B(j)$  и  $C(i)$ , обработка, проверка исходных данных; 2 – ввод значений множеств избытка мощности систем  $S_A(k)$ ,  $S_B(j)$  и пропускной способности ЛЭП  $C(i)$ ; 3 – ввод значения множеств распределения вероятности избытка мощностей систем  $S_A(k)$ ,  $S_B(j)$  и пропускной способности ЛЭП  $C(i)$ ; 4 – вычисление значения избытка мощности единой системы  $U$ ; 5 – проверка на соответствие целевому значению  $S(U)$ ; 6 – определение  $B(k,j,i,U)=1$ ; 7 – определение  $B(k,j,i,U)=0$ ; 8 – вычисление значения вероятности целевой функции; 9 – вывод  $P[S(U)]$ ; 10 – вывод значения целевой функции.

Рисунок 3 – Алгоритм работы компьютерной программы

После построения всех матриц и проверки всех значений, в данной переменной будет находиться результат вычислений, соответствующий формуле (4). Также, по ходу вычислений, текущие вычисления записываются подобным образом в текстовую переменную  $d\_text$ , вывод которой обеспечивает наглядность

вычислений. Если результат вычислений в матрице  $S(U)$  и целевое значение, введенное пользователем, совпадают, то результат вычислений в таблице выделяется розовым фоновым цветом для обеспечения наглядности.

В качестве результатов на экран выводятся матрицы значений состояний системы  $S(U)$  для каждого из состояний пропускной способности межсистемной ЛЭП, а также выводится расчет параметра  $P[S(U)]$  с ходом вычислений.

Количество состояний не ограничено и ограничивается лишь скоростью выполнения программы. На современных компьютерах и мощных процессорах программа способна в считанные секунды производить расчет и выводить на экран тысячи таблиц с десятками тысяч состояний системы.

**Четвертая глава** «Оценка надежности сетевой ВЭС в составе энергосистемы» посвящена внедрению разработанной модели в энергосистему Приморского края (рисунок 4), для оптимизации дефицита мощности в ЭЭС, сокращению затрат на привозное дизельное топливо и уменьшение выбросов в атмосферу веществ продуктов горения.

