

УДК 621.548

А. М. СУББОТА, В. Г. ДЖУЛГАКОВ

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского “ХАИ”, Украина*

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОСЬЮ ВРАЩЕНИЯ

*Рассмотрены вопросы, связанные с повышением эффективности функционирования ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения. Представлен обзор вариантов конструктивного исполнения ветроэнергетических установок указанного типа. Предложен принцип повышения эффективности ветроэнергетической установки за счет синхронного управления положением лопастей в зависимости от направления и скорости ветрового потока. Реализация указанного принципа подробно рассмотрена для четырехлопастной ветротурбины. Сформирована функциональная схема системы управления ориентацией лопастей. Выполнено компьютерное моделирование функционирования канала системы управления для режима начальной установки лопастей при изменении направления ветра с регуляторами различных типов. Сформирована система правил для настройки нечеткого регулятора. Выполнено сравнение показателей качества системы управления с пропорционально-дифференциальным и нечетким регулятором.*

**Ключевые слова:** ветроэнергетическая установка с вертикальной осью вращения, ориентация лопасти, ветровой поток, начальная установка лопасти, нечеткий регулятор.

### Введение

В настоящее время вряд ли найдется хотя бы один здравомыслящий человек, который не понимает, что в недрах Земли имеется ограниченный запас органического топлива (угля, нефти, газа и т.п.), который, к сожалению, безжалостно уничтожается человечеством. Это приводит к необратимым процессам в среде обитания. Вопрос сводится, естественно, к следующему: успеет ли человечество к моменту наступления «энергетического голода» обеспечить себя в достаточном количестве альтернативными источниками энергии?

В большинстве высокоразвитых стран уделяется значительное внимание развитию альтернативных источников энергии и особенно возобновляемых, таких, как гидроэнергетика, морская энергетика (базирующаяся на использовании энергии волн, приливов), солнечная энергетика, ветроэнергетика, биоэнергетика, геотермальная энергетика.

Учитывая то обстоятельство, что в некоторых географических районах Земли наличие погоды с устойчивым ветром в течение года составляет более 300 суток при среднегодовой скорости ветра  $V_{ср.г.}=(5..6)$  м/с, монтаж отдельных ветроустановок и формирование ветропарков, работающих на единую энергосеть является экономически оправданным. Так, к 2030 году в отдельных странах планируется доведение доли, приходящейся на выработку ветровой энергии, до (20...50)% в общем национальном энергобалансе (Испания – до 20%, США – до 25%,

Германия – до 30%, Дания – до 50%) [1]. В Украине к 2030 году долю ветровой энергии планируется вывести на уровень от 20% до 35%.

Таким образом, повышение эффективности эксплуатации ветроэнергетической установки является важной задачей, решение которой может быть найдено как в сфере изменения конструкции установки, так и в использовании новых принципов управления ею.

### 1. Постановка задачи исследования

Как известно, за последнее время наиболее распространенными вариантами ветроэнергетических установок являются ветроэнергетические установки (ВЭУ) с горизонтальной или вертикальной осью вращения. С точки зрения минимума экономических затрат, связанных как с проектированием, так и с обслуживанием ВЭУ, более экономичными являются ВЭУ с вертикальной осью вращения. Этому способствует наличие элементов механики, электроники, средств доступа к отдельным узлам и агрегатам на земле, а не на высоте, например 60...80 м для ВЭУ мегаваттной мощности с горизонтальной осью вращения. Однако, несмотря на явные преимущества ВЭУ с вертикальной осью вращения ротора, для их эффективной работы необходимо решить такие задачи, как учет не только величины скорости ветра, но и его направления по отношению к каждой лопасти, входящей в состав ветротурбины. Таким образом, эффективность эксплуатации таких

ВЭУ определяется качеством проектирования систем управления положением лопастей ВЭУ по отношению к величине и направлению ветра, а также по отношению к требуемой скорости вращения ветрогенератора. Учитывая вышесказанное, целью данной работы является синтез структуры системы управления ВЭУ с вертикальной осью вращения, обеспечивающей наиболее эффективное использование ВЭУ при выработке электроэнергии.

## 2. Обзор вариантов конструктивного исполнения ВЭУ

Анализ ВЭУ с вертикальной осью вращения показывает, что эффективность их использования в целом зависит от их конструктивного исполнения и наличия системы управления положением лопастей по отношению к величине и направлению ветрового потока.

Несмотря на то, что первые вертикально-осевые ВЭУ были сконструированы в 1925-1929 годах (ротор Дарье во Франции в 1925 г., в США – 1926 г., ротор Савониуса – в 1929 г.), из-за ошибочного мнения о невозможности получения быстроходности  $Z > 1$ , в то время как для существующих горизонтально-осевых установок  $Z > 5$ , данный тип ВЭУ на протяжении более 40 лет вообще не разрабатывался. Однако к 70-м годам прошлого века американские и английские специалисты доказали, что быстроходность ВЭУ с ротором Дарье может достигать величины  $Z=6$  и более, а КПД использования ветра находится на уровне ВЭУ с горизонтальной осью вращения ветротурбины. Кроме того, при определенном расположении лопастей по окружности такие ВЭУ не зависят от направления ветра.

В связи с этим на сегодняшний день имеется огромное многообразие машинных агрегатов, механизмов и установок, которые «ловят» ветер и превращают его в полезную электрическую энергию [2 – 6, 9 – 12].

На данный момент одной из самых эффективных ВЭУ с вертикальной осью вращения с нерегулируемым положением лопастей является ВЭУ, разработанная в 2008 г., представляющая собой объединение двух цилиндрических конструктивов с тремя несущими лопастями каждый [10]. При этом для 3-киловаттной ВЭУ при размере ометаемой площади  $24 \text{ м}^2$  и номинальной скорости ветра  $10,4 \text{ м/с}$  реальная выходная мощность составляет  $3305 \text{ Вт}$ . За счет использования лопастей типа SRCV-2035 или NASA-0,015 достигается КПД до 45%.

