

*Д. Г. АЛЕКСЕЕВСКИЙ*, канд. техн. наук, доц., Запорожская государственная инженерная академия.

## **ВИЗУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОКАНАЛЬНЫХ ВЕТРОЭЛЕКТРОГЕНЕРИРУЮЩИХ СИСТЕМ**

**Введение.** Эффективность ветроэнергетических установок является одним из основных факторов, влияющих на процесс развития ветроэнергетики. Поэтому усилия разработчиков ВЭУ в основном направлены на поиск технических решений способствующих снижению стоимости, повышению выработки электроэнергии и повышению эксплуатационной надежности. На этом пути появляется множество конструкций ВЭУ, в том числе значительно отличающихся от классической концепции ВЭУ, которая состоит из ветротурбины и генератора. Из множества подобных конструктивных решений можно выделить отдельный класс – *многоканальные ВЭУ*. В этих схемах мощность ветрового потока подвергается преобразованию не в последовательном одноканальном тракте преобразования, как в классической ВЭУ, а в разветвленной цепи преобразования мощности. Появление таких конструкций вызвано стремлением разработчиков преодолеть ряд технических проблем, к которым можно отнести:

- необходимость согласования малой угловой скорости ветротурбины и большой скорости генератора (в классической схеме решается применением мультипликатора либо тихоходного генератора);
- неравномерность распределения значения ветрового потока по высоте (особенно эта проблема обостряется с ростом размеров ветротурбины);
- стремление упростить монтаж и обслуживание ВЭУ;
- необходимость снижения механических нагрузок на конструктивные элементы ВЭУ, которая также становится важным с ростом единичной мощности ветроустановки.

Одним из аспектов применения этих систем является проблема разработки систем и алгоритмов управления для них.

**Анализ последних достижений и литературы.** Анализ патентной информации и публикаций показывает, что к наиболее многочисленным группам многоканальных ВЭУ можно отнести:

- ВЭУ с аэродинамическим мультиплицированием [1, 2];
  - ВЭУ с последовательными двойными ветротурбинами, находящимися на одной оси и вращающимися в противоположные стороны [3];
  - многотурбинные ветроэнергетические установки [4];
  - ВЭУ на базе асинхронных электрических машин с фазным ротором [5].
- Предлагаются, также, варианты с комбинацией вышеперечисленных технических решений [6].

**Постановка проблемы.** Однако, проектирование многоканальных систем сталкивается с проблемой значительного увеличения сложности системы, и не столько сложности конструкции, сколько сложности их математического описания. Действительно, наличие разветвленной схемы преобразования энергии, увеличение порядка системы дифференциальных уравнений, увеличение количества нелинейных элементов системы значительно усложняют математическое описание данных ВЭУ как объекта управления. Также это затрудняет понимание их работы, что, безусловно, является важным в части подготовки специалистов для создания и эксплуатации этих систем. В значительной степени все это является серьезным сдерживающим фактором развития этих направлений ветроэнергетики.

Решению этих проблем может помочь визуальное моделирование. Однако здесь есть свои проблемы связанные с созданием уровней декомпозиции модели.

С одной стороны, модель на уровне элементарных причинно-следственных связей получается достаточно объемной. Это приводит к ухудшению ее понимания, увеличивает время на ее отладку и повышает вероятность ошибки.

Применение субблоков модели и формирование соответствующих библиотек сейчас реализуется достаточно широко. Однако в части устройств преобразовательной техники, которые входят в состав комплекса в основном они реализованы на схмотехническом уровне. Построение математических моделей на схмотехническом уровне сопряжено со значительными вычислительными затратами. В случае сложных электротехнических комплексов, которыми являются многоканальные системы, это значительно увеличивает время моделирования на стадии разработки. Кроме того малое быстродействие таких моделей затрудняет реализацию оптимальных регуляторов, в частности использующих в своей работе прогнозный алгоритм формирования управляющих воздействий. Увеличение быстродействия моделей именно для систем управления ВЭУ, где электромеханические процессы происходят значительно медленнее, в сопоставлении с периодом работы силовых ключей полупроводниковых преобразователей, может быть получено на пути применения, на пример, метода МЭСИТ [7], моделирования в локальных средних [8].

