

УДК 621.548

Р.В. Кальныш, В.А. Попов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВНЕШНЕЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ АВТОНОМНОЙ ВЭУ ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ ВЫВОДОМ РОТОРА ИЗ-ПОД ВЕТРА

Разработаны методика и программа расчета внешней характеристики ротора (зависимость частоты вращения ротора от момента нагрузки и скорости ветра) для автономных ВЭУ, работающих по схеме регулирования мощности выводом ротора из-под ветра.

Розроблено методику та програму розрахунку зовнішньої характеристики ротора (залежність частоти обертання ротора від моменту навантаження та швидкості вітру) для автономних ВЕУ, які працюють за схемою регулювання потужності виведенням ротора з-під вітру.

The procedure and program were developed for calculation of rotor external characteristic (rotor rotation frequency as a function of load moment and wind speed) for autonomous wind power plants operating according to the scheme of power regulation by rotor withdrawal from under wind.

В последнее десятилетие мировое сообщество крайне озабочено необходимостью решения проблем, связанных с катастрофическим истощением природных невозобновляемых источников энергии и защитой окружающей среды, обусловленных недостаточным контролем их использования. По оценкам специалистов запасов нефти и газа хватит человечеству на 40–50 лет, угля – на 150–200 лет. В связи с этим проблема энергосбережения и уменьшения выбросов вредных веществ в атмосферу особенно важна. Одно из перспективных направлений решения этой проблемы – использование возобновляемых экологически чистых источников энергии (ветра, солнца, приливов морских и океанских волн), из которых наибольшее применение находит энергия ветра.

Автономная ветроэлектрическая установка может частично решить эти проблемы за счет эффективного использования энергии ветра в частных хозяйствах. Однако создание ветроэлектрических установок с высокими технико-экономическими показателями возможно лишь при наличии методической базы, в частности более точных методик расчета рабочих параметров роторов ветродвигателей и параметров регулирующих устройств. Одним из таких устройств и есть регулятор частоты вращения ротора ветродвигателя, который решает две задачи: регулирование мощности и за-

щита от разноса ВЭУ в случае выхода из строя электрооборудования. Поэтому при проектировании ВЭУ особое внимание уделяют регуляторам частоты вращения ротора.

В процессе развития малой ветроэнергетики было разработано много различных схем и конструкций регуляторов частоты вращения ротора. Все они имеют свои достоинства и недостатки [1]. Один из существующих способов регулирования мощности – вывод ротора из-под ветра, который основан на смещении осей вращения ротора и гондолы [2]. Для такой конструктивной схемы в ветроэлектрической установке могут использоваться стационарные лопасти, а значит, отсутствует механизм поворота и синхронизации лопастей, что положительно отражается на надежности установки и снижает ее стоимость. Однако при простоте конструкции аэродинамика ротора более сложна, чем у других систем регулирования мощности. Это относится к определению характеристик как ротора при косом обдуве, так и хвостового стабилизатора, параметры которого также зависят от структуры потока за работающим ротором.

Для подтверждения полученных внешних характеристик ротора используется экспериментальная ветроэлектрическая установка ВЭГ-3/20, разработанная на ГП "КБ "Южное" в рамках международного контракта по УНТЦ. Технические характе-

ристики ветроэлектрической установки ВЭГ-3/20 приведены в таблице.

Технические характеристики экспериментальной ветроэлектрической установки ВЭГ-3/20

Параметр	Значение
Номинальная мощность, кВт	3
Диаметр ветрового ротора, м	5
Номинальное число оборотов ротора, об/мин	300
Высота до оси ротора, м	18
Тип электрического тока:	
• генератора	Трехфазный
• инвертора (1,5 кВт)	Однофазный
Параметры тока: напряжение (фазное), В / частота, Гц	220 / 50
Скорость ветра, м/с:	
• рабочая	2...25
• номинальная	9
• предельная	60
Способ ориентации ветротурбины	С помощью складывающегося хвостового стабилизатора
Система ограничения мощности	Вывод ротора из-под ветра
Материал лопастей турбины	Стеклопластик
Генератор	Синхронный, на постоянных магнитах
Тип трансмиссии	Безмультипликаторная
Режим работы	Автономный

Рассмотрим принцип работы ветроэлектрической установки ВЭГ-3/20, использующей схему регулирования мощности выводом ротора из-под ветра. Система базируется на смещении оси вращения ротора относительно оси вращения гондолы и на подвеске хвостового стабилизатора в шарнире с наклонной осью. При отклонении хвостового стабилизатора от исходного устойчивого положения в шарнире возникает сила, поворачивающая гондолу в такое положение, при котором система статически устойчива.

