

СОВРЕМЕННЫЕ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ НА БАЗЕ АСИНХРОННЫХ МАШИН

Никишин А.Ю.¹, Казаков В.П.²

¹Калининградский государственный технический университет

²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет

Современные ветроэнергетические установки конструктивно можно разделить на две группы: с горизонтальной осью вращения и с вертикальной осью вращения. Первые получили в мире повсеместное распространение. В настоящее время в РФ выпускаются ветроэнергетические установки лишь малой мощности, поэтому в нашей стране принята ориентация на использование ВЭУ средней и большой мощности, производимых зарубежными фирмами. В статье рассматриваются общие проблемы развития ветроэнергетики в России, в частности вопросы использования ветроэнергетических установок на базе асинхронных электрических машин как одних из наиболее перспективных. Рассмотрены вопросы математического моделирования таких ВЭУ. Приводятся результаты компьютерного исследования режимов ветровых установок с асинхронными машинами и их сопоставление с результатами экспериментальных исследований режимов работы асинхронного генератора в различных режимах его работы.

Ключевые слова: ветрогенераторы, асинхронные двигатели, альтернативные источники энергии

MODERN VETROENERGETICHESKY INSTALLATIONS ON THE BASIS OF ASYNCHRONOUS CARS

Nikishin A.Y.¹, Kazakov V.P.²

¹State technical university of Kaliningrad

²State Electrotechnical University of St.Petersburg

Modern wind turbines can be structurally divided into two groups: the horizontal-axis and a vertical axis of rotation. The world first got widespread. At present, Russia produced only a small wind power capacity, so in our country has adopted a focus on the use of wind turbines of medium and high power produced by foreign firms. The article deals with the general problem of wind energy development in Russia, in particular the use of wind power plants on the basis of asynchronous electric cars as one of the most promising. The problems of mathematical modeling of wind turbines. Results of computer research modes wind turbines with asynchronous machines and compared with experimental results modes asynchronous generator in different operation modes.

Keywords: wind generators, induction motors, alternative energy

Введение

Ветроэнергетика – это самая быстроразвивающаяся отрасль мировой электроэнергетики. В 2011 году в мире был зарегистрирован самый высокий за всю историю уровень ввода в эксплуатацию ветроэнергетических установок (ВЭУ) – более 42 ГВт (Таблица 1).

Таблица 1. Прогноз развития ветроэнергетики и ее составляющая в мировой энергетике [3]

Года	Установленная мощность ВЭУ, МВт	Доля выработанной электроэнергии (ЭЭ), %	Сокращение выбросов CO ₂ , связанные с выработкой ЭЭ, %
2008	122000	1,5	2,2
2013	350000	3,35	4,3
2018	820000	8	11,0

Планы, принятые в рамках Глобального международного проекта Wind Force: производство 12% электроэнергии в мире к 2020 году, выполняются с существенным опережением. Например, в Дании вырабатывается около 20% от всей вырабатываемой в стране электроэнергии посредством ВЭУ. К 2050 году планируется довести долю ветровой энергии в производстве электроэнергии в Дании до 50% [1, 3].

Такой стремительный рост мировой ветроэнергетики в основном обусловлен: источником энергии (возобновляемый); непрерывно снижающимися удельной стоимостью ВЭУ ($C_{уд}$) и средней себестоимостью вырабатываемой ими электроэнергии ($C_{ээ}$) (Таблица 2) [1]. Начиная с 2004 года, намечается рост ценовых показателей, что обусловлено падением стоимости валюты США.

Таблица 2. Динамика ценовых показателей ВЭУ

Год	1981	1985	1989	1994	2000	2004	2008
$C_{ээ} \frac{\text{цент}}{\text{кВт} \cdot \text{час}}$	38	18	8	5	4	3.8	4
$C_{уд} \frac{\text{долл}}{\text{кВт}}$	4000	2640	1520	1100	950	900	1300

На этом фоне 14,1 МВт суммарной установленной мощности ВЭУ в РФ, из которых 5,1 МВт установлены в Калининградской области [2], трудно необъяснимы. Следует отметить, что в конце 50-х годов прошлого века в СССР установленная мощность ВЭУ составляла более 100 МВт [3].

Россия обладает огромным ветропотенциалом. Ресурс ветровой энергии в России, технически возможный к использованию (технический ресурс) оценен авторами работ: [4] в 16500 млрд. кВт/час; [1] в 52181 млрд. кВт/час при годовой выработке электроэнергии в РФ около 916 млрд. кВт/час.