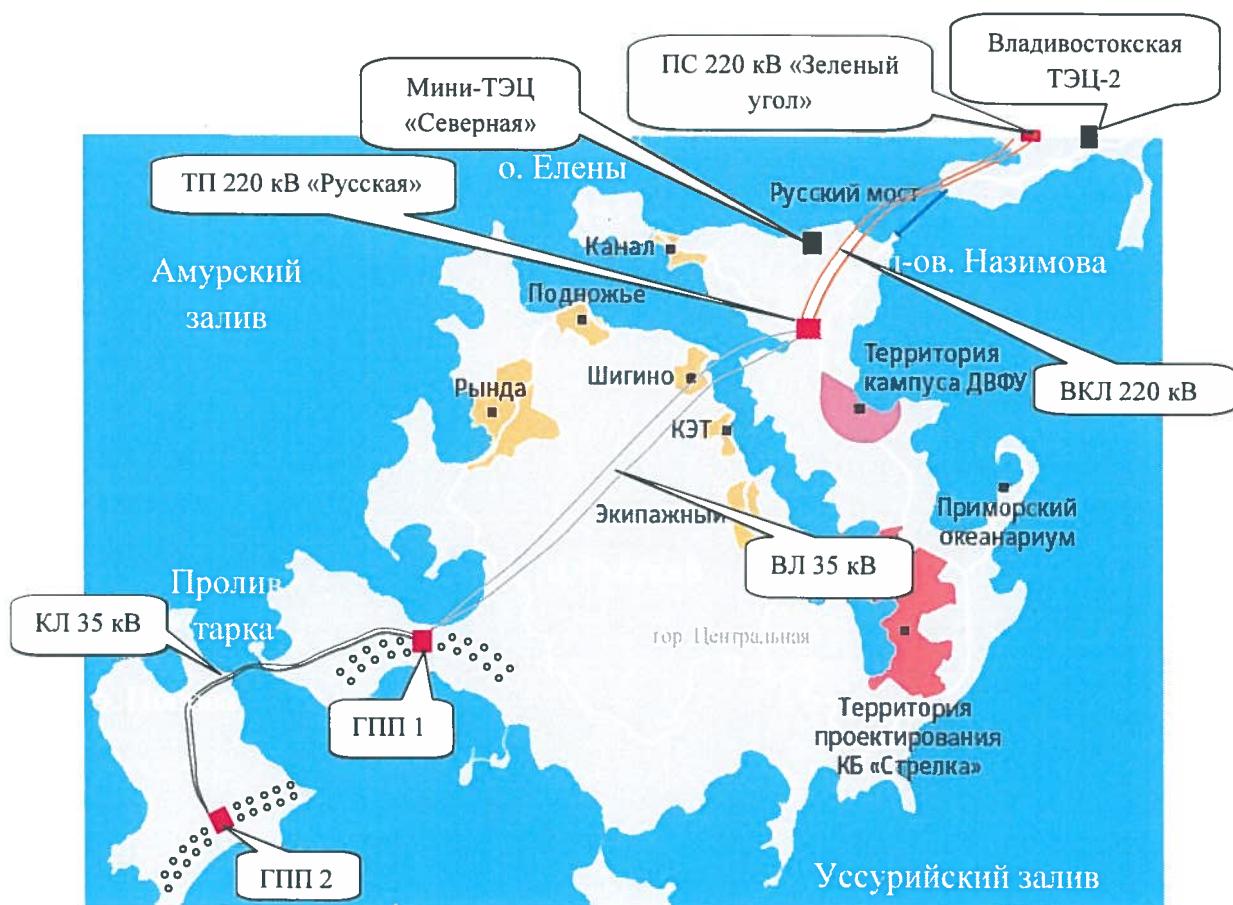


Рисунок 4 – Модель объединения ВЭС с ЭЭС Приморского края

Предпосылками строительства ВЭС на территории о. Русский и о. Попова являются следующие факторы:

- дефицит генерирующих мощностей Юга Приморья;
- выбросы продуктов горения, таких предприятий, как мини-ТЭЦ «Северная» и Владивостокская ТЭЦ-2;
- недостаточность пропускной способности сети в сечениях Хабаровская – Приморская энергосистема и Приморская ГРЭС – юг Приморья;
- износ оборудования, требующий капитальных вложений в реконструкцию.

На рисунке 5 представим расчетную схему электрической сети с ВЭС.

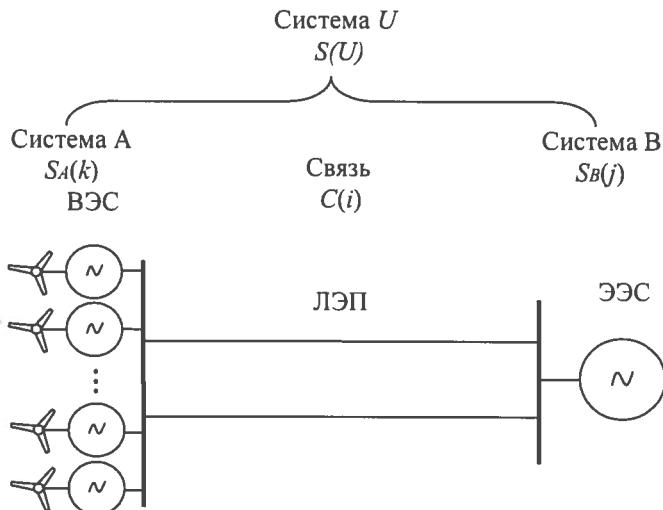


Рисунок 5 – Расчетная схема электрической сети с ВЭС

В состав Дальневосточной ВЭС входят 20 ВЭУ единичной номинальной мощностью по 1,75 МВт, на о. Русский и 20 ВЭУ единичной номинальной мощностью по 1,75 МВт, на о. Попова (суммарная установленная мощность ВЭС 70 МВт), с вероятностью простоя одной установки  $q_{\text{вэу}} = 0,045$ , вероятностью работоспособного состояния  $p_{\text{вэу}} = 1 - q_{\text{вэу}} = 1 - 0,045 = 0,955$ . Суммарная мощность ЭЭС Приморского края 2700 МВт, 9 блоков по 300 МВт, с постоянной величиной нагрузки  $L_B(j) = 1800$  МВт. Вероятность простоя блока  $q_{\text{бл}} = 0,05$ . Объединение ВЭС и ЭЭС осуществляется по двум ЛЭП 220 кВ от главной повышающей подстанции (ГПП) ВЭС до точки подключения ВЭС к системе (ПС 220 кВ «Русский»). Интенсивность отказов ЛЭП  $\lambda = 0,34 \text{ год}^{-1}$ , а среднее время восстановления ЛЭП  $\tau = 0,002$  год. В соответствии с моделью надежности связи между ЭЭС, представленной в таблице 2.2, пропускная способность двухцепной ЛЭП связывающей системы:  $C_1=150$  МВт с вероятностью простоя  $P_1=0,004$ ;  $C_1=300$  МВт с вероятностью простоя  $P_2=0,996$ .

Оценка надежности ВЭС была произведена по разработанному алгоритму компьютерной программы.

Согласно модели надежности генерирования электроэнергии, в таблице 2 – 3 представим расчет вероятности снижения мощности приставающих агрегатов Дальневосточной ВЭС и ЭЭС Приморского края соответственно.