С целью повышения эффективности использования ВЭУ с вертикальной осью в работе [7] предложен способ регулирования положения лопастей за счет смещения оси их подвеса относительно оси

симметрии (или оси инерции). Однако такому способу присущи серьезные недостатки, связанные, например, с возникновением автоколебаний (при действии порывов ветра, изменении его величины и направления), недостаточной диссипацией энергии в системе, повышенным шумом вследствие «хлопания» лопастей и т.д.

Однако за исключением работ [7, 8], все имеющиеся ветроэнергетические установки относятся к ВЭУ с пассивными методами регулирования, т.е. лопасти закреплены неподвижно относительно ротора. Отсутствие системы управления положением лопастей в зависимости от изменения как величины, так и направления скорости ветрового потока при современном уровне развития систем управления не может обеспечить возрастающие требования к эффективности использования энергии ветра.

Однако применение установок с изменяемым положением лопастей требует специальных подходов к управлению этим процессом.

## 3. Формирование требований к текущему положению лопастей ветроколеса

Мощность, развиваемая ветроколесом  $P_K$  данной конструктивной схемы, зависит от мощности, развиваемой каждой из лопастей, т.е.

$$P_K = \sum_{i=1}^4 P_i, \quad (1)$$

где  $P_i$  – мощность, развиваемая каждой лопастью.

Для максимальной эффективности ВЭУ необходимо, чтобы лопасти в любой момент времени создавали оптимальное аэродинамическое сопротивление и максимально использовали силу ветра  $F_B$  для вращения ветроколеса в определенную сторону:

$$F_B = \frac{mV_B^2}{2}, \quad (2)$$

где  $m$  – масса воздушного потока,

$V_B$  – скорость ветрового потока.

Указанное условие может быть выполнено при таком положении лопастей 1.4, как показано на рис. 1.

Учитывая, что скорость и направление ветрового потока постоянно меняются во времени, для обеспечения заданных положений лопастей при указанных направлениях ветра  $\bar{V}_B$  и угловой скорости

вращения ветроколеса  $\bar{\omega}_K$  необходима соответствующая система управления. При этом для нормального функционирования системы управления положением лопастей необходимо знать не только информацию о  $\bar{V}_B$ ,  $\bar{V}_K$  и  $\bar{\omega}_K$ , но и об их влиянии на текущее угловое положение лопастей  $\alpha$ .

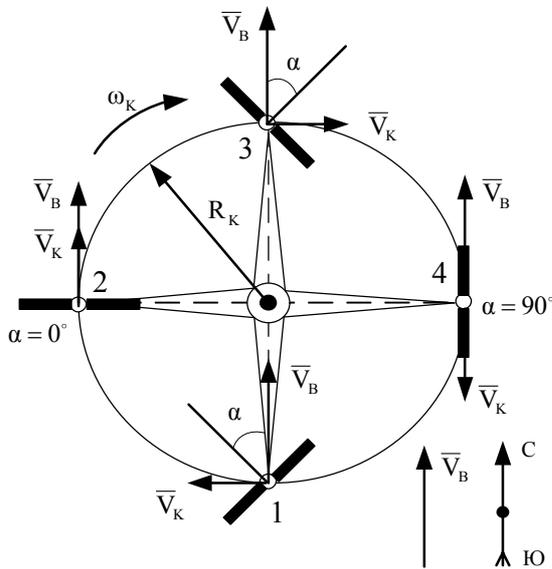


Рис. 1. Распределение векторов скорости ветра и скорости ветроколеса применительно к текущему положению лопастей 1..4

С этой целью определим первоначально мощность  $P_{1,3}$ , развиваемую лопастями 1 и 3, согласно [8]:

$$P_{1,3} = P_1 + P_3 = 2 \frac{\rho S}{2} (V_B \cos \alpha - V_K)^2 \cdot V_K = \quad (3)$$

$$= C \cdot (V_B \cos \alpha - V_K)^2 \cdot V_K,$$

где  $C = \rho S$  – постоянная величина ( $\rho$  – плотность воздуха,  $S$  – площадь лопасти);

$V_K$  – линейная скорость лопасти ветроколеса;

$\alpha$  – угол между перпендикуляром к плоскости лопасти ветроколеса и направлением скорости ветра  $\bar{V}_B$ .

Найдя частную производную выражения (3) по углу  $\alpha$ , получим

$$\frac{\partial P_{1,3}}{\partial \alpha} = C \cdot (V_B \cos \alpha - V_K) \cdot V_K \cdot \sin \alpha. \quad (4)$$

Приравняв последнее выражение нулю и решая его относительно  $\alpha$ , получим

$$\alpha = \arccos\left(\frac{V_K}{V_B}\right). \quad (5)$$

Поскольку

$$V_K = \omega_K R, \quad (6)$$

где  $\omega_K$  – угловая скорость ветроколеса,

$R$  – радиус ветроколеса,

окончательно имеем

$$\alpha = \arccos\left(\frac{\omega_K R}{V_B}\right). \quad (7)$$

Таким образом, для установки лопастей 1 и 3 в положение, определяемое выражением (7), необходимо иметь не только датчики угловой скорости вращения колеса  $\omega_K$  и скорости ветрового потока  $V_B$  при известном в данный момент направлении, но и соответствующий вычислитель. Выражение (7) задает начальный угол установки лопастей 1 и 3, относительно которого происходит постоянное вращение лопастей с угловой скоростью  $\omega_K$  при вращении ветроколеса.

При установке лопастей 1 и 3 в соответствии с выражением (7) лопасти 2 и 4 должны находиться в таком положении (см. рис. 1), чтобы лопасть 2 воспринимала максимальную силу потока ветра, т.е. её плоскость располагается перпендикулярно вектору  $\bar{V}_B$ , а плоскость лопасти 4 – параллельно этому вектору с целью обеспечить минимальное аэродинамическое сопротивление.

В случае изменения направления ветрового потока система управления вырабатывает соответствующий сигнал по времени разворота каждой из лопастей с учетом как угловой скорости вращения ветроколеса  $\omega_K$ , так и угла  $\varphi$  изменения направления ветрового потока (рис. 2 и табл. 1).