Типы и характеристики современных ВЭУ

Современные ВЭУ конструктивно можно разделить на две группы: с горизонтальной осью вращения и с вертикальной осью вращения. Первые получили в мире повсеместное распространение. В настоящее время в РФ выпускаются ВЭУ лишь малой мощности, поэтому в нашей стране принята ориентация на использование ВЭУ средней и большой мощности, производимых зарубежными фирмами [1, 3].

С середины 80-тых годов прошлого века по настоящее время в мире ВЭУ с горизонтальной осью вращения сменилось примерно 8 поколений. Каждое из последующих поколений отличается от предыдущих: большей единичной установленной мощностью от 20-30 до 4500кВт; степенью автоматизации; решением технических и экологических проблем; более высокой производительностью и более низкой себестоимостью выработанной электроэнер-

гии. В настоящее время ведущие фирмы – производители используют асинхронные (Vestas, GE Wind и другие) или синхронные (Enercon) машины

В ВЭУ первых поколений, производимых фирмой Vestas, использовалась асинхронная машина с короткозамкнутым ротором и конденсаторами для компенсации реактивной мощности, потребляемой генератором на холостом ходу (Рисунок 3а), что создавало ряд проблем с обеспечением качества электроэнергии в питающей сети.

С ростом мощностей ВЭУ возросло их воздействие на электрическую сеть. В современных ВЭУ преимущественно используются ВЭУ двух типов: на основе асинхронных генераторов двойного питания или безредукторные ВЭУ на основе синхронного генератора, в которых решены проблемы плавного пуска, потребления или выдачи реактивной мощности, стабилизации напряжения.

Оба типа ВЭУ обладают своими преимуществами и недостатками. Так, стартовая скорость ВЭУ на основе синхронного генератора несколько ниже, чем на основе асинхронного, что несколько увеличивает выработку электроэнергии, отсутствует громоздкий редуктор. Благодаря использованию преобразователя с мощностью, равной номинальной мощности ВЭУ, в более широких пределах возможно регулирование реактивной мощности, чем при использовании АГ с двойным питанием [5].

Преимущества ВЭУ на основе асинхронного генератора двойного питания: использование полупроводникового преобразователя меньшей мощности (около 30% от мощности ВЭУ), что позволяет значительно снизить его стоимость и потери. Благодаря этому, как показывают исследования, выполненные в работе [5], при достаточно высоких средних скоростях ветра (более 7,5 м/с) ВЭУ на основе асинхронных генераторов двойного питания чуть более эффективны. Следует отметить, что дальнейшее развитие ВЭУ идет по пути оптимизации существующих разработок, использования новых профилей лопастей, материалов. Вводится понятие специализации ВЭУ, например фирмой Vestas ВЭУ марки V100 предназначена для установки в местах с низкой среднегодовой скоростью ветра. Весьма перспективна концепция ВЭУ на основе синхронного генератора с постоянными магнитами, обладающая более простой конструкцией и широким диапазоном скоростей ветроколеса (Рисунок 3г). Реализацию этой концепции, названную Windformer, предлагает фирма АББ. Электрическая схема ВЭУ аналогична, показанной на рисунке 4в. Отличие заключается в следующем: используется высоковольтный генератор, напряжением более 20 кВ; несколько ВЭУ объединяются в группу (кластер) и энергия постоянного тока от них по кабелям постоянного тока поступает к общему преобразователю, подключенному к сети переменного тока. В этих ВЭУ отсутствуют редуктор, трансформатор. Все это уменьшает размеры капсулы, повышает надежность ВЭУ, снижает уровень шума.

Математическая модель ВЭУ на базе асинхронных машин для оценки возможности подключения и совместной работы таких ВЭУ в составе ЭЭС

Мощность ВЭС становится соизмеримой с мощностью ЭЭС, в связи с чем работа ВЭУ в электрических сетях и системах оказывает влияние на:

- качество электрической энергии (нормы и условия);
- загрузку оборудования сети (технические ограничения);
- загрузку при КЗ;
- баланс мощности и энергии.

