

Оценка климатологического влияния на возобновляемые источники энергии в районе Финского залива

Н. Р. Костик

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
nrkostik@etu.ru

А. В. Бобыль

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе
Российской академии наук
bobyly@theory.ioffe.ru

Аннотация. Исследование ежедневной совместной изменчивости скорости ветра и солнечной активности в районе Финского залива и ее влияние на возобновляемые источники энергии. Совместное распределение среднесуточных скоростей ветра и освещенности показывает, что освещенность имеет гораздо более сильный сезонный цикл, чем ветер, из-за наклона вращения Земли. Получены слабые антикорреляционные зависимости движения воздушных масс и солнечной инсоляции, получена слабая тенденция, когда ветреные дни становятся более облачными. Исследовано влияние внешних факторов на изменчивость общей выходной мощности наземных ветряных турбин и солнечных фотоэлектрических панелей. В малой степени ветровые установки способны комплементировать выработку возобновляемых источников энергии: 15%–30% ветровые установки и 70%–85% солнечные фотопреобразователи. Исследование направлено на демонстрацию потенциала гибридных возобновляемых источников энергии в условиях суровых погодных условий, возможностей повышения и оптимизации выработки.

Ключевые слова: возобновляемая энергетика, солнечные фотопреобразователи, гибридные системы возобновляемой энергетики, ветрогенераторы, корреляция климатических параметров, оптимизация систем возобновляемой энергетики

I. ВВЕДЕНИЕ

Отказ от традиционных ископаемых ресурсов и тенденция к снижению загрязнения от сжигания ископаемого топлива приведут мир к низкоуглеродному будущему. В солнечной фотоэлектрической (PV) технологии был достигнут значительный прогресс в использовании огромного, чистого и устойчивого источника энергии для удовлетворения энергетических потребностей человечества [1, 2]. Но в некоторых отдаленных регионах климатические ограничения могут повлиять на работу фотоэлектрических систем. Северные регионы и регионы субконтинентальных, континентальных и субарктических климатических зон не могут полностью полагаться на фотоэлектрические системы. В этом исследовании мы исследуем возможности внедрения фотоэлектрических систем с дополнительными источниками возобновляемой энергии.

Ветровая и солнечная энергия сильно подвержены изменчивости и крайне непостоянны [3, 4]. Переменчивость охватывает погодные колебания во временных масштабах от минут и часов, до дней и сезонов, и даже до климатических изменений, происходящих в течение многих лет и десятилетий, связанных с климатическими индексами, такими как

Поэтому для рационального и эффективного использования возобновляемой энергии, становится все более важным понимать взаимосвязь между энергией, генерируемой ветром и солнечными фотоэлектрическими модулями, и степенью изменчивости, за счет которой можно сбалансировать недостаток энергии в одном источнике при помощи другого. Это имеет важные практические последствия с точки зрения потребности в хранении энергии и/или резервных мощностях (например, от гидроаккумулирующих станций, газовых или атомных электростанций), а также для эксплуатационных требований электрических сетей.

Существует множество исследований, посвященных оценке влияния внешних факторов, взаимозаменяемости, прогнозированию и оптимизации переменчивых погодных условий, непосредственно влияющих на показатели выработки электроэнергии при помощи возобновляемых источников энергии. Например, авторы исследования, на примере Италии [5] обнаружили, что конкретные местоположения участков исследования слабо связаны с изменениями в прогнозируемых величинах энергогенерации в Италии. В работах авторов Heide et al. [6, 7] смоделированы запросы по энергопотреблению Европы, с точки зрения хранения и балансирования энергии, в соответствии с гипотетическим сценарием использования возобновляемых источников энергии. Это исследование было составлено на основе прогноза выработки энергии при помощи ветровой и солнечной энергии в соответствии с потреблением, используя данные за 2000–2007 гг. На основе результатов этого исследования были сделаны выводы о возможности оптимального баланса ветрового и солнечного потенциала, что для удовлетворения спроса требует больших объемов хранения. Они показывают, что непостоянство выработки электроэнергии при помощи возобновляемых источников энергии (ВИЭ) можно уравновесить путем накопления избыточно энергии. Другие исследования также были посвящены поиску оптимального сочетания ветровой и солнечной энергии для разных регионов и с использованием данных, охватывающих разные периоды [8–10], и исследования обычно показывают, что включение нескольких типов ВИЭ снижает непостоянство в выработке электроэнергии, уменьшая потребность в резервах [11, 12].