Значительно упрощает задачу синтеза моделей многоканальных систем введение унификации компонент модели.

**Цель статьи.** Целью данной работы является создание методики синтеза математических моделей многоканальных ветроэлектрогенерирующих систем адаптированной для целей синтеза алгоритмов управления этими системами и регуляторов на их основе.

Материалы и результаты исследования.

**Комбинированная система обозначений элементов структур энергетических трактов.** На первом этапе синтеза моделей многоканальной системы строится схема трактов преобразования мощности. Для ее построения предлагается следующая система обозначений структурных элементов. Формирование обозначения структурного элемента осуществляется на двух уровнях: на структурном и функциональном (см. Таблицу 1). Обозначение на структурном уровне показывает, какую роль данный структурный элемент играет с точки зрения преобразования, накопления и распределения энергии в системе. Обозначение функционального уровня показывает природу энергетических процессов, которые происходят в данном элементе.

Таблица 1 Комбинированная система обозначений элементов структур энергетических трактов

Структурный уровень		Функциональный уровень					
Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
Источник энергии		Ветротурбина		Индуктивность		Простое распределение энергии	
Приемник энергии		Ветровой поток		Емкость		Векторная сумма	
Преобразователь энергии		Синхронный генератор с постоянными магнитами		Инерционный накопитель		Электрическая машина с фазным ротором	
Накопитель энергии		Электрическая сеть		Преобразование вращательного движения в поступательное		Механическая передача	
Распределительный энергетический узел		Неуправляемый выпрямитель		Импульсный преобразователь постоянного напряжения		Трехфазный трансформатор	
Консолидирующий энергетический узел		Тиристорный инвертор		Простая консолидация потоков энергии		Управляемый трехфазный мост	

Следует отметить, что перечень обозначений структурного уровня является полным, и не предполагает введение новых элементов, так как отражает все, что может происходить с энергией в многоканальной системе, абстрагируясь в отношении природы этих процессов. Перечень функционального же уровня является незавершенным и открытым.

**Структурная схема тракта преобразования мощности в многоканальной системе.** Построение схемы тракта преобразования рассмотрим на примере многоканальной ветроэлектрогенерирующей системы с аэродинамическим мультиплицированием, которая была рассмотрена в [9]. Ветроэнергетическая установка включает в себя первичную двулопастную ветротурбину и две, закрепленные на ее лопастях, вторичные ветротурбины. Вторичные ветротурбины напрямую, без мультипликатора, связаны с валом синхронного генератора. Генераторы отдают электрическую мощность в электрическую сеть через преобразователь частоты (ПЧ). В звено постоянного тока ПЧ, для регулирования тока генератора, включен импульсный преобразователь постоянного напряжения повышающего типа. В данном примере оси вторичных ветротурбин ориентированы в плоскости вращения первичной ветротурбины и не воспринимают составляющую от первичного ветрового потока (данное допущение введено для упрощения рассмотрения). На рисунке 1 приведена структурная схема тракта преобразования мощности рассмотренной ВЭУ.

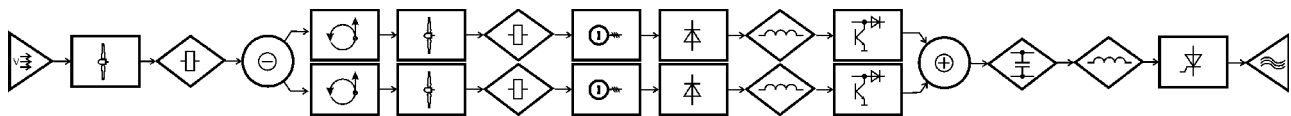


Рис. 1 Структурная схема тракта преобразования энергии в многоканальной ВЭУ с аэродинамическим мультиплицированием

Следует обратить внимание, что индуктивности и емкости вынесены за пределы преобразовательных устройств и представлены как отдельные элементы накопления энергии.