Таким образом, при включении ВЭУ и ВЭС на параллельную работу с сетью могут быть превышены ее технические возможности, поэтому на стадии предпроектных работ необходимо проведение оценки возможности подключения и совместной работы ВЭУ и ВЭС в составе ЭЭС в статических и динамических режимах работы. В странах Европы и Северной Америки разработаны нормативные документы, позволяющие проводить такую оценку, которая должна основываться на: соотношении $S_{ВЭУ}$ и $S_{КЗ}$ ($S_{ВЭУ} / S_{КЗ} \geq 0,02$), комплексном расчете перетоков мощности, изменениях напряжения при коммутациях, расчете токов короткого замыкания, оценке фликера и высших гармоник. Разработаны стандартные методы, позволяющие проводить оценку статических режимов совместной работы ВЭУ в составе ЭЭС, например расчет перетоков мощности. Вместе с тем отмечается, что для ряда режимов, например коммутационных, оценка не может быть проведена стандартными методами и требует использования соответствующих динамических моделей ВЭУ в составе ЭЭС, разработка которых на сегодняшний день является актуальной научно-технической задачей. Такая модель, как правило, включает в себя математические модели её элементов: ЭЭС, трансформатора, линии электропередачи, потребителя и ВЭУ на базе асинхронных машин (рисунок 4).

ВЭУ представляет собой комплекс взаимодействующих систем (рисунок 1), которые описываются системой уравнений в координатах d-q:

$$\begin{aligned}
 v_{ds} &= -r_s \cdot i_{ds} - \omega_s \cdot \psi_{qs} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} & \psi_{ds} &= -(L_s + L_m) \cdot i_{ds} - L_m \cdot i_{dr} & i_{dc} &= C \cdot \frac{du_d}{dt} - \omega_s \cdot C \cdot u_q \\
 v_{qs} &= -r_s \cdot i_{qs} + \omega_s \cdot \psi_{ds} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} & \psi_{qs} &= -(L_s + L_m) \cdot i_{qs} - L_m \cdot i_{qr} & i_{qc} &= C \cdot \frac{du_q}{dt} + \omega_s \cdot C \cdot u_d \\
 v_{dr} &= -r_r \cdot i_{dr} - \omega_r \cdot \psi_{qr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} & \psi_{dr} &= -(L_r + L_m) \cdot i_{dr} - L_m \cdot i_{ds} \\
 v_{qr} &= -r_r \cdot i_{qr} + \omega_r \cdot \psi_{dr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} & \psi_{qr} &= -(L_r + L_m) \cdot i_{qr} - L_m \cdot i_{qs} \\
 M_m &= \frac{0,5}{\omega_r} \cdot c_p(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot A \cdot v_c^3 & M_{gen} - M_m &= J_{eqv} \cdot \frac{d\omega_r}{dt}
 \end{aligned} \quad (1)$$

где v_{ds} , v_{qs} , v_{dr} , v_{qr} , i_{ds} , i_{qs} , i_{dr} , i_{qr} , ψ_{ds} , ψ_{qs} , ψ_{dr} , ψ_{qr} – напряжения, токи и потокосцепления обмоток статора и ротора по осям d и q;

r_s, r_r, L_s, L_r, L_m – активные сопротивления, собственные и взаимная индуктивность обмоток статора и ротора;

ω_s, ω_r – угловые скорости вращения электромагнитного поля статора и ротора; M_m – эквивалентный механический момент на валу ротора ВЭУ;

M_{gen} – электромагнитный момент генератора ВЭУ;

J_{eqv} – эквивалентный момент инерции ВЭУ;

C – емкость компенсирующего устройства ВЭУ;

c_p – коэффициент производительности ВЭУ;

ρ – плотность воздуха;

A – площадь ометаемой поверхности ротора ВЭУ;

λ – отношение линейной скорости вращения конца лопасти к скорости ветра;

β – угол поворота лопасти ВЭУ.

Активная и реактивная мощность генератора ВЭУ, а также его электромагнитный момент могут быть определены по выражениям 2 и 3.

$$P_s = \left(\frac{L_m}{L_r + L_m} \right) \cdot v_{qs} \cdot i_{qr}; \quad Q_s = -\omega_s \cdot (L_m \cdot i_{dr} + (L_s + L_m) \cdot i_{ds}) \cdot i_{ds} \quad (2)$$

$$M_{gen} = p \cdot (\psi_{dr} \cdot i_{qs} - \psi_{qr} \cdot i_{ds}) \quad (3)$$