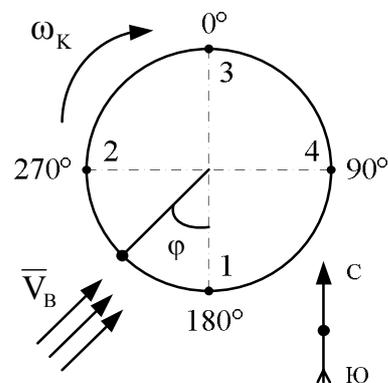


Рис. 2. Изменение направления первоначального ветрового потока на угол  $\varphi$

Таблица 1  
Временная задержка на выполнение разворота лопастей при изменении направления ветра

Направление ветрового потока	Величина времени задержки
$0^\circ$	$\tau = 0$
$0^\circ < \varphi < 90^\circ$	$\tau = \omega / \varphi$
$90^\circ < \varphi < 180^\circ$	$\tau = \omega / (\varphi - 90^\circ)$
$180^\circ < \varphi < 270^\circ$	$\tau = \omega / (\varphi - 180^\circ)$
$270^\circ < \varphi < 360^\circ$	$\tau = \omega / (\varphi - 270^\circ)$

#### 4. Функциональная схема системы управления ориентацией лопастей

С учетом вышесказанного, упрощенная функциональная схема системы управления ориентацией лопастей ВЭУ с вертикальной осью вращения при наличии 4-х лопастей представлена на рис. 3. Ориентация лопастей показана для случая их предварительной установки при направлении ветрового потока «юг-север». Упрощение схемы состоит в том, что в каналах управления лопастями А, Б, В и Г не показаны измерители углового положения и угловой скорости лопастей.

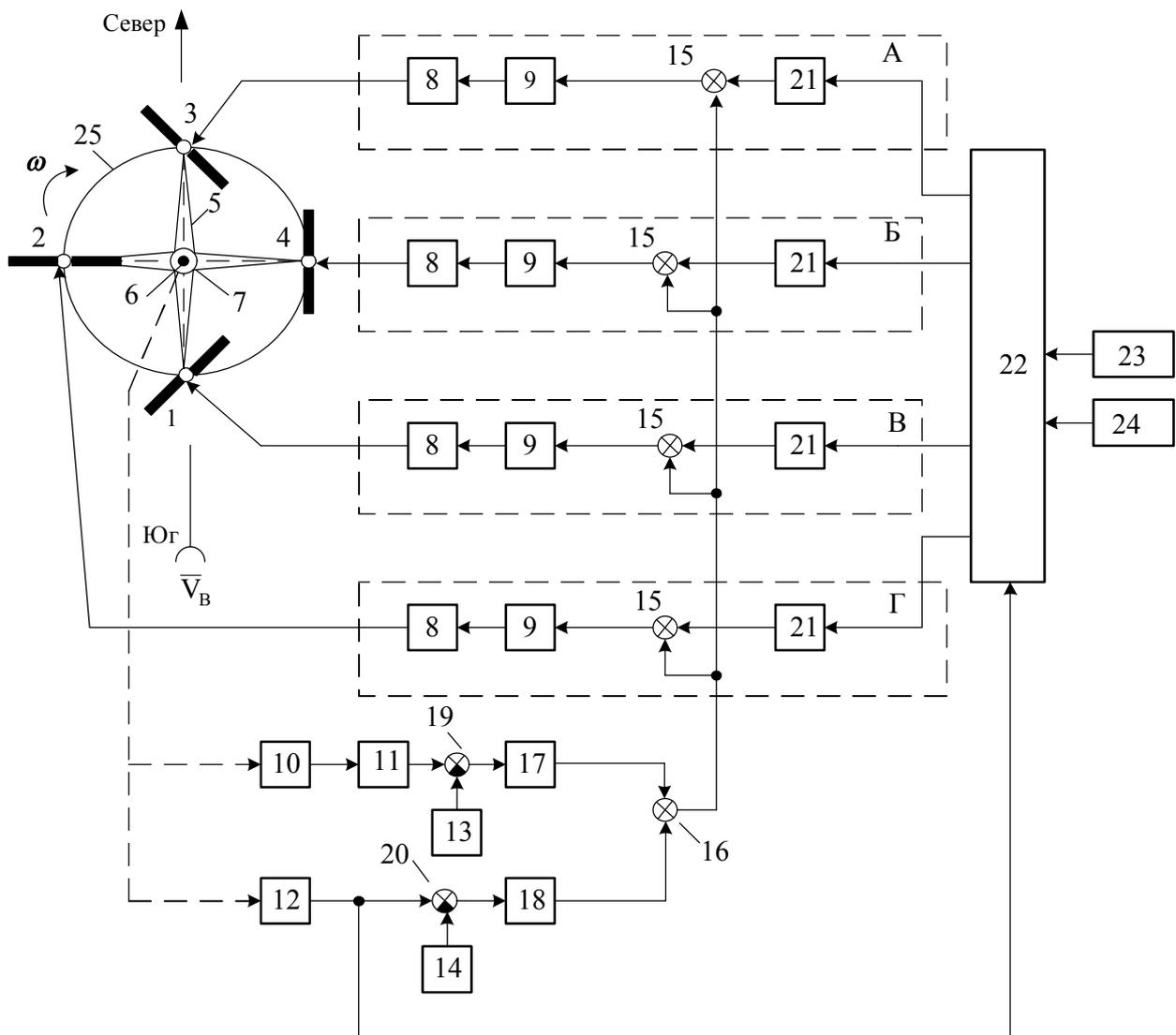


Рис. 3. Система управления ориентацией лопастей ВЭУ с вертикальной осью вращения при наличии 4-х лопастей: 1..4 – лопасти, 5 – траверса, 6 – вертикальная опора, 7 – вертикальный вал, 8 – сервопривод, 9 – усилитель мощности, 10 – электрогенератор, 11 – датчик мощности, 12 – датчик угловой скорости, 13 – задатчик мощности, 14 – задатчик угловой скорости, 15 – сумматор, 16 – сумматор, 17, 18 – усилители, 19, 20 – элементы сравнения, 21 – элемент транспортной задержки, 22 – блок управления, 23 – датчик скорости ветра, 24 – датчик направления ветра

Как видно из рис. 3, схема имеет четыре идентичных канала управления ориентацией лопастей в зависимости от скорости и направления ветра, а также от расчетных значений проектной мощности и угловой скорости вращения ветрогенератора. Для этих целей предусматривается наличие в контуре обратных связей системы управления соответствующих датчиков (11, 12, 23, 24) и задатчиков (13, 14).