С помощью рассмотренной системы обозначений могут быть описано большинство схем многоканальных ветроэлектрогенерирующих систем. Они достаточно разнообразны как по конструкции, так и по структуре преобразования мощности. При этом предложенный язык описания их трактов преобразования мощности позволяет проводить анализ, сопоставление и классификацию в рамках единого подхода к описанию. Кроме того, полученная таким образом схема ВЭУ являются исходным материалом для следующего этапа моделирования - построения визуальной математической модели.

**Система обозначений унифицированных блоков и особенности построения визуальной модели системы.** Каждому элементу в структуре энергетических трактов ставится в соответствие элемент визуальной математической модели. С целью улучшения визуализации и упрощения формирования библиотек в данной работе предлагается введение унификации обозначения блоков визуальной модели системы. На рисунке 2 показан общий вид блока.

Блок представляет собой «черный ящик» с входами:  $X_{1+}$ ,  $X_{2+}$ ,  $X_{3+}$ ,  $X_{4+}$ , и выходами:  $X_{1-}$ ,  $X_{2-}$ ,  $X_{3-}$ ,  $X_{4-}$ . Для обозначения связи с соответствующим элементом схемы энергетических трактов в центре блока размещается соответствующее обозначение функционального уровня (на рисунке 2 он показан в форме квадрата с осевыми линиями, см. табл. 1).

Если количество входов или выходов меньше четырех, то часть позиций не заполняются и остаются пустыми (допускается, при необходимости, увеличение более четырех входов или выходов блока).

Следует также отметить, что входы и выходы блоков соответствуют модели причин-следствий, и не понимаются, как входы и выходы устройств. Входы всегда располагаются слева, а выходы – справа.

При соединении блоков в структуру, направление линий – «слева направо» соответствует прямым связям, а направления – «справа налево» – обратным связям. Этот визуальный аспект структурной схемы важен для понимания принципа работы системы на уровне причин-следствий.

Построение визуальной модели начинается с того, что из библиотеки достаются блоки, соответствующие элементам структуры энергетических трактов. Причем блоки размещаются в той же структурной последовательности.

Визуальная модель получается путем стыковки соответствующих входов и выходов блоков, с помощью прямых и обратных направленных линий. Модель считается завершенной, если подключены все входы блоков.

Для иллюстрации построения визуальной модели приведем ее изображение для рассмотренной выше системы ВЭУ с аэродинамическим мультиплицированием (Рисунок 3)

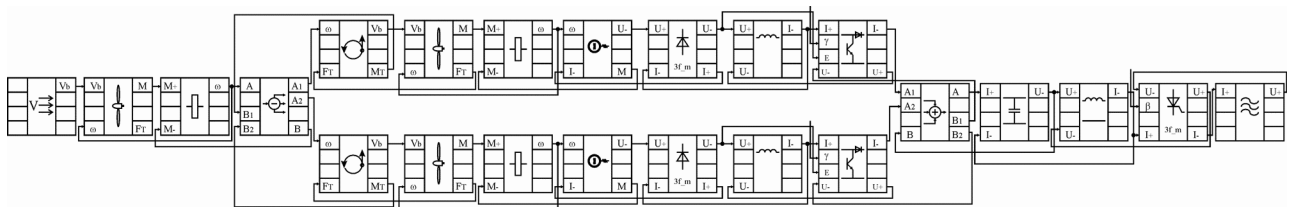


Рис. 3 Структурная схема визуальной математической модели многоканальной ВЭУ с аэродинамическим мультиплицированием.

**Примеры элементов библиотек визуальной модели.** Для иллюстрации содержания блоков приведем визуальные модели некоторых из них. Математическое описание всех блоков представляет довольно большой объем информации и не может быть рассмотрено в рамках данной статьи.