Таблица 2 – Распределение  $P[Y(k)]$

$k$	0	1	2	3	4
$Y(k)$	70	68,25	66,5	64,75	63
$P[Y(k)]$	10	8,25	6,5	4,75	3,0
$k$	5	6	7	8	9
$Y(k)$	61,25	59,5	57,75	56	54,25
$P[Y(k)]$	1,25	-0,5	-2,25	-4,0	-5,75

Таблица 3 – Распределение  $P[Y(j)]$

$j$	0	1	2	3	4
$Y(j)$	2700	2400	2100	1800	1500
$P[Y(j)]$	0,677	0,270	0,0547	$7,38 \cdot 10^{-3}$	$7,48 \cdot 10^{-4}$
$j$	5	6	7	8	9
$Y(j)$	1200	900	600	300	0
$P[Y(j)]$	$6,06 \cdot 10^{-5}$	$4,09 \cdot 10^{-6}$	$2,37 \cdot 10^{-7}$	$1,20 \cdot 10^{-8}$	$5,39 \cdot 10^{-10}$

Далее при учете нагрузки систем, определим вероятность распределения значения избытка мощностей Дальневосточной ВЭС и ЭЭС Приморского края. Результаты расчета представим в таблице 4 – 7.

Таблица 4 – Матрица значений мощностей Дальневосточной ВЭС, МВт

$Y(k)$	$L_A(j)$	60
52,5		-7,5
54,25		-5,75
56		-4,0
57,75		-2,25
59,5		-0,5
61,25		1,25
63		3,0
64,75		4,75
66,5		6,5
68,25		8,25
70		10

Таблица 5 – Распределение вероятностей состояний Дальневосточной ВЭС

$S_A(k)$	$P[S_A(k)]$
-7,5	$4,45 \cdot 10^{-8}$
-5,75	$5,16 \cdot 10^{-13}$
-4,0	$2,93 \cdot 10^{-8}$
-2,25	$1,87 \cdot 10^{-6}$
-0,5	$2,24 \cdot 10^{-5}$
1,25	$5,38 \cdot 10^{-3}$
3,0	0,0330
4,75	0,0781
6,5	0,146
8,25	0,170
10	0,210

Максимальный резерв  $R_{max} = 10$  МВт и составляет 14 % от установленной мощности. Математическое ожидание дефицита мощности:

$$M[D] = \sum_{i=1}^5 P(D(i))D(i) = 7,5 \cdot 4,45 \cdot 10^{-8} + 5,75 \cdot 5,16 \cdot 10^{-13} + 4,0 \cdot 2,93 \cdot 10^{-8} + 2,25 \cdot 1,87 \cdot 10^{-6} + 0,5 \cdot 2,24 \cdot 10^{-5} = 1,58 \cdot 10^{-5} \text{ МВт.}$$

Среднегодовой недоотпуск энергии:

$$\Delta W = 8760 \cdot M[D] = 8760 \cdot 1,58 \cdot 10^{-5} = 0,138 \text{ МВт} \cdot \text{ч.}$$

Таблица 6 – Матрица значений мощностей ЭЭС Приморского края, МВт

$Y(j)$	$L_B(j)$	1800
300		-1500
600		-1200
900		-900
1200		-600
1500		-300
1800		0
2100		300
2400		600
2700		900

Таблица 7 – Распределение вероятностей состояний ЭЭС Приморского края

$S_B(j)$	$P[S_B(j)]$
-1500	$1,20 \cdot 10^{-8}$
-1200	$2,37 \cdot 10^{-7}$
-900	$4,09 \cdot 10^{-6}$
-600	$6,06 \cdot 10^{-5}$
-300	$7,48 \cdot 10^{-4}$
0	$7,38 \cdot 10^{-3}$
300	0,0547
600	0,270
900	0,667

Максимальный резерв  $R_{max} = 900$  МВт, тогда математическое ожидание дефицита мощности:

$$M[D] = \sum_{i=1}^5 P(D(i))D(i) = 1500 \cdot 1,20 \cdot 10^{-8} + 1200 \cdot 2,37 \cdot 10^{-7} + 900 \cdot 4,09 \cdot 10^{-6} + 600 \cdot 6,06 \cdot 10^{-5} + 300 \cdot 7,48 \cdot 10^{-4} = 0,265 \text{ МВт.}$$

Среднегодовой недоотпуск энергии:

$$\Delta W = 8760 \cdot M[D] = 8760 \cdot 0,265 = 2321,4 \text{ МВт} \cdot \text{ч.}$$

Все этапы расчета, представленные на рисунках 6 – 8.

I. Ввод количества значений  $S_A(k)$ ,  $S_B(j)$  и  $C(i)$  (рисунок 6).

II. Ввод значений множеств избытка мощностей систем  $S_A(k)$ ,  $S_B(j)$  и пропускной способности ЛЭП  $C(i)$  и соответствующих вероятностей  $P[S_A(k)]$ ,  $P[S_B(j)]$ ,  $P[C(i)]$  (рисунок 7). Целевое значение мощности объединенной системы  $S(U) = 303$  МВт.