Анализ статей, посвященных исследованию климатического режима Финского залива, продемонстрировал его как регион с высоким ветровым потенциалом [13]. Финский залив достаточно мелководен: в среднем его глубина составляет 40 метров,

а в районе Невской губы – 8 метров. Поэтому большая часть его территории непригодна для судоходства и остается неиспользуемой. Однако такие условия хорошо подходят для установки ветрогенераторов, поскольку глубина, на которую может устанавливаться мачта ветровой турбины не превышает 30 метров. Существуют технологии для установки «ветряков» на большие глубины, так называемые плавучие ветрогенераторы, но стоимость их установки много больше, чем в случае неподвижных аналогов.

Одна из самых больших ролей в формировании климата в этом регионе отводится Финскому заливу (ФЗ) [14]. Сезонная динамика температуры воздуха над акваторией типична для умеренных широт. Самые низкие температуры воздуха наблюдаются в феврале, самые высокие – в июле. Среднемесячная температура воздуха в июле-сентябре и марте-апреле практически во всем заливе одинакова. В июле 17–18 °С, в августе 16,5–17,5 °С, 11 сентября – 12 °С, 1 марта – 2 °С, 2 апреля – 3 °С. В среднем в течение года над заливом преобладают западные, юго-западные и южные ветры (их частота превышает 50%), как правило, наиболее сильные. Реже бывают восточные и северные ветры [15]. Общий характер циркуляционных процессов в атмосфере над северо-восточными районами Балтийского моря определяется влиянием переноса воздушных масс из Атлантического океана.

Основные отличия данного исследования заключаются в рассмотрении Финского залива, как наиболее региона с высоким ветровым потенциалом, благодаря которому возможно компенсировать нехватку солнечной активности. До этого регион финского залива не был рассмотрен для внедрения ВИЭ, поэтому основное внимание исследования сосредоточено на взаимодополняемости солнечно-ветровой энергетики, без внедрения особенностей распределения сети энергоснабжения в различных странах рассматриваемого региона. Также более генерализированный подход к рассмотрению климатологического влияния связан с постоянным развитием сетей энергоснабжения, что может ограничивать и делать информацию не актуальной.

II. МЕТОДОЛОГИЯ

Большая часть локальной изменчивости солнечной освещенности напрямую связана с наклоном оси вращения Земли по отношению к ее орбите. Что приводит к изменению как общего количества часов дневного света, так и общей интенсивности падающего излучения (количество на единицу площади). У этих «астрономических» факторов есть две ключевые особенности: они полностью предсказуемы и доминируют в сезонной изменчивости освещенности.

Для устранения сезонного влияния наклона вращения Земли на освещенность, было введен дополнительный параметр, описывающий количество освещенности, достигающей поверхности без влияния облачности [16]. Для этого рассматривалось отношение всеобщего (глобального) падающего освещения G со среднесуточной нисходящей освещенностью при ясном небе (без облаков), G_{cs} . Тогда мы можем предположить, что отношения этих яркостей одинаковы; назовем эту величину чистотой поверхности:

$$k_s = \frac{G}{G_{cs}}. \quad (1)$$

Это контрастирует с традиционным определением (общего) индекса чистоты k_T , который представляет собой отношение поверхностной освещенности к полученной в верхних слоях атмосферы, то есть до любого вида атмосферного поглощения. В нашем исследовании, мы хотим сравнить освещенность, полученную на поверхности, с той, которая была бы получена на поверхности в условиях ясного (безоблачного) неба, то есть при отсутствии доминирующего метеорологического фактора, облачного покрова.