На рисунке 4 приведены структурный элемент «индуктивность» и его визуальная модель. С точки зрения визуальной причинно-следственной модели индуктивность является преобразователем входного –  $U_+$  и выходного –  $U_-$  напряжения четырехполюсника с индуктивностью –  $L$  в ток –  $I_-$ , с учетом падения напряжения на эквивалентном сопротивлении потерь –  $R_L$ .

Визуальная модель рисунка 4 соответствует дифференциальному уравнению (1).

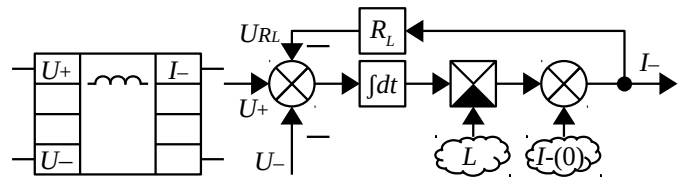


Рис. 4 Содержание элемента «индуктивность»

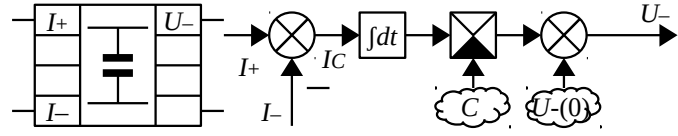


Рис. 5 Содержание элемента «емкость»

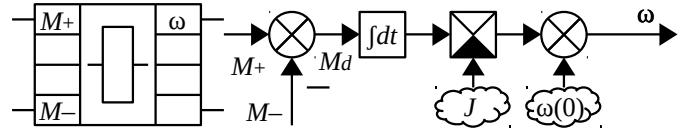


Рис. 6 Содержание элемента «инерционность»

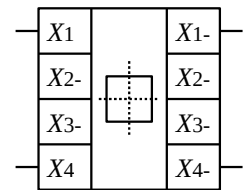


Рис. 2 Общий вид унифицированного блока визуальной математической модели

$$L \frac{dI_-}{dt} = U_+ - U_- - R_L \cdot I_- . \quad (1)$$

На рисунке 5 приведены структурный элемент «емкость» и его визуальная модель. С точки зрения визуальной причинно-следственной модели емкость является преобразователем входного –  $I_+$  и выходного –  $I_-$  токов четырехполюсника с емкостью –  $C$  в напряжение –  $U_-$ .

Визуальная модель рисунка 5 соответствует дифференциальному уравнению (2).

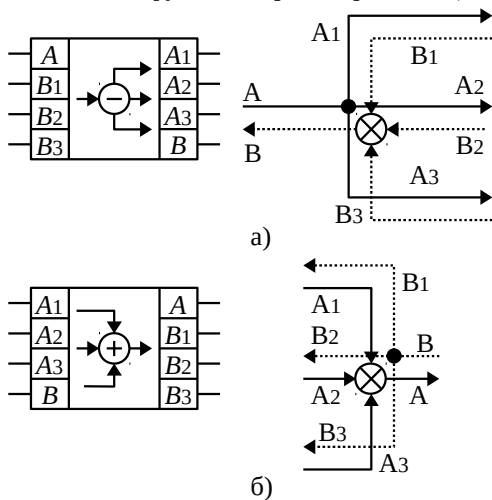
$$C \frac{dU_-}{dt} = I_+ - I_- . \quad (2)$$

На рисунке 6 приведены структурный элемент «инерционность» и его визуальная модель. С точки зрения визуальной причинно-следственной модели это эквивалентный маховик с моментом инерции  $J$ , который является преобразователем вращающего –  $M_+$  и тормозящего –  $M_-$  моментов в угловую скорость –  $\omega$ .