III. Расчет надежности и вывод результатов вычислений программы (рисунок 8).

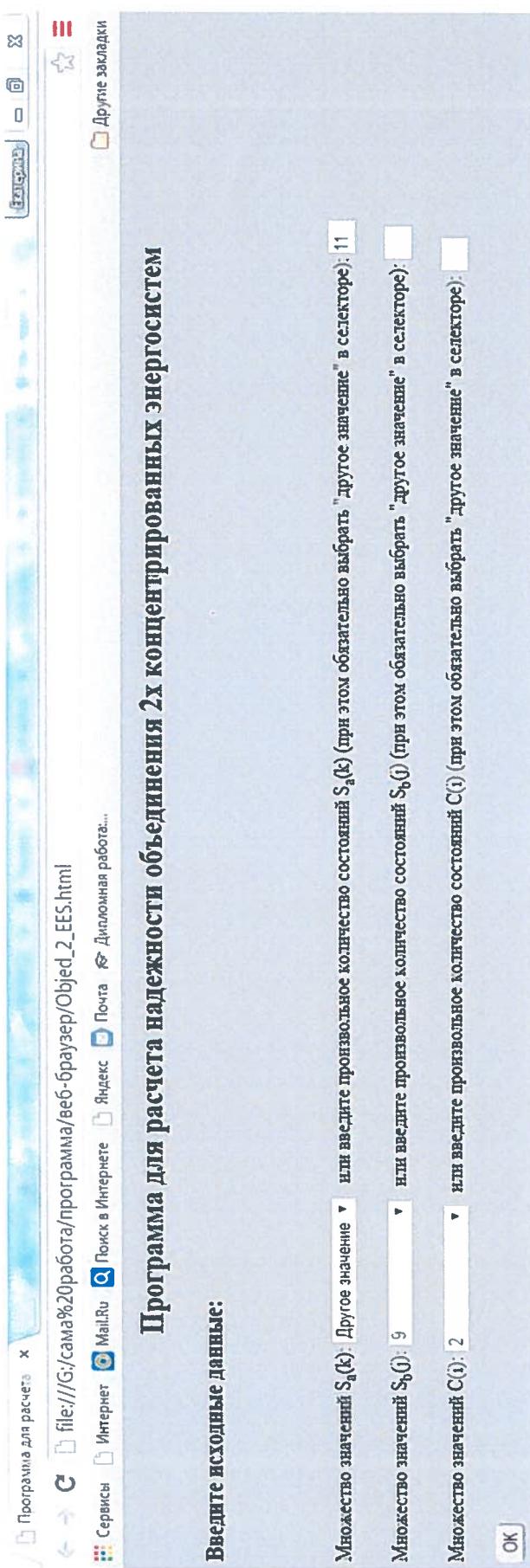


Рисунок 6 – Оконный интерфейс первого этапа работы программы

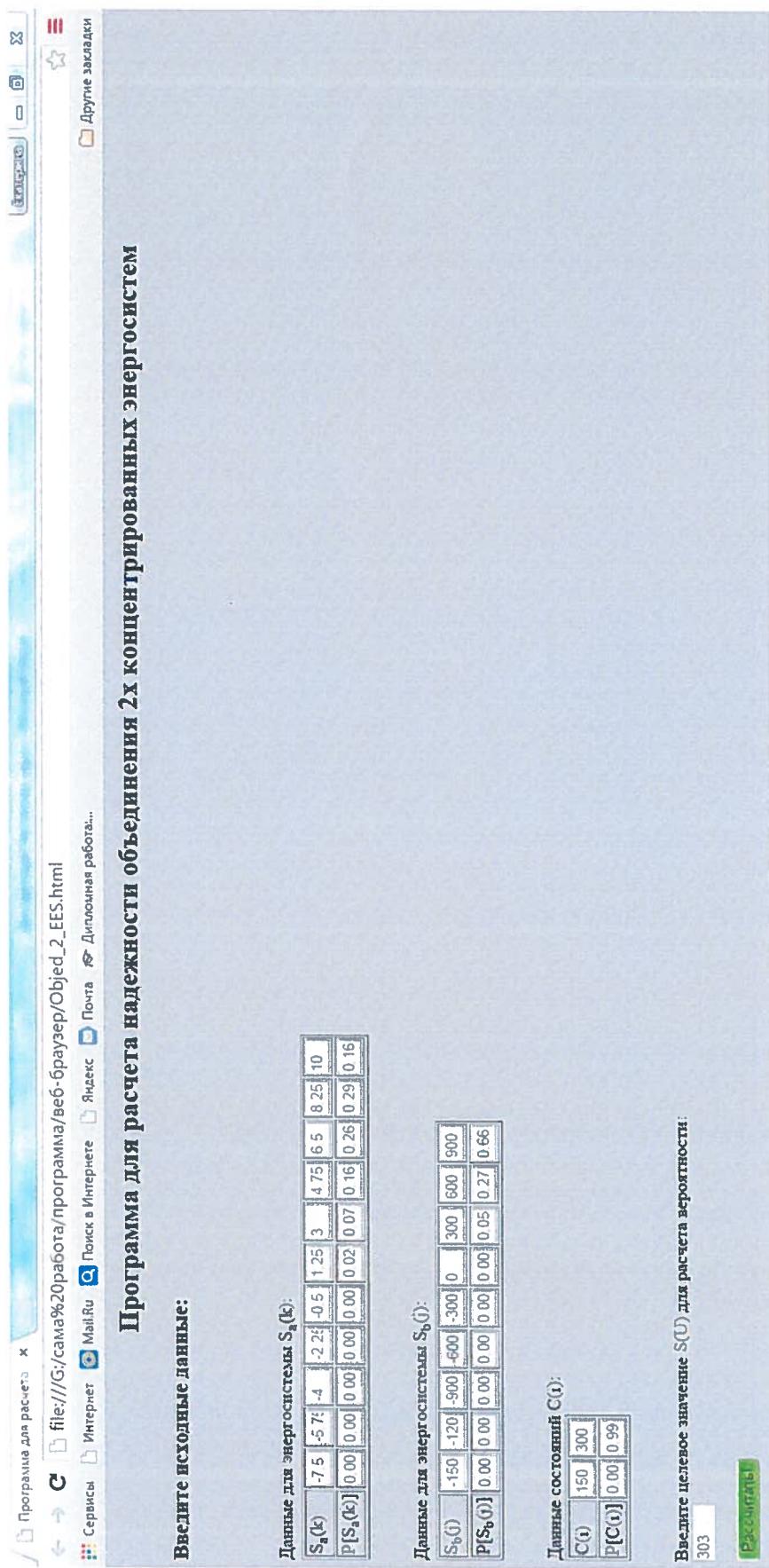


Рисунок 7 – Оконный интерфейс второго этапа работы программы