Также были рассчитаны примерные мощности генерации электроэнергии солнечными фото-преобразователями и ветровыми генераторами как в отдельных точках региона, так и в целом по региону, разбив на отдельные сезоны (зима/весна/лето/осень).

III. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

A. Распределение среднесуточных значений

В ходе анализа ветрового потенциала рассматриваемого региона, были выбраны 5 точек, на карте с наиболее различными показаниями ветровой активности. В качестве географических точек были взяты метеорологические станции. Список рассматриваемых точек представлен в табл. 1.

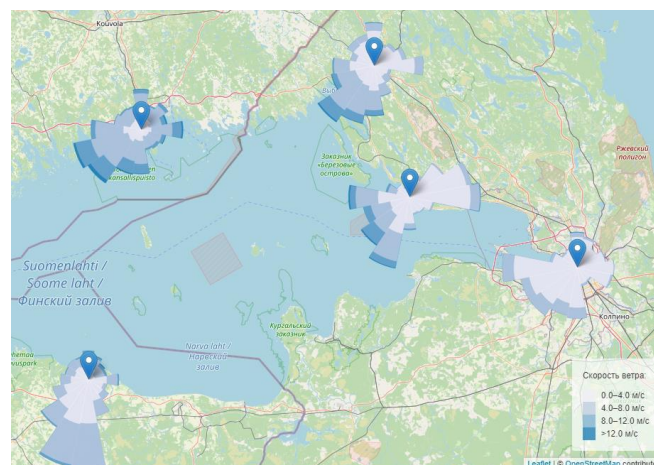


Рис. 1. Карта рассматриваемых точек финского залива [13]

ТАБЛИЦА I ПЕРЕЧЕНЬ ТОЧЕК РАССМАТРИВАЕМОГО РЕГИОНА

Индекс станции	Географическое расположение	Период измерений данных
26045	Кунда, Эстония	01.01.2003-31.12.2012
2976	Котка, Финляндия	01.01.2001-01.01.2011
22897	Озерки, Ленинградская Область, РФ	01.01.2003-15.06.2004 31.08.2012-31.12.2012
22892	Выборг, Ленинградская область, РФ	01.01.2003-31.12.2012
26063	Санкт-Петербург, РФ	01.01.2003-31.12.2012

На рис. 2 представлено распределение скорости ветра в течение года в рассматриваемых точках. Как видно, наибольшие скорости ветра достигают на западе и на северо-западе Финского залива. В выбранных точках, при помощи NASA's POWER (Prediction of Worldwide Energy Resources) Single Point Data Access Viewer были получены среднесуточные климатологические данные за период 2015–2020 годов: глобальная освещенность, освещенность при чистом небе, скорость ветра на высоте 10 м. На основе этих данных были построены зависимости совместного распределения ветрового и

солнечного потенциала на основе среднеарифметической суммы рассматриваемых географических точек.

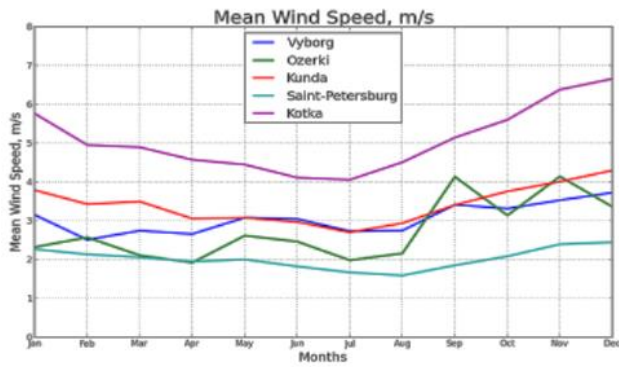


Рис. 2. График распределения среднегодовой скорости ветра в исследуемом регионе [13]

Результат совместного совокупного распределения ветровой и солнечной активности представлен на рис. 3.