Для адекватного описания пусковых режимов ВЭУ на базе АГ с короткозамкнутым ротором в модель введен упрощенный учет работы пускового устройства ВЭУ в форме ограничения расчетных значений пускового тока на заданном уровне, в течение 0.6 с после коммутации ВЭУ выключателем. Для ВЭУ на базе АГ двойного питания необходим дополнительный учет преобразователя частоты ротора, моделируемого аналитически, без учета параметров его полупроводниковых элементов и конструкции, на основе реализуемых в нем алгоритмов управления напряжением в цепи ротора АГ [2, 4]. Уравнения ЛЭП, трансформатора и ЭЭС за своим сопротивлением в системе d-q координат:

$$\begin{aligned} v_{dt1} &= r_t \cdot i_{dt} + L_t \cdot \frac{di_{dt}}{dt} - \omega_s \cdot L_t \cdot i_{qt} - k_t \cdot v_{dt2} & v_{ds1} &= r_s \cdot i_{dt} + L_s \cdot \frac{di_{dt}}{dt} - \omega_s \cdot L_s \cdot i_{qt} - v_{ds} \\ v_{qt1} &= r_t \cdot i_{qt} + L_t \cdot \frac{di_{qt}}{dt} + \omega_s \cdot L_t \cdot i_{dt} - k_t \cdot v_{qt2} & v_{qs1} &= r_2 \cdot i_{qt} + L_s \cdot \frac{di_{qt}}{dt} + \omega_s \cdot L_s \cdot i_{dt} - v_{qs2} \\ \Delta v_{dl} &= v_{dl2} - v_{dl1} = r_a \cdot i_{dl} + L_a \cdot \frac{di_{dl}}{dt} - \omega_s \cdot L_a \cdot i_{ql} & & \\ \Delta v_{ql} &= v_{ql2} - v_{ql1} = r_a \cdot i_{ql} + L_a \cdot \frac{di_{ql}}{dt} + \omega_s \cdot L_a \cdot i_{dl} & & \end{aligned} \quad (4)$$

где $r_t, r_s, r_a, L_t, L_a, L_s$ – активное сопротивление и индуктивность схем замещения трансформатора, линии и системы; k_t – коэффициент трансформации.

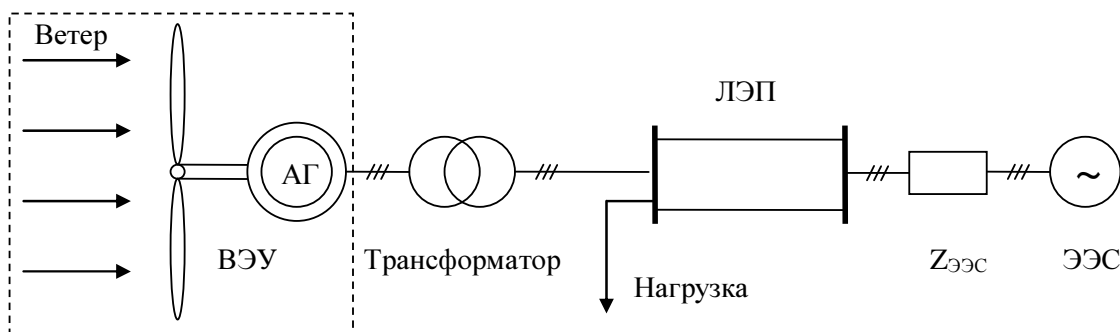


Рисунок 1 – Структурная схема упрощенной математической модели ЭЭС, имеющей в своем составе ВЭУ.

Решение подобных систем уравнений в явном виде представляет значительные трудности, поэтому для подготовки модели использовался пакет MatLab, который позволяет организовывать модели из блоков элементов и отображать её структуру графически. Для описания ветровой нагрузки, аэродинамики ротора и механического привода ВЭУ использовались блоки приложения Wind Turbine Blockset. Ряд блоков, описывающих например работу АГ и его систему компенсации реактивной мощности, был доработан. Созданы блок пускового устройства ВЭУ и блок управления, осуществляющий подключение ВЭУ к сети в момент с заданной скоростью вращения ротора.