Выбор соответствующих типов регуляторов, их законов управления и анализ показателей качества рассматриваются ниже.

На рис. 4 приведена функциональная схема одного из 4-х каналов управления угловым положением лопасти, занимающей определенное место на ветротурбине. Согласно схеме, элементы 1-4 выполняют роль задатчика  $\alpha_{зад}$  – заданного положения лопасти в зависимости от величины скорости ветрового потока  $V_B$  и вращения ветротурбины  $\omega_K$ . При этом управление угловым положением лопасти осуществляется в соответствии с выбранным пропорционально-дифференциальным (ПД) законом

$$\delta_{СП} = K_{\alpha}(\alpha - \alpha_{зад}) + K_{\dot{\alpha}}\dot{\alpha}, \quad (8)$$

где  $\delta_{СП}$  – угол поворота выходного вала сервопривода;

- $\alpha_{зад}$  – заданное значение угла поворота лопасти;
- $\alpha$  – текущее значение угла поворота лопасти;
- $\dot{\alpha}$  – угловая скорость поворота лопасти;
- $K_{\alpha}, K_{\dot{\alpha}}$  – коэффициенты преобразования.

Параметр  $\alpha_{зад}$  постоянно вычисляется в процессе функционирования ВЭУ в блоке 4 в соответствии с выражением (7) и корректируется по табл. 1.

Реализация данного ПД-закона (8) обеспечивается замыканием системы управления обратными связями при помощи элементов 9, 10 и 11 (см. рис. 4). Предполагается, что регулятор будет реализован на основе микроконтроллера.

Дальнейшему исследованию подлежит схема канала системы управления углом поворота лопасти, показанная на рис. 4, поскольку от её работы зависит повышение эффективности ветроустановки. В соответствии со схемой рис. 4 построена схема моделирования в среде Matlab/Simulink, приведенная на рис. 5. Численные значения параметров модели сформированы на основании экспертных оценок согласно анализу проведенных ранее предварительных разработок.

В последнее время наряду с регуляторами классического типа (П, ПИ, ПД, ПИД) все большее распространение при разработке сложных малоизученных динамических объектов получают нечеткие логические регуляторы (НЛР). Данные регуляторы не требуют излишне высокой точности получения математических моделей объектов и вместе с тем позволяют повысить качество управления и обеспечивают более высокую устойчивость систем к возмущающим факторам. На рис. 5 наряду с ПД-регулятором приведена машинная модель рассматриваемой системы с НЛР.

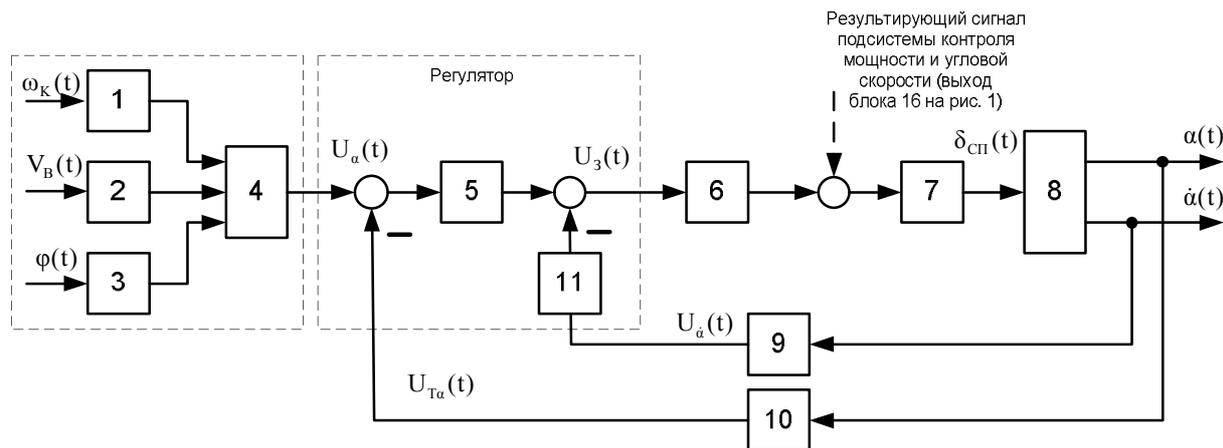


Рис. 4. Функциональная схема канала системы управления углом установки лопасти:

- 1 – датчик угловой скорости ветроколеса, 2 – датчик скорости ветра, 3 – датчик направления ветра,
- 4 – вычислитель требуемого угла  $\alpha_{зад}$  по выражению (7), 5 – усилитель рассогласования согласно (8),
- 6 – усилитель мощности, 7 – сервопривод, 8 – лопасть, 9 – датчик угловой скорости лопасти,
- 10 – датчик угла поворота лопасти, 11 – усилитель сигнала угловой скорости по (8)