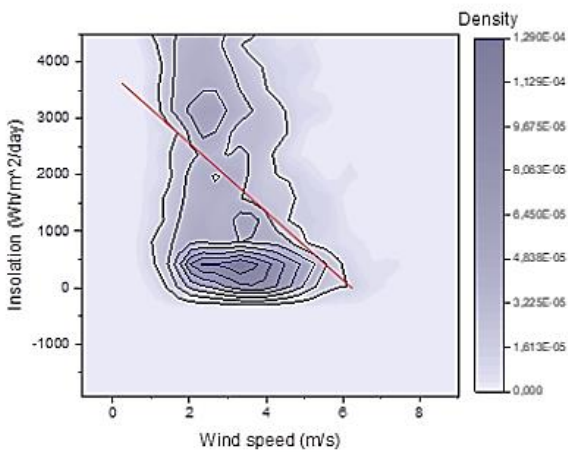


Рис. 3. Совместное распределение среднесуточной скорости ветра на высоте 10 м и и совокупной общей падающей освещенности поверхности на территории Финского залива

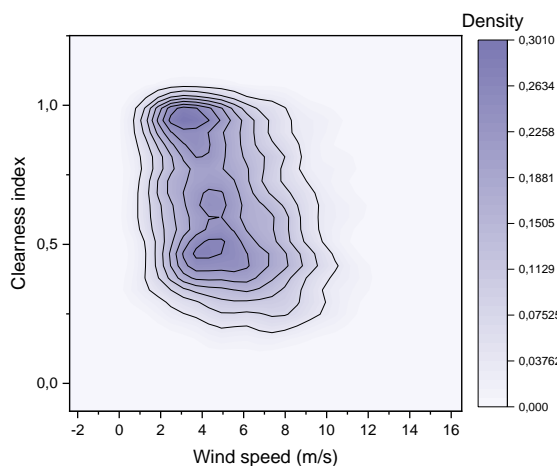


Рис. 4. Зависимость индекса чистоты и совокупной скорости ветра в рассматриваемом регионе

Результаты совместного распределения на основе показаний пяти географических точек демонстрирует общую антикорреляцию зависимости освещенности поверхности (инсоляции) от скорости ветра, также это подтверждается проведенной корреляцией Пирсона, где значение $\rho = -0,37$, соответствует обратной зависимости. Красная линия соответствует линейной регрессии

значений. Аналогичное исследование распределения индекса чистоты и скорости ветра на высоте 10 м (рис. 4) подтверждает данное утверждение.

Дополнительно в работе исследовались совместное распределение климатических параметров по «сезонам». Разбитие на сезоны происходило, согласно метеорологическому определению, «сезоны». Так зимний сезон состоит из месяцев Декабрь, Январь, Февраль. Это обусловлено сезонным запаздыванием, ограничивающее реакцию температуры, и другие климатические изменения в течении года, которые могут повлиять на изменения освещенности, приходящие в верхние слои атмосферы.