Визуальная модель рисунка 6 соответствует дифференциальному уравнению (3).

$$J d \frac{\omega}{dt} = M_+ - M_- . \quad (3)$$

Особое внимание нужно уделить узловым элементам структуры. На рисунке 7 приведены узловые структурные элементы и их визуальные модели: а) распределительный узел и б) консолидирующий узел. Через энергетический узел, с точки зрения схемы причин-следствий, передаются как прямые, так и обратные связи. На рисунке 7 прямые связи показаны сплошной линией, а обратные – пунктирной линией. В самом узле осуществляются две функции: транслирование (жирная точка) и суммирование (знак суммирования).



а)

б)

В распределительном узле реализуются выражения:

$$A = A_i, i = 1, \dots, n , \quad (4)$$

$$B = \sum_{i=1}^n B_i, i = 1, \dots, n . \quad (5)$$

В консолидирующем узле реализуются выражения:

$$B = B_i, i = 1, \dots, n , \quad (6)$$

$$A = \sum_{i=1}^n A_i, i = 1, \dots, n . \quad (7)$$

где  $n$  – число выходных или входных каналов преобразования энергии, соответственно.

Оба узла «зеркально» противоположны друг другу. Причем, в распределительном узле прямая связь транслируется, а обратная суммируется. В консолидирующем узле – наоборот. Анализ структуры узловых элементов различной природы и формы передаваемой энергии дает основание предположить, что такое правило является универсальным для любых энергетических потоков.

Рис. 7 Содержание простых узловых элементов

На рисунке 8 представлены результаты моделирования, полученные с помощью синтезированной модели (рисунк 3). На графиках обозначены:  $V1$  – скорость ветрового потока;  $W1$  – угловая скорость первичной ветротурбины;  $I_{gen}$  – ток генератора,  $P_c$  – электрическая мощность на выходе системы.

Представленные временные характеристики полностью совпадают с результатами моделирования с помощью математической модели, которая была получена обычным путем, через реализацию общей системы уравнений, что показывает работоспособность предложенной методики.

### Выводы.

1. В работе приведена методика синтеза визуальных математических моделей сложных многоканальных ветроэлектрогенерирующих систем, которая позволяет сократить время синтеза и уменьшить вероятность ошибки.

2. Модель строится в два этапа:

– построение структуры трактов преобразования мощности;

– преобразование структуры трактов в визуальную математическую модель с помощью, сформированной заранее, библиотеки стандартных блоков.

3. Формирование моделей библиотеки субблоков является отдельной комплексной задачей, при этом введенная унификация создает предпосылки для эффективной работы разработчиков в направлении развития данной методики синтеза моделей в части формирования библиотеки.

4. Модель на стадии структуры трактов преобразования мощности способствует пониманию работы многоканальной системы. Визуальная модель может быть использована для имитационного моделирования работы многоканальной ветроэлектрогенерирующей системы, а также для ее представления в форме уравнений переменных состояния для процедуры синтеза оптимальных регуляторов.