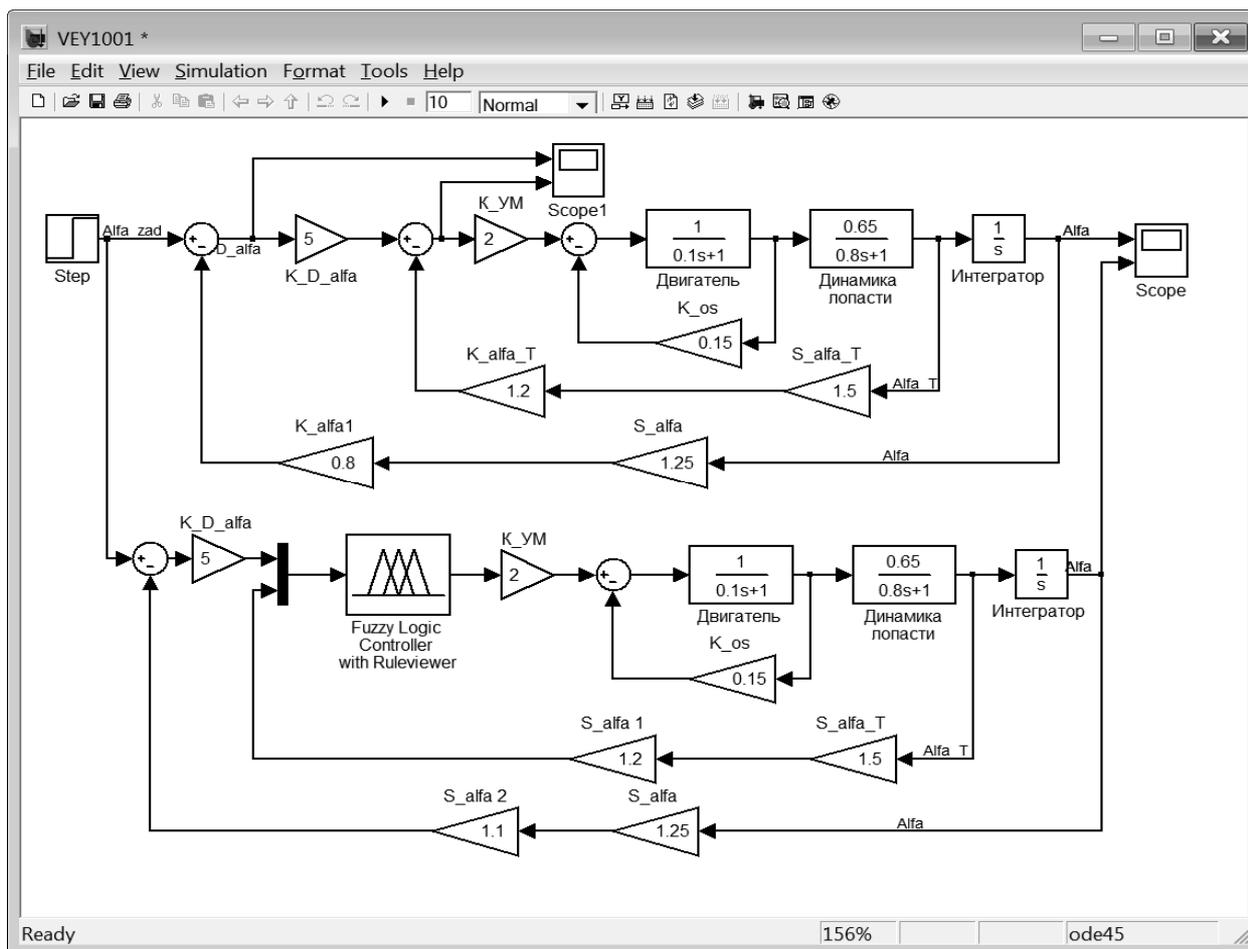


Рис. 5. Схема моделирования канала системы управления углом установки лопасти (параллельно включены для исследования схемы с ПД-регулятором и с нечетким регулятором)

Исследования применимости ПД-закона управления во временной области показывает, что переходный процесс протекает плавно, без перерегулирования, но за достаточно короткое время. В данном случае наличие большого быстродействия может отрицательно сказаться на работе исполнительных механизмов.

Кроме того, в процессе эксплуатации системы на ее функционирование могут в значительной степени влиять неучтенные турбулентные потоки ветра, аэродинамическое сопротивление лопасти, изменяющееся в результате ее вращения и т.д. Таким образом, возникающий ряд вредных явлений, которые достаточно сложно учесть, заставляет искать новые пути построения системы управления. На наш взгляд, в этой ситуации наиболее целесообразным является применение нечеткого логического регулятора (НЛР).

С учетом данного обстоятельства возникает задача сравнения показателей качества при построении рассматриваемой системы управления на базе как классического ПД-регулятора, так и на основе НЛР.

Для построения блоков, входящих в структуру НЛР, был выбран алгоритм Мамдани с треугольными функциями принадлежности. Сформированные правила логического вывода приведены в табл. 2 и соответственно на рис. 6 – 10 для входов блока фаззификации, блока выхода – дефаззификации и блока правил преобразования нечетких входов в управляющий сигнал.

Таблица 2

№	Лингвистические переменные		
	Входные		Выходная
	$\alpha$	$\dot{\alpha}$	
1	Z	none	Z
2	N	Z	N
3	P2	Z	P
4	P3	Z	P
5	P2	none	P
6	P3	P	P

В табл. 2 введены следующие обозначения: Z – нулевое значение (zero); N – отрицательное значение (negative); P – положительное значение (positive); P2 – средний уровень положительного

(middle positive); P3 – большой уровень положительного значения (big positive); none – безразличное значение;  $\alpha$  и  $\dot{\alpha}$  – угол и угловая скорость поворота лопасти,  $y$  – сигнал управления, сформированный регулятором.

Результаты моделирования показывают, что система управления положением лопастей с нечетким логическим регулятором может обеспечить более гладкий переходный процесс – без перерегулирования и с большим временем переходного процесса, чем для системы с ПД-регулятором, и, следовательно, снизить требования к быстродействию исполнительных механизмов. Переходный процесс без перерегулирования способствует также увеличению времени эксплуатации исполнительных механизмов и повышению надежности всего оборудования системы управления ВЭУ.

Результаты моделирования во временной области для обоих регуляторов представлены на рис. 11.