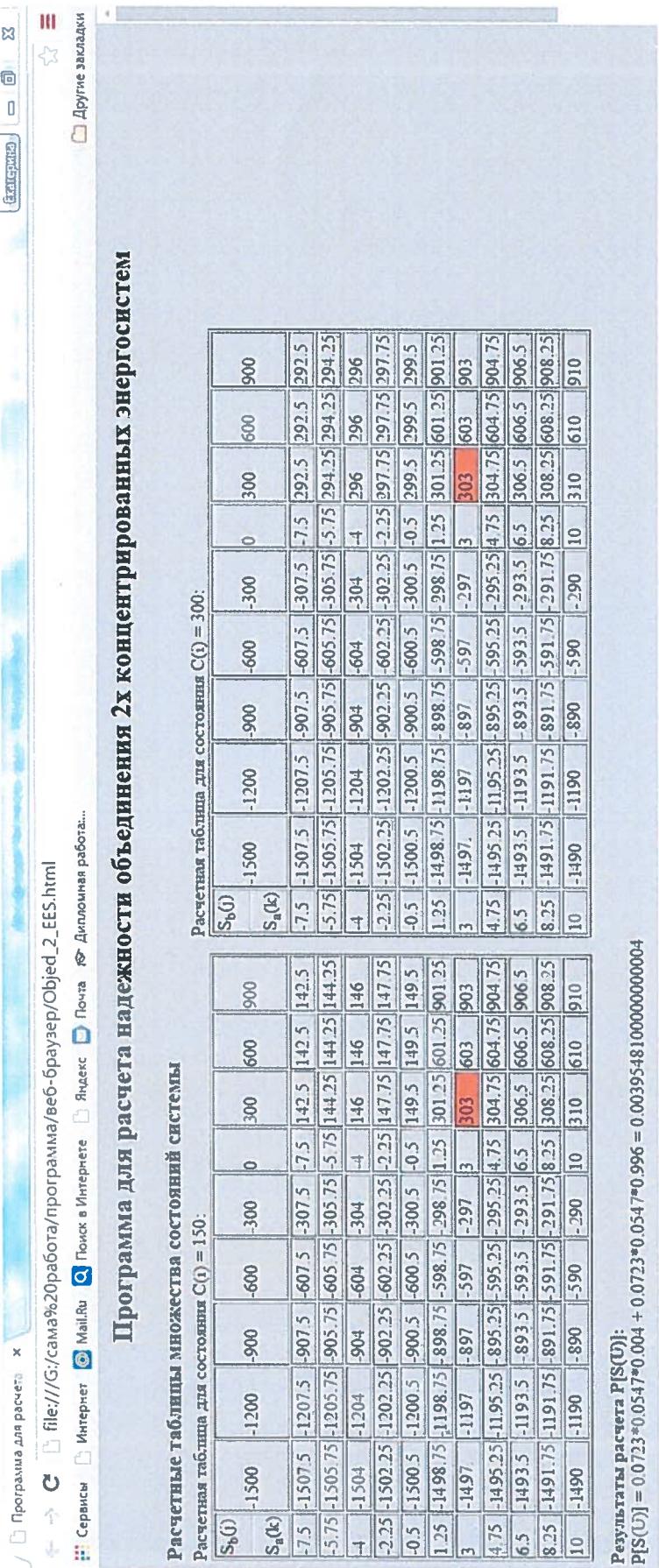


Рисунок 8 – Оконный интерфейс третьего этапа работы программы

Далее графически на рисунке 9 – 11 представим распределение вероятностей значений избытка мощности в системах Дальневосточной ВЭС и ЭЭС Приморского края соответственно.