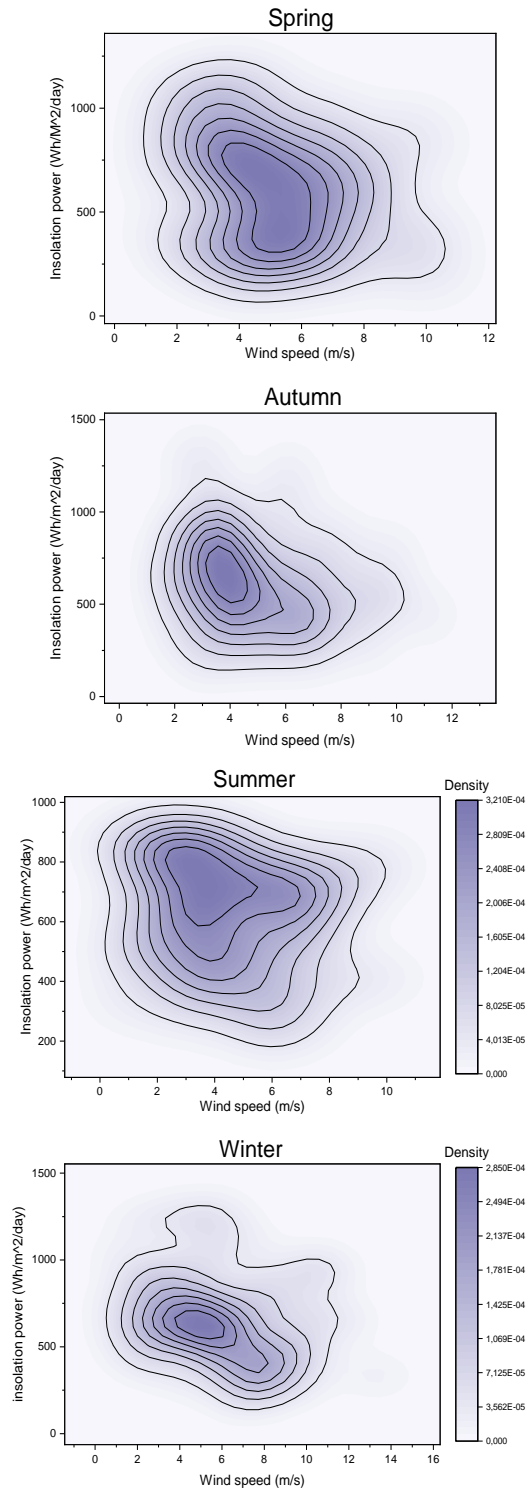


Рис. 5. Усредненные значения распределения инсоляции в различные сезоны от скорости ветра в рассматриваемом регионе

Исходя из этого были получены следующие результаты для совместного распределения скорости ветра в регионе от совокупной освещенности поверхности, представленные на рис. 5.

На основе рис. 5 можно сделать вывод о том, что несмотря на общую более высокую солнечную активность в летний и весенние периоды, наибольший диапазон значений ветрового и солнечного потенциала достигается именно в зимний период. Более динамичная атмосфера изменений зимой позволяет включить в распределение больше параметров, дополняющих нехватку солнечной активности. Это означает, что значение корреляции Пирсона зимой будет ближе к нулю, чем в летние периоды, что приводит к большей зависимости количества пасмурных дней и скорости ветра.

На основе полученных данных возможно сформировать примерный прогноз генерации электроэнергии при помощи солнечных фотопреобразователей и ветровых установок.

В. Ветрогенератор

В большинстве ветрогенераторов используется кривая мощности, согласно которой у ветровых генераторов существуют определенные критические скорости ветра, описывающие, когда турбина начинает генерировать ('cut-in', U_{ci}), когда она механически ограничена своей рабочей или номинальной мощностью (U_r) и когда ветряк отключен в целях безопасности при сильном ветре («cut-out», U_{co}). Для большинства ветрогенераторов, высота которых не превышает 10 м, кривая мощности соответствует рис. 6.

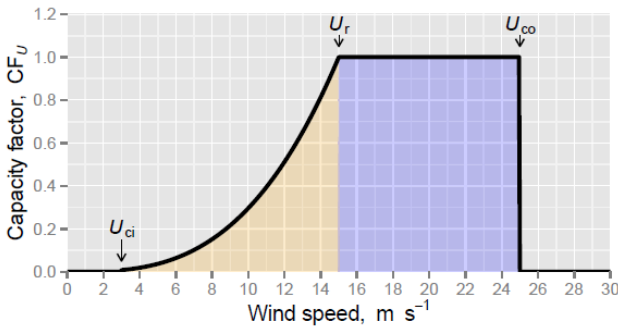


Рис. 6. Кривая мощности ветрогенератора, оранжевая мощность означает начальные скорости ветра для выработки электроэнергии, синяя область – рабочие скорости ветра

$$P_r = \frac{1}{2} \eta \rho \pi R^2 U^3 \quad (2)$$

$$P_U = \begin{cases} 0, & U < U_{ci} \\ P_r \left(\frac{U}{U_r}\right)^3, & U_{ci} \leq U \leq U_r \\ P_r, & U_r \leq U \leq U_{co} \\ 0, & U > U_{co} \end{cases} \quad (3)$$

В большинстве случаев, не нужно указывать КПД η или радиус лопасти R , если вместо этого рассчитывается коэффициент мощности ветра $CF_U = P_U / P_r$. В этом случае необходим минимум информации о турбине, оставляя результаты более общими. Важно отметить, что в этой статье используется только среднесуточные скорости ветра для этой оценки, тогда как на самом деле пороговые значения скорости ветра на кривой мощности определены для мгновенных скоростей ветра. Приведенная кривая мощности является лишь приближением к реальному

поведению ветряной турбины. Все турбины демонстрируют значительный разброс выходной мощности в зависимости от их номинальных кривых мощности [16, 17].