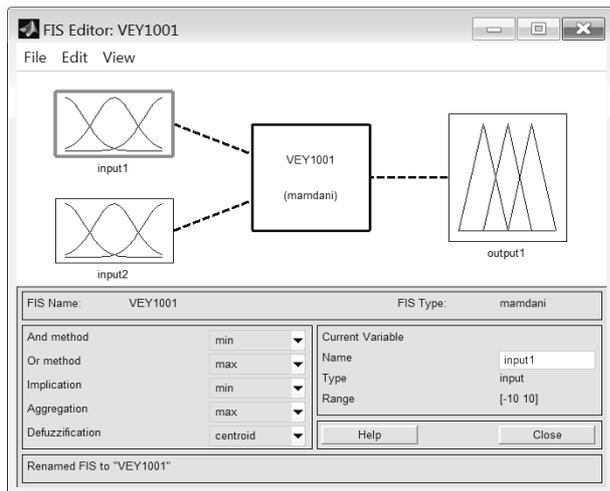


Рис. 6. Общая структура нечеткого регулятора

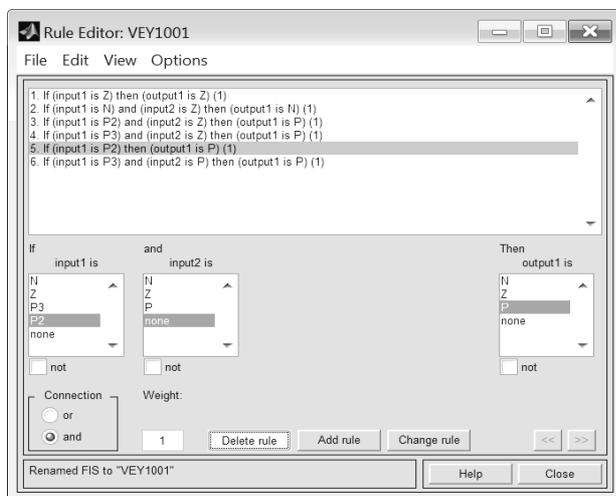


Рис. 7. Окно правил нечеткого регулятора

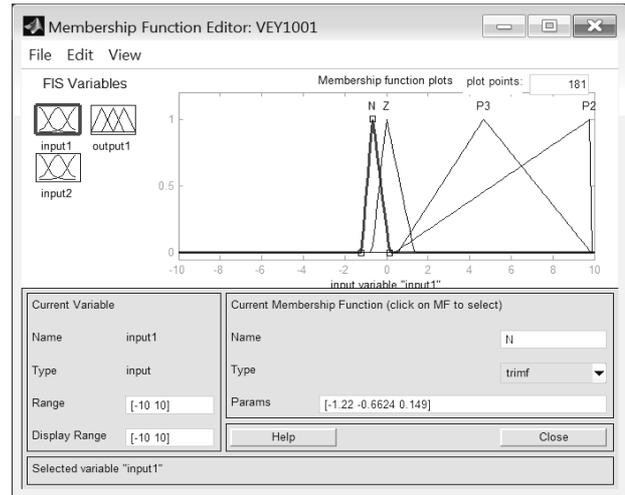


Рис. 8. Формирование функций принадлежности для входа рассогласования угла установки

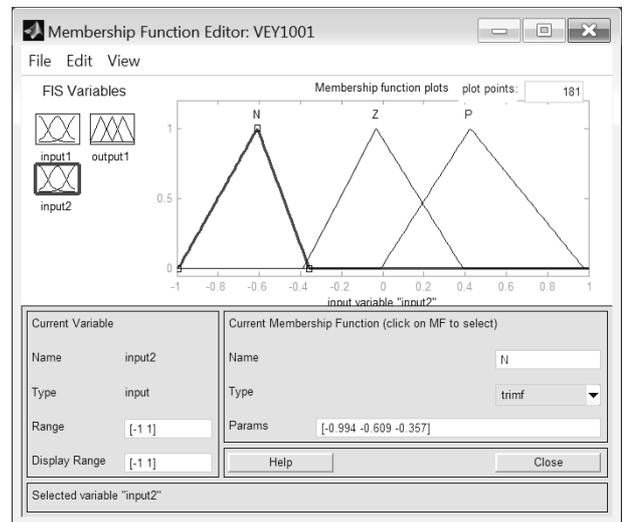


Рис. 9. Формирование функций принадлежности для входа угловой скорости установки лопасти

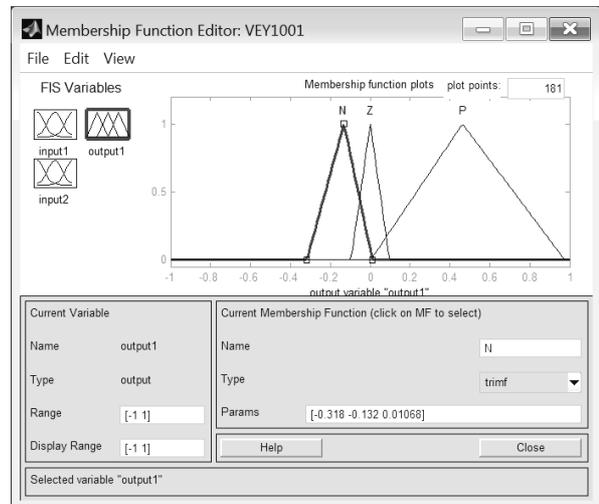


Рис. 10. Формирование функций принадлежности для сигнала управления

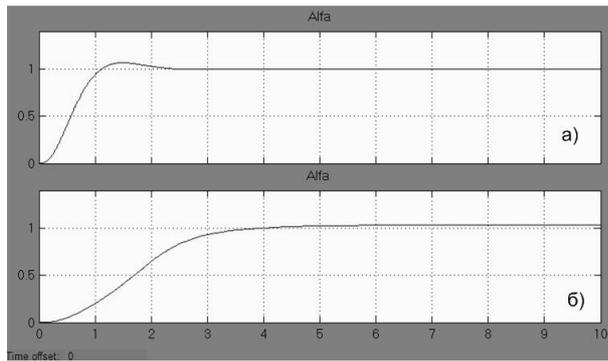


Рис. 11. Переходные процессы по углу отклонения лопасти  $\alpha$  в системе управления для контуров с ПД- (а) и нечетким (б) регуляторами

Результаты моделирования показывают, что система управления положением лопастей с нечетким логическим регулятором может обеспечить более гладкий переходный процесс – без перерегулирования и с большим временем переходного процесса, чем для системы с ПД-регулятором, и, следовательно, снизить требования к быстродействию исполнительных механизмов. Переходный процесс без перерегулирования способствует также увеличению времени эксплуатации исполнительных механизмов и повышению надежности всего оборудования системы управления ВЭУ.