Введение двух линий связи значительно изменяет дефицит и уменьшает среднегодовой недоотпуск энергии, который станет равным:

$$\Delta W_0 = 8760 \cdot M[D_0] = 8760 \cdot 0,162 = 1423 \text{ МВт} \cdot \text{ч},$$

где  $M[D_0]$  – математическое ожидание дефицита мощности,  $M[D_0] = 0,162 \text{ МВт}$ .

Как видно из рисунка 11, введение связи изменяет распределение вероятностей избытка мощности и величину среднегодового недоотпуска энергии. Недоотпуск в Дальневосточной ВЭС  $\Delta W = 0,138 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$ , в ЭЭС Приморского края  $\Delta W = 2321,4 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$ , а в двух системах  $\Delta W = 2322 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$ . В объединенной двумя линиями системе  $\Delta W = 1423 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$ , то есть, объединив две системы, можно сократить недоотпуск на 899 МВт·ч.

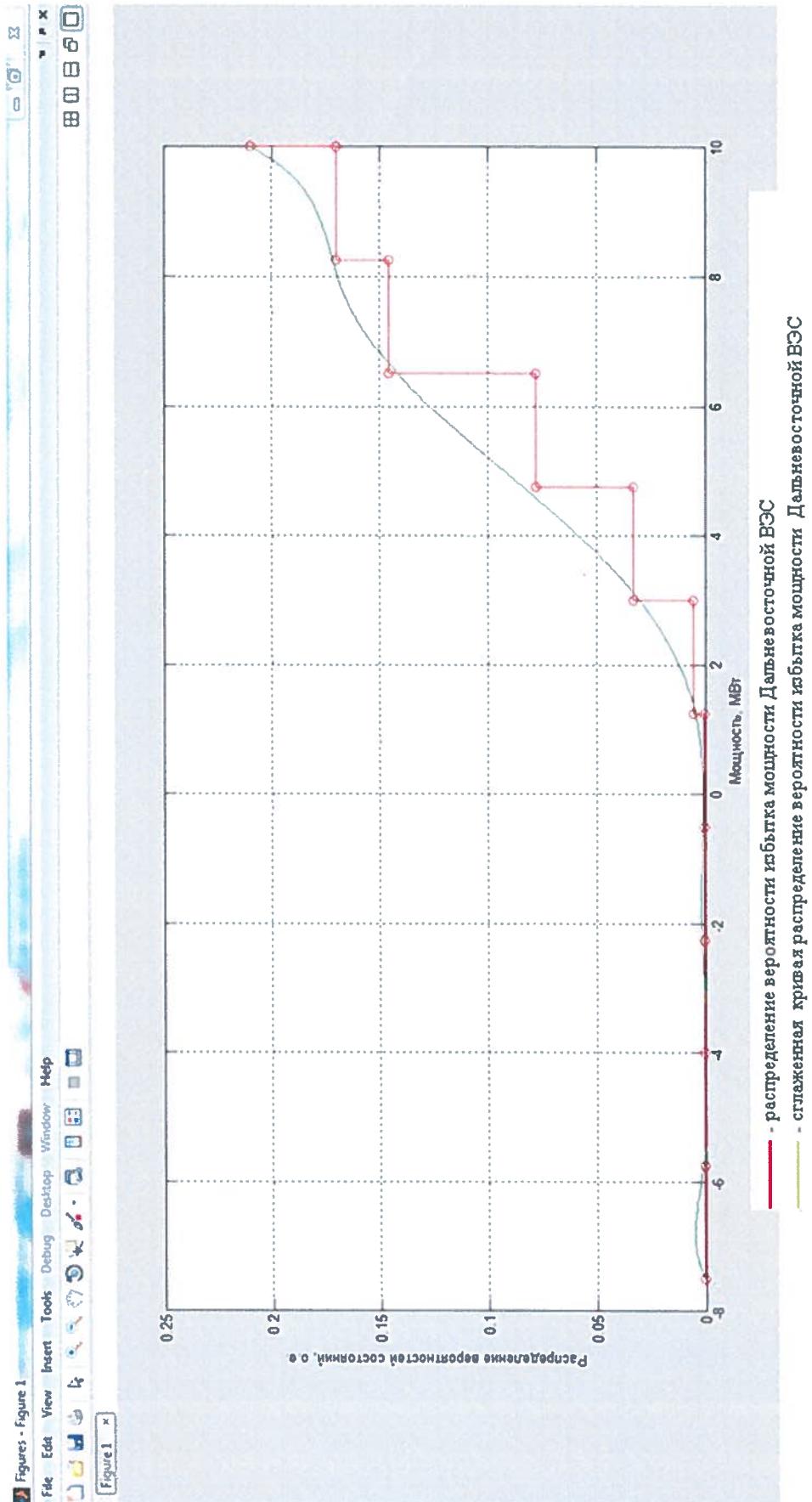


Рисунок 9 – Графики зависимости вероятности наличия избытка мощности в Дальневосточной ВЭС