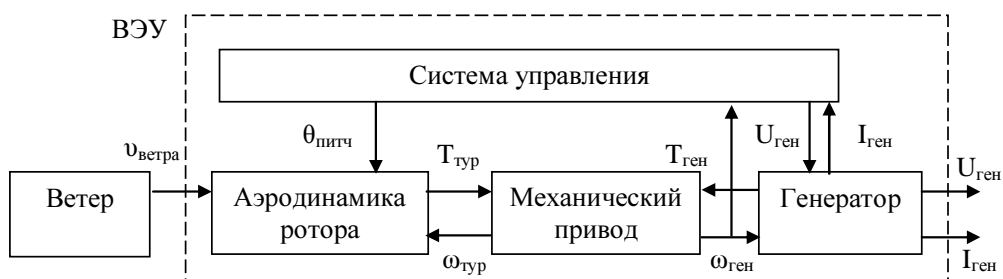


Рисунок 2 – Блок-схема ветроэнергетической установки

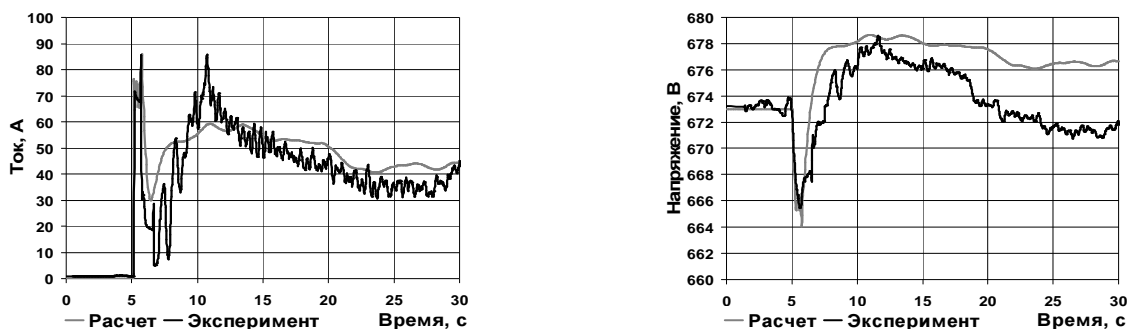


Рисунок 3 – Зависимости тока и напряжения в точке подключения ВЭУ-225 при пуске от времени

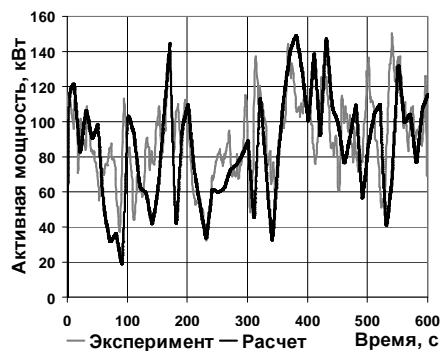
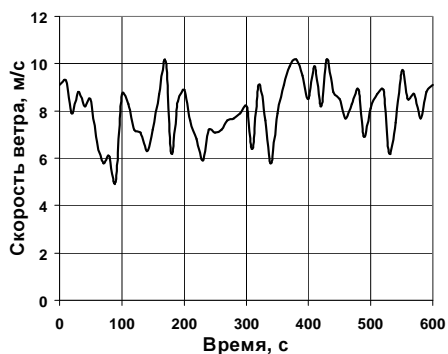


Рисунок 4 – Скорость ветра (а) и соответствующие зависимости активной мощности ВЭУ-225 (б)

Заключение

Оценка достоверности разработанных моделей проводилась на базе экспериментальных исследований режимов работы ВЭУ с асинхронными машинами крупнейшего в РФ ветропарка в прибрежной зоне Балтийского моря Калининградской области (рисунок 4) и показала достаточную, с инженерной точностью, сходимость с расчетными данными во всех режимах работы (рисунок 5).

Таким образом, разработанная математическая модель ЭЭС с ВЭУ на базе асинхронных машин, позволяет проводить оценку возможностей подключения и совместной работы таких ВЭУ и ВЭС на их основе в составе ЭЭС. Адекватность модели подтверждена результатами экспериментальных исследований режимов работы ветропарка в прибрежной зоне Балтийского моря Калининградской области.

Список литературы

1. Концепция использования ветровой энергии в России / под ред. Безруких П.П. – М.: Изд-во "Книга – Пента", 2005. - 128 с.
2. Белей В.Ф. Выбор ветроустановок на основе опыта эксплуатации ветропарка в Калининградской области // М. - Электрика. – 2003. - № 2.- С. 3 -7.
3. Современная ветроэнергетика: тенденции развития, проблемы и некоторые пути их решения / В. Ф. Белей, А. Ю. Никишин // Электрика. - 2006. - N 8. - С. 19-22. - Библиогр.: с. 22 (17 назв.). - Ил.: 3 рис., 2 табл.
4. Ганага С.В., Кудряшов Ю.И., Николаев В.Г. Ветроэнергетические ресурсы России и перспективы их освоения //Малая энергетика.- 2006.- № 1-2. – С. 2-13.
5. Akhmatov V., Knudsen H., Nielsen A.H., Advanced simulation of windmills in the electrical power supply. – International Journal of Electrical Power and Energy Systems, July 2002, Vol.22, No. 6, p. 421 - 434

Рецензенты:

Новиков Владислав Александрович, д.т.н., профессор кафедры РАПС Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета, г.Санкт-Петербург.

Прокофьев Геннадий Иванович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой РАПС Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета, г.Санкт-Петербург.