### Заключение

1. На основании анализа существующих принципов повышения эффективности использования ВЭУ с вертикальной осью вращения предложен принцип управления положением каждой отдельной лопасти в зависимости от скорости и направления ветрового потока.

2. Показано, что повышение эффективности использования таких ВЭУ может быть достигнуто за счет разработки систем регулирования положением лопасти как на базе ПД-регуляторов, так и на основе нечетких логических регуляторов при их соответствующей настройке.

3. Результаты компьютерного моделирования совместной работы ВЭУ с ПД-регулятором и нечетким логическим регулятором показали, что при использовании любого из регуляторов при их настройке можно добиться практически одинаковых показателей качества: времени переходного процесса, перерегулирования и точности в установившемся режиме. Поскольку нечеткий регулятор обладает адаптивными свойствами, он является более предпочтительным для систем, в которых управляемые объекты участвуют в сложном движении.

### Литература

1. Кривцов, В. С. Неисчерпаемая энергетика. Кн. 1. Ветрогенераторы. [Текст] / В. С. Кривцов, А. М. Олейник, А. И. Яковлев. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», Севастополь : Севаст. нац. политехн. ун-т, 2003. – 400 с.
2. Зубова, Н. В. Основные принципы управления ВЭУ [Текст] / С. Н. Уралов, Н. В. Зубова // Научный вестник НГТУ. – Новосибирск : изд-во НГТУ, №3 (48), 2012. – С. 153-161.
3. Hu, W. Advanced Wind Turbine Technologies [Text] / W. Hu. – Springer International Publishing, 2018. – 351 p.
4. Anikin, A. S. Comparative analysis of wind turbine control strategies [Text] / A. S. Anikin, A. S. Martyanov, N. A. Martyanov // Procedia Engineering: International Conference on Industrial Engineering ICIE-2015. – 2015. – Vol. 129. – P. 607-614.
5. Luo, N. Wind Turbine Control and Monitoring [Text] / N. Luo, Y. Vidal, L. Acho. – Springer, Switzerland, 2014. – 466 p.
6. Development of Guidance for the Construction of Wind Turbines Using Serap Materials [Text] / R. M. Rodrigues, J. D. Piper, S. S. Bhattacharya, S. A. Wilson, C. H. Birzer // Procedia Engineering. Vol. 159, 2016. – P. 292-299.
7. Lio, W. H. A. Blade-Pitch Control for Wind Turbine Load Reduction [Text] / W. H. A. Lio // Springer, Cham, 2018. – 174 p.
8. Пат. 56587 UA, МПК F03D 3/06, F03D 7/06. Віротурбіна з механізмом орієнтації лопатей до навігаючого потоку [Текст] / Кулік, А. С., Субота, А. М., Гаєвая, Д. О., Пономаренко, Т. І., Савченко Т. Г. – № u2010 05650 ; заявл. 11.05.2010 ; опубл. 25.01.2011, Бюл. № 2.
9. Горелов, Д. Н. Аэродинамика ветроколес с вертикальной осью вращения. [Текст] / Д. Н. Горелов. – Омский филиал института математики им. С. Л. Соболева СО РАН. – Омск : Полиграфический центр КАН, 2012. – 68 с.
10. Кирпичникова, И. М. Ветроэнергетическая установка с вертикальной осью вращения. [Текст] / И. М. Кирпичникова, Е. В. Соломин // Вестник Южно-Уральского Государственного университета. Серия «Энергетика». – 2008. – № 26, Вып. 10. – С. – 32–35.
11. Пат. 2525998 РФ. F03D/06. Способ управления лопастями ротора ветряка с вертикальной осью вращения [Текст] / Каушманов, И. А. – № 20122149268/06 ; заявл. 19.11.2012 ; опубл. 20.08.2014, Бюл. №23.
12. Hau, E. Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics [Text] / E. Hau. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2006. – 783 p.
13. Bianchi, F. D. Wind Turbine Control Systems. Principles, Modelling and Gain Scheduling Design [Text] / F. D. Bianchi, H. de Battista, R. J. Mantz. – Springer, London, 2007. – 208 p.