С. Фотопреобразователи

Выходная мощность солнечной фотоэлектрической панели зависит как от общей падающей освещенности G , так и от температуры окружающего воздуха T . Как и в случае с ветрогенератором, мы можем опустить некоторые детали параметров фотоэлектрического модуля, определив коэффициент мощности CF_G . В таком случае мощность фотоэлектрической панели будет определяться выражением:

$$CF_G = \frac{P_G}{P_{STC}} \equiv \eta_{REL}(G, T) \frac{G}{G_{STC}} \quad (4)$$

В этом случае выходная мощность фотоэлектрической панели будет напрямую зависеть от температуры окружения T , ее освещенности G . G_{STC} P_{STC} – параметры освещенности и мощности панели в стандартных условиях эксплуатации фотоэлектрической панели, соответственно. Используя значения NASA POWER Access Viewer количества падающей освещенности и температуры воздуха на высоте 2 м можно произвести оценку мощности, вырабатываемой солнечной панелью.

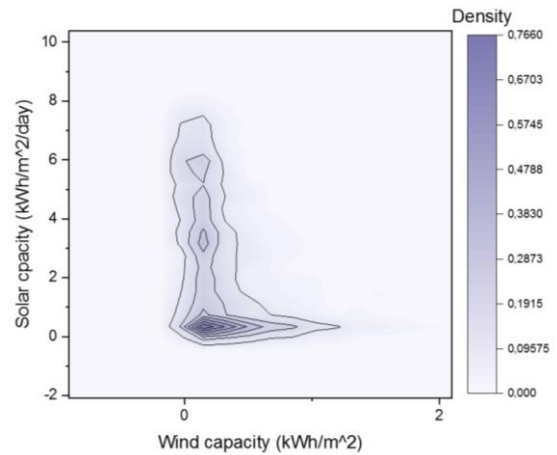


Рис. 7. Совместное распределение среднесуточных показателей выработки солнечных фотопреобразователей и ветрогенераторов

Как видно из рис. 7, преобладание низких скоростей ветра в течение большего времени и ограниченная солнечная активность в течении года, сильно снижают общую выработку систем гибридного использования. Компенсирование нехватки отдельных видов энергии должно производиться рационально, способность солнечных фотоэлементов компенсировать затишья в ветровой энергии зимой должна быть сбалансирована с риском увеличения изменчивости летом. Как результат, значительная изменчивость ветровых ресурсов в зимние периоды компенсируется увеличением средней скорости ветра в зимние периоды.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе был рассмотрен потенциал Финского залива, как региона для внедрения возобновляемых источников энергии. Было предложено решение использования ветрогенераторов совместно с фотоэлектрическими панелями. Гибридный подход к использованию возобновляемых источников позволяет компенсировать нехватку одного из ресурсов в периоды

непостоянства климатических условий. Исследование региона показало, что существует зависимость, при которой в зимние периоды снижается солнечная активность и, как правило, выработка солнечной энергии при помощи солнечных фотопреобразователей. Однако, также в зимние периоды возрастает средняя скорость ветра, что позволяет использовать ветрогенераторы.

При исследовании, было выявлено, что среднесуточная освещенность в течении года в Финском заливе слабо коррелирует со скоростью ветра. Значения корреляции Пирсона $\rho \approx -0.37$, что связано с цикличностью движения воздушных масс и периодами изменения освещенности в течении года. При исключении влияния переменчивости освещенности (освещенность только при чистом небе) корреляционные зависимости сохраняются.