Ветроэлектрическая установка работает следующим образом:

- при возникновении ветра хвостовой стабилизатор ориентирует на него гондолу с ротором;
- при усилении ветра осевая сила на роторе поворачивает гондолу, при этом хвостовой стабилизатор отклоняется от нижне-

го положения и возникает сила, препятствующая дальнейшему повороту гондолы. Система приходит в равновесие;

- при дальнейшем усилении ветра гондола поворачивается еще больше. Ротор попадает в зону косоугольного обдува. Рост мощности и частоты вращения прекращается;

- при штормовом ветре гондола и хвостовой стабилизатор складываются полностью. Мощность и частота вращения ротора резко падают;

- при ослаблении скорости ветра сила, действующая в шарнире стабилизатора, возвращает гондолу с ротором в положение, перпендикулярное направлению ветра, гондола и хвостовой стабилизатор раскладываются и возобновляется выработка электроэнергии.

Упрощенная кинематическая схема регулятора экспериментальной ветроэлектрической установки ВЭГ-3/20 приведена на рис. 1.

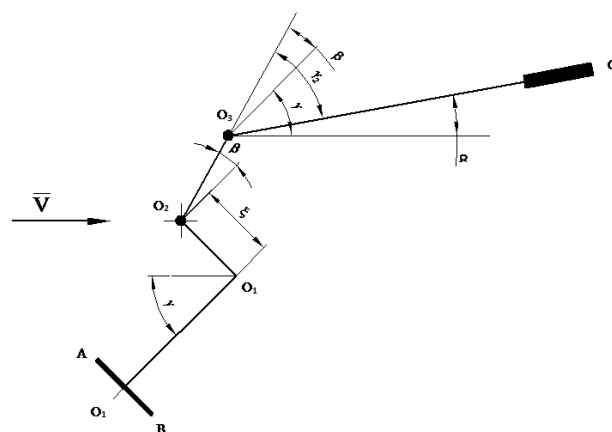


Рис. 1. Кинематическая схема регулятора: O_1O_1 – ось вращения ротора; O_2 – ось вращения ВЭУ (вертикальная); O_3 – ось вращения весового шарнира ($5-10^\circ$ от вертикали); \vec{V} – вектор скорости ветра; AB – ротор ВЭУ; γ – угол косоугольного обдува ротора; ξ – эксцентриситет установки оси ротора; O_3C – хвостовой стабилизатор; β – угол установки шарнира; α – угол атаки хвостового стабилизатора; γ_1 – угол поворота хвостового стабилизатора

Внешнюю характеристику ВЭУ (зависимость частоты вращения ротора от момента нагрузки и скорости ветра) можно определить системой уравнений статического равновесия

$$\begin{aligned}
 M_H &= M_{aM}^P(\gamma, V, \omega); \\
 M_{bO_3}^{XC}(\gamma_2) &= M_{aO_3}^{XC}(\alpha); \\
 M_{aO_2}^{PT}(\gamma) &= M_{bO_2}^{XC}(\gamma_2, \alpha, \gamma) + M_{aO_2}^{XC}(\alpha, \gamma_2, \gamma); \\
 \gamma &= \alpha + \gamma_2 - \beta,
 \end{aligned}
 \quad (1)$$

где ω – частота вращения ротора; M_H – момент нагрузки генератора, равный аэродинамическому моменту ротора M_a ; $M_{aM}^P(\gamma, V, \omega)$ – аэродинамический момент на роторе; $M_{bO_3}^{XC}(\gamma_2)$ – момент от веса хвостового стабилизатора относительно O_3 ; $M_{aO_3}^{XC}(\alpha)$ – аэродинамический момент хвостового стабилизатора относительно O_3 ; $M_{aO_2}^{PT}(\gamma)$ – аэродинамический момент осевой силы ротора относительно O_2 ; $M_{bO_2}^{XC}(\gamma_2, \alpha, \gamma)$ – момент от веса хвостового стабилизатора относительно O_2 ; $M_{aO_2}^{XC}(\alpha, \gamma_2, \gamma)$ – аэродинамический момент хвостового стабилизатора относительно O_2 ; V – скорость ветра.