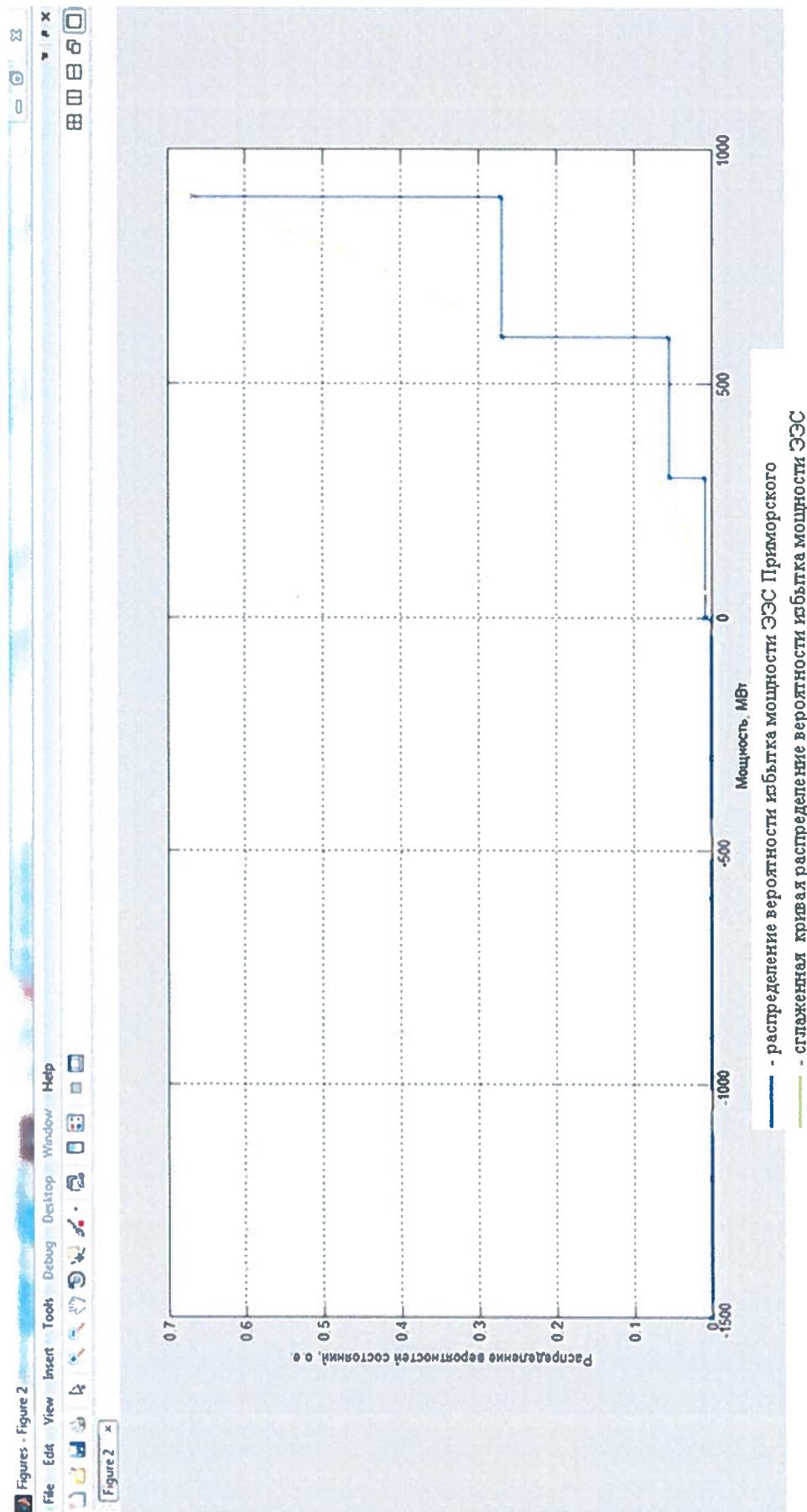


Рисунок 10 – Графики зависимости вероятности наличия избытка мощности в ЭЭС Приморского края