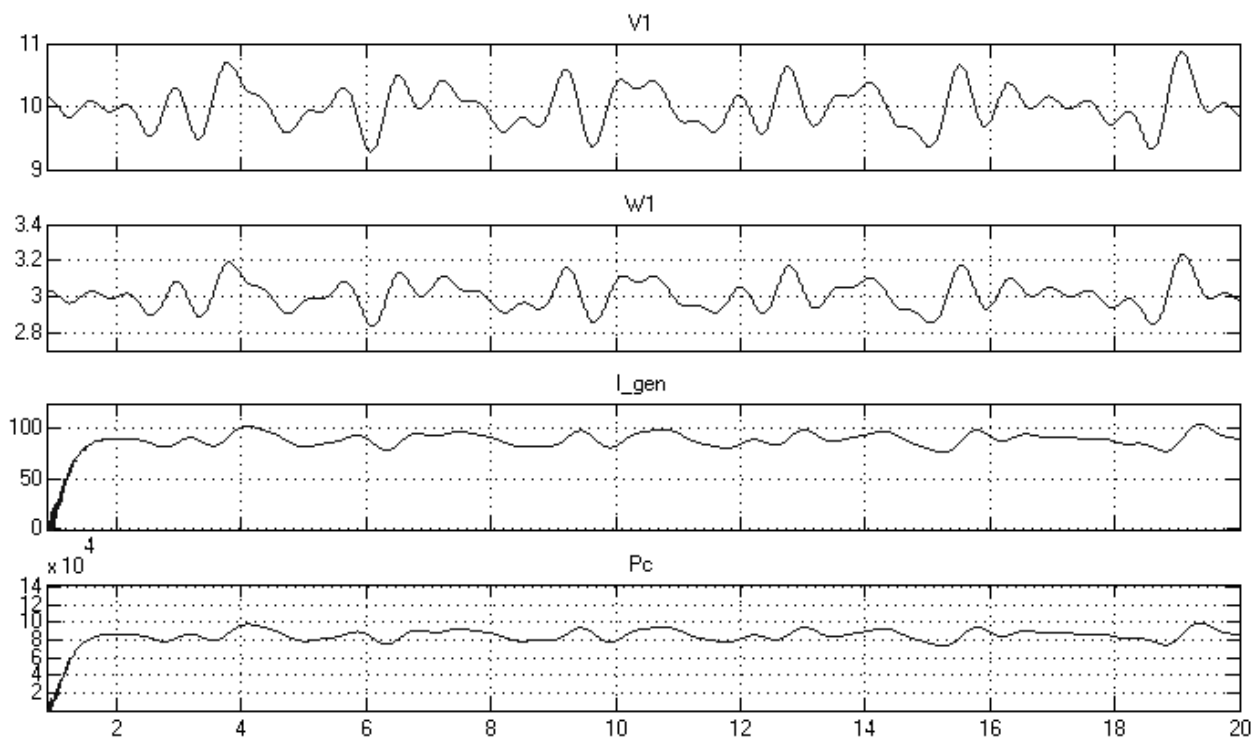


Рис. 8 Результаты моделирования электромеханической системы двуллопастной ВЭУ с аэродинамическим мультиплицированием.

**Список литературы:** 1. Голубенко Н.С. Аэродинамические особенности безмультипликаторной турбогенераторной схемы ветроэлектрической установки большой мощности // Материалы IV международной конференции «Нетрадиционная энергетика в XXI веке». – Крым, Гурзуф, – 2003. – С.125–132. 2. Тенденции развития ветроэлектрических и безмультипликаторных ветровых установок / Н.С. Голубенко, С.И. Довголюк, А.М. Фельдман, В.А. Цыганов // Нетрадиционная энергетика XXI века – материалы IV междуна. конф. – Крым- Гурзуф: – 2003. – С. 68-74. 3. Патент на винахід UA81015, МПК F03D 7/02, F03D 1/02, F03D 11/02. Вітроенергетична установка [Текст] / Н.В. Мхітарян, С.О. Кудря, І.П. Кравченко; заявник і патентовласник - Інститут відновлюваної енергетики НАН України – № a201006719, заявл. 01.06.2010; опубл. 25.06.2013, Бюл. № 12. 4. Патент на винахід US6749399, МПК F03D 1/02. Vertical array wind turbine [Текст] / William E. Heronemus, Amherst, MA; заявник і патентовласник - Ocean Wind Energy Systems, Newton, MA (US). -US 10/092,775, заявл. 07.03.2002; опубл. 15.06.2004. 5. Нурахмет Е. Е., Гафаров А. А., Бенке М. С., Ковалев Г. А., Макаренко В. А. Выбор электрогенераторов для ветроэнергетических установок // Молодой ученый. - 2016. - №28.2. - С. 68 - 79. 6. Патент на винахід UA76894, МПК F03D 1/00. Вітродвигун [Текст] / М.С. Голубенко, С.І. Довгалюк, О.Л. Кадацький, С.Д. Курдюков, С.В. Піддубний, О.М. Фельдман, В.О. Циганов; заявник і патентовласник - Товариство з обмеженою відповідальністю «Проектно-конструкторське технологічне бюро «Конкорд». – № a200500405, заявл. 17.01.2005; опубл. 05.09.2006, Бюл. № 9. 7. Четти П. Проектирование ключевых источников электроэнергии / П.Четти. Пер. с англ.– М: Энергоатомиздат, 1990. – 240 с. 8. Бураков В.В., Гулаков С.В., Прямоходовый инверторный источник питания прямого преобразования с коррекцией коэффициента мощности// Электротехника та електроенергетика. – 2013. - №1. - С. 48-51. 9. Патент на винахід US5151610, МПК F03D 9/00. Wind machine with electric generators and secondary rotors located on rotating vertical blades [Текст] / Jean St-Germain; заявник і патентовласник - Jean St-Germain. – US 07/619423, заявл. 29.11.1990; опубл. 29.09.1992.