## References

1. Krivcov, V. S., Olejnik A. M., Jakovlev A. I. *Neischerpaemaja jenergetika. Kn. 1. Vetrogeneratory*. [Inexhaustible energy. Book 1. Wind turbines]. Har'kov, Nac. ajerokosm. un-t «Har'k. aviac. in-t». Publ. Sevastopol', Sevast. nac. politehn. un-t. Publ. 2003. 400 p.
2. Zubova, N. V. Osnovnye principy upravlenija VJeU. [Basic principles of control of wind turbines]. *Nauchnyj vestnik NGTU*, Novosibirsk, izd-vo NGTU, no. 3 (48), 2012, pp. 153-161.
3. Hu, W. *Advanced Wind Turbine Technologies*. Springer International Publishing, 2018, 351 p.
4. Anikin, A. S., Martyanov, A. S., Martyanov, N. A. Comparative analysis of wind turbine control strategies. *Procedia Engineering : International Conference on Industrial Engineering ICIE-2015*, 2015, vol. 129, pp. 607-614.
5. Luo, N., Vidal, Y., Acho, L. *Wind Turbine Control and Monitoring*. Springer, Switzerland, 2014, 466 p.
6. Rodrigues, R. M., Piper, J. D., Bhattacharya, S. S., Wilson, S. A., Birzer, C. H. Development of Guidance for the Construction of Wind Turbines Using Serap Materials. *Procedia Engineering*, vol. 159, 2016, pp. 292-299.
7. Lio, W. H. A. *Blade-Pitch Control for Wind Turbine Load Reduction*. Springer, Cham, 2018, 174 p.
8. Kulik, A. S., Subota, A. M., Hayevaya, D. O., Ponomarenko, T. I., Savchenko, T. H. *Vitroturbina z mekhanizmom oriyentatsiyi lopatey do nabihayuchoho potoku*. [Wind turbine with the mechanism of the orientation of the blades to the incoming flow]. Patent UA for utility model no. 56587, MPK F03D 3/06, F03D 7/06.
9. Gorelov, D. N. *Ajerodinamika vetrokoles s vertikal'noj os'ju vrashhenija*. [Aerodynamics of wind turbines with a vertical axis of rotation]. Omskij filial instituta matematiki im. S. L. Soboleva SO RAN, Omsk, Poligraficheskij centr KAN, 2012. 68 p.
10. Kirpichnikova, I. M., Solomin, E. V. *Vetro-jenergeticheskaja ustanovka s vertikal'noj os'ju vrashhenija*. [Wind power plant with a vertical axis of rotation]. *Vestnik Juzhno-Ural'skogo Gosudarstvennogo universiteta, Serija «Jenergetika»*, 2008, no. 26, vol. 10, pp. 32-35.
11. Kashmanov, I. A. *Sposob upravlenija lopastjami rotora vetrjaka s vertikal'noj os'ju vrashhenija*. [The method for controlling the rotor blades of a windmill with a vertical axis of rotation]. Patent RF no. 2525998. Cl. F03D/06.
12. Hau, E. *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2006. 783 p.
13. Bianchi, F. D., de Battista, H., Mantz, R. J. *Wind Turbine Control Systems. Principles, Modelling and Gain Scheduling Design*. Springer, London, 2007. 208 p.

Поступила в редакцію 12.01.2018, рассмотрена на редколлегии 14.02.2018

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ З ВЕРТИКАЛЬНОЮ ВІССЮ ОБЕРТАННЯ

*А. М. Субота, В. Г. Джулгаків*

Розглянуто питання, які пов'язано з підвищенням ефективності функціонування вітроенергетичної установки з вертикальною віссю обертання. Представлено огляд варіантів конструктивного виконання вітроенергетичних установок вказаного типу. Запропоновано принцип підвищення ефективності вітроенергетичної установки за рахунок синхронного управління положенням лопатей залежно від напрямку і швидкості вітрового потоку. Реалізація вказаного принципу детально розглянута для чотирьох лопатної вітротурбіни. Сформовано функціональну схему системи управління орієнтацією лопатей. Здійснено комп'ютерне моделювання функціонування каналу системи управління для режиму початкової установки лопатей при зміні напрямку вітру з регуляторами різних типів. Сформовано систему правил для налаштування нечіткого регулятора. Виконано порівняння показників якості системи управління з пропорційно-диференціальним і нечітким регулятором.

**Ключові слова:** вітроенергетична установка з вертикальною віссю обертання, орієнтація лопаті, вітровий потік, початкова установка лопаті, нечіткий регулятор.

## INCREASE OF EFFICIENCY OF WIND POWER PLANT WITH VERTICAL AXIS OF ROTATION

*A. M. Subota, V. G. Dzhulgakov*

The questions connected with increase of efficiency of functioning of a wind power plant with a vertical axis of rotation are considered. Such plants convert the energy of the wind flow into rotational energy of the generator shaft, pump or other actuators. An overview of the design options for wind turbines of this type is presented. For vertically-axial wind power plants, in comparison with horizontally-propeller ones, it is possible to increase their efficiency by providing insensitivity to wind direction change. This is possible provided that the angular position of

the blades with respect to the wind flow is continuously and purposefully changed as the wind turbine rotates. The principle of increasing the efficiency of the wind power plant is proposed due to the synchronous control of the position of the blades, depending on the direction and speed of the wind flow. The implementation of this principle is considered in detail for a four-bladed wind turbine. Depending on the direction and magnitude of the wind flow, as well as the angular velocity of rotation of the turbine, the value of the angle of the initial installation of the blades was analytically obtained, which ensures the maximum efficiency of using the wind plant. The functional scheme of the control system of the orientation of the four blades is formed. This system uses information about the current power of the generator, the rotation speed of the wind turbine, the direction and speed of the wind flow, obtained from the respective sensors. A detailed functional diagram of one channel of the control system has been constructed taking into account the initial exposure of the blade, which additionally uses information about the current angular position of the blade and the speed of its turn. Each such channel contains a proportional-differential controller or fuzzy logic controller. The proposed fuzzy controller has two inputs of linguistic variables - the angle of rotation of the blade and the speed of its rotation. As a kind of membership functions, a triangular distribution is chosen. A system of rules for adjusting the fuzzy controller has been developed. The computer simulation of the channel functioning of the control system with two types of regulators for the mode of initial setting of the blades with a change in wind direction was performed. Comparison of the quality of the control system with a proportional-differential and fuzzy controller is performed.

**Keywords:** wind power plant with a vertical axis of rotation, blade orientation, wind flow, initial setting of the blade, fuzzy controller.

**Суббота Анатолий Максимович** – канд. техн. наук, доцент, проф. кафедры систем управления летательными аппаратами, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: subota.am@gmail.com.

**Джұлғаков Виталий Георгиевич** – доцент кафедры систем управления летательными аппаратами, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: v.dzhulgakov@gmail.com.

**Subota Anatolii Maksymovych** – PhD, Assistant Professor, Professor of Dept. of Aircraft Control Systems, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: subota.am@gmail.com.

**Dzhulgakov Vitalii Georgiiovych** – Assistant Professor of Dept. of Aircraft Control Systems, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: v.dzhulgakov@gmail.com.