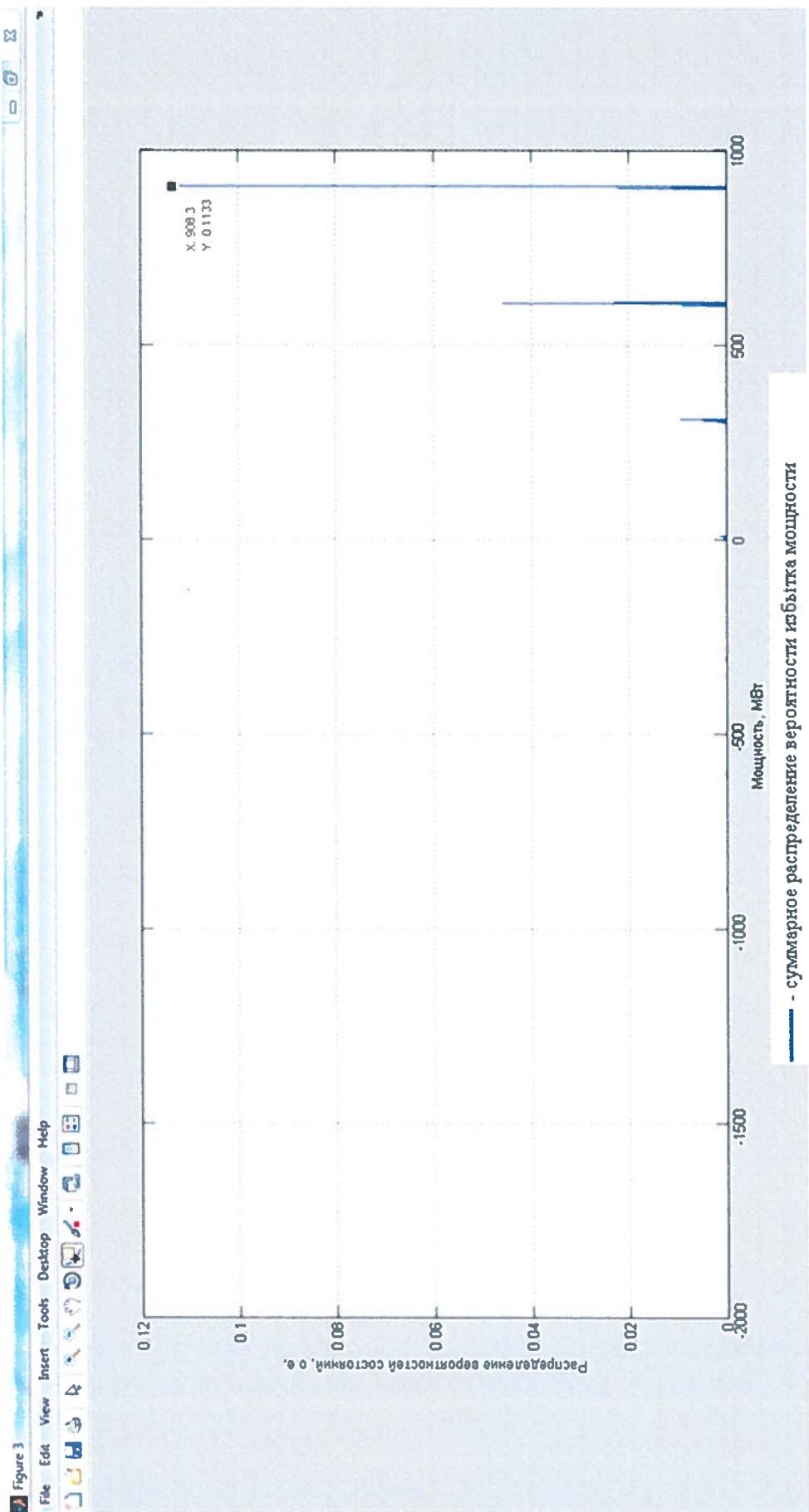


Рисунок 11 – Эффект объединения Дальневосточной ВЭС и ЭЭС Приморского края

## **Заключение**

1. Данная диссертационная работа посвящена решению актуальному вопросу подключения ветроэлектростанций к энергосистеме. В настоящей работе поставлены задачи оценки и обеспечения надежной работы ВЭС в составе ЭЭС.

2. Разработаны вероятностные модели надежности и программное обеспечение, на основе которых была дана оценка надежной работы Дальневосточной ВЭС.

3. Подключение ВЭУ в сеть позволяет регулировать предоставление или получение дополнительной мощности, как в энергосистему, так и из нее, не теряя своей индивидуальности. Отсюда можно сделать вывод о том, что развивая ветроэнергетику можно создать гибкую энергетическую систему, уменьшить дефицит электроэнергии.

4. Профилактическое обслуживание для обеспечения надежности ВЭС позволяет предотвратить длительный простой и увеличить целостность установки, тем самым отдалая момент отказа оборудования. Отсюда следует, что в результате идеального мгновенного предупредительного ремонта безотказность элемента ВЭУ увеличится.

5. В настоящее время недостаток технической литературы, методических указаний, норм и правил, посвященных к вопросам подключения ветроэлектростанций к энергосистеме затрудняет решать технические вопросы при строительстве ветровых электростанций и присоединения их к энергосистеме.

Основные положения диссертации отражены в 2 публикациях:

1. Модель надежности объединения ветропарка с традиционной энергосистемой / Е. И. Чистякова, В.А. Тремясов // Электронный сборник международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Проспект Свободный-2016»: материалы науч. конф., посвященной Году образования в Содружестве Независимых Государств. – Красноярск: Сиб. фед. ун-т. – 2016. – С. 18–22.

2. Модель надежности объединения ветропарка с традиционной энергосистемой / Е. И. Чистякова, В.А. Тремясов // Сборник статей победителей VII международной научно-практической конференции «WORLD SCIENCE: PROBLEMS AND INNOVATIONS». – Пенза: Международный центр научного сотрудничества «НАУКА И ПРОСВЕЩЕНИЕ». – 2017. – С. 56–60.