**Bibliography (transliterated):** 1. Golubenko N.S. “Ajerodinamicheskie osobennosti bezmul'tiplikatornoj turbogeneratornoj shemy vetrojelektricheskoj ustanovki bol'shoj moshhnosti”. *Materialy IV mezhdunarodnoj konferencii «Netradicijonnaja jenergetika v XXI veke»*.(2003): 125–132. Print. 2. N.S. Golubenko, S.I. Dovgoljuk, A.M. Fel'dman, V.A. Cyganov. “Tendencii razvitija vetrojelektricheskih i bezmul'tiplikatornyh vetrovyh ustanovok”. *Netradicijonnaja jenergetika XXI veka – materialy IV mezhdun. Konf.* (2003): 68-74. Print. 3. Patent na vinahid UA81015, MPK F03D 7/02, F03D 1/02, F03D 11/02. Vitroenergetichna ustanovka [Tekst] / N.V. Mhitarjan, S.O. Kudrja, I.P. Kravchenko; zajavnik i patentovlasnik - Institut vidnovljuvanoї energetiki NAN Ukraїni – № a201006719, zajavl. 01.06.2010; opubl. 25.06.2013, Bjul. № 12. 4. Patent na vinahid US6749399, MPK F03D 1/02. Vertical array wind turbine [Tekst] / William E. Heronemus, Amherst, MA; zajavnik i patentovlasnik - Ocean Wind Energy Systems, Newton, MA (US). –US 10/092,775, zajavl. 07.03.2002; opubl. 15.06.2004. 5. Nurahmet E. E., Gafarov A. A., Benke M. S., Kovalev G. A., Makarenko V. A. “Vybor jelektrogeneratorov dlja vetrojenergeticheskix ustanovok” *Molodoj uchenyj.* (2016): №28.2. — S. 68-79 Print. 6. Patent na vinahid UA76894, MPK F03D 1/00. Vitrodvigun [Tekst] / M.S. Golubenko, S.I. Dovgaljuk, O.L. Kadac'kij, S.D. Kurdjukov, S.V. Piddubnij, O.M. Fel'dman, V.O. Ciganov; zajavnik i patentovlasnik - Tovarisstvo z obmezhenuju vidpovidal'nistju «Proektno-konstruktors'ke tehnologichne bjuro «Konkord». – № a200500405, zajavl. 17.01.2005; opubl. 05.09.2006, Bjul. № 9. 7. Chetti P. “Proektirovanie ključevyh istochnikov jelektrojenergii”. P.Chetti. M: Jenergoatomizdat,Book, 1990. –240s. Print 8. Burlakov V.V., Gulakov S.V.,Prjamohodovij invertornyj istochnik pitaniya prjamogo preobrazovanija s korrekciej koeficienta moshhnosti:. *Elektrotehnika ta elektroenergetika.* (2013):48-51. Print 9. Patent na vinahid US5151610, MPK F03D 9/00. Wind machine with electric generators and secondary rotors located on rotating vertical blades [Tekst] / Jean St-Germain; zajavnik i patentovlasnik - Jean St-Germain. – US 07/619423, zajavl. 29.11.1990; opubl. 29.09.1992

Поступила 30.04.2017