Было показано, что основная часть электроэнергии активно генерируется в течении большей части года (весна – лето) в то время, как ветрогенератор активен в зимний период. Соответственно, при решении вопроса оптимизации и балансировании компонентов гибридных систем основной упор необходимо делать на солнечные фотопреобразователи, отдавая не менее 60% основной генерации электроэнергии. При правильном подходе и стимулировании развития ветровой и возобновляемой энергетики в целом, даже за короткий период зимы, возможно получать высокие показатели эффективности, за счет обширного диапазона средней скорости ветра и высоких средних скоростях ветра.

В дальнейших исследованиях планируется произвести более детальное моделирование эксплуатационных особенностей гибридных систем возобновляемой энергетики. Для этого можно использовать моделирующее программное обеспечение и экспериментальные данные о климатических параметрах, для максимально близкого приближения к реальным показателям выработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] J. M. Pearce, *Photovoltaics — a path to sustainable futures*, (Futures, Vol 34, Issue 7), p. 663-674, (2002)
- [2] P. Barker, J. Bing. *Advances in solar photovoltaic technology: an applicationsperspective*. (IEEE Power Eng Soc Gen Meet) p. 1955–60, (2005).
- [3] D. Arvizu et al. *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 333-400 (2011).
- [4] S. Watson, *Quantifying the variability of wind energy*, WIREs Energy Environ, Nov. (2013).
- [5] F. Monforti, T. Huld, et al. *Assessing complementarity of wind and solar resources for energy production in Italy. a Monte Carlo approach*, *Renew. Energy* 63, p. 576-586, (2014).
- [6] D. Heide, M. Greiner, L. von Bremen, C. Hoffmann, *Reduced storage and balancing needs in a fully renewable european power system with excess wind and solar power generation*, *Renew. Energy* 36 (9), p. 2515- 2523, (Sep. 2011).
- [7] D. Heide, L. von Bremen, M. Greiner, C. Hoffmann, M. Speckmann, S. Bofinger, *Seasonal optimal mix of wind and solar power in a future, highly renewableEurope*, *Renew. Energy* 35 (11) p. 2483-2489, (Nov. 2010).
- [8] H. Lund, *Large-scale integration of optimal combinations of PV, wind and wave power into the electricity supply*, *Renew. Energy* 31 (4), p. 503-515, (Apr. 2006).
- [9] J. Sousa, A. Martins, *Optimal renewable generation mix of hydro, wind and photovoltaic for integration into the Portuguese power system*, in: *10th International Conference on the European Energy Market (EEM)*, IEEE, May p. 1-6, (2013).
- [10] J. Widen, *Correlations between large-scale solar and wind power in a future scenario for Sweden*, *IEEE Trans. Sustain. Energy* 2 (2), p.177-184,(2011).
- [11] D. Halamay, et al. *Reserve requirement impacts of Large-Scale integration of wind, solar, and ocean wave power generation*, *IEEE Trans. Sustain. Energy* 2 (3), p. 321-328, (Jul. 2011).
- [12] C.E. Hoicka, I.H. Rowlands, *Solar and wind resource complementarity:advancing options for renewable electricity integration in Ontario, Canada*, *Renew. Energy* 36 (1), p.97-107, (2011).
- [13] A. K.,Monzikova, et al. “*Estimation of wind power potential of the Gulf of Finland.*” (2013).
- [14] M. Raateoja, O. Setälä, *The Gulf of Finland assessment, Reports of the Finnish environment institute (Assessment)*, (2016).
- [15] A. Smirnova, *Problemy issledovaniya i matematicheskogo modelirovaniya jekosistemy Baltijskogo morja*. Issue.5. (Jekosistemnye modeli. Ocenka sovremennogo sostojaniya Finskogo zaliva Ch.2.), p. 175-188, (1997).
- [16] E. Philip Bett, E. Hazel Thornton, *The climatological relationships between wind and solar energy supply in Britain*, *Renewable Energy*, Volume 87, P1, p.96-110, (2016).
- [17] P. Kiss, L. Varga, I.M. Janosi, *Comparison of wind power estimates from the ECMWF reanalyses with direct turbine measurements*, *J. Renew. Sustain. Energy* 1 (3) (2009).