Решая систему уравнений (1) для фиксированных значений V и M_H , получим внешнюю характеристику ротора ВЭГ-3/20 ($\omega = f(M_H, V)$). Однако решение системы (1) представляет значительные трудности (уравнения нелинейные, трансцендентные, параметры заданы в табличном виде). Для упрощения решения задачи внешней характеристики ротора целесообразно воспользоваться результатами испытаний ВЭГ-3/20 на технологической стойке по оценке параметров настройки (ε – эксцентриситет головки; $\gamma_{ш}$ – угол наклона шарнира хвостового стабилизатора) на параметры регулирования (P_Γ – эквивалент усилия по оси ротора; $P_{хв.см}$ – эквивалент аэродинамического момента хвостового стабилизатора). На рис. 2 приведены зависимости P_Γ , $P_{хв.см}$ от углов поворота головки γ и хвостового стабилизатора γ_2 . Фактически на испытаниях головки реализована схема для случая угла атаки на хвостовом стабилизаторе $\alpha_{хв.см} = 0$.

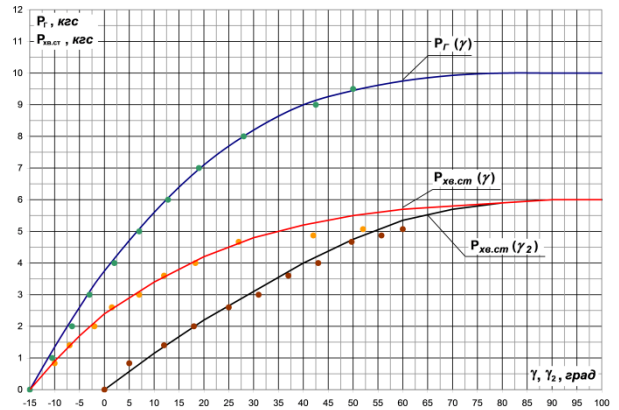


Рис. 2. Зависимость усилия на головке P_Γ и хвостовом стабилизаторе $P_{хв.см}$ от угла поворота головки γ и хвостового стабилизатора γ_2

Учитывая полученные зависимости $P_\Gamma = f(\gamma)$ и $P_{хв.см} = f(\gamma_1)$, алгоритм для определения внешней характеристики ротора $\omega = f(M_H, V)$ будет иметь такой вид:

1. Приравняв выражение (2) и (3) и задавшись скоростью ветра V и усилием на хвостовом стабилизаторе $P_{хв.см}(\gamma_1)$, определяем угол атаки хвостового стабилизатора γ :

$$C_{yn}(\alpha) = \frac{2P_{хв.см}(\gamma_1)}{S_{хв} \rho (kV)^2}; \quad (2)$$

$$C_{yn}(\alpha) = C_x(\alpha) \sin \alpha + C_y(\alpha) \cos \alpha, \quad (3)$$

где $C_x(\alpha)$, $C_y(\alpha)$ – аэродинамические коэффициенты хвостового стабилизатора [4, 5]; $C_{yn}(\alpha)$ – нормальная составляющая от аэродинамических коэффициентов хвостового стабилизатора; k – коэффициент потерь скорости ветра за ротором; $S_{хв.см}$ – площадь хвостового стабилизатора; ρ – плотность воздушного потока.

2. Определяем угол косою обдува ротора

$$\gamma = \alpha_{хв.см} + \gamma_1. \quad (4)$$

3. Для угла косою обдува γ определяем аэродинамические коэффициенты ротора: C_M – коэффициент момента; C_N – коэффициент мощности; C_T – коэффициент осевой силы, – которые определяются по импульсной теории для нормальной составляющей скорости ветра $V \cos \gamma$ и соотношениям для профиля лопасти с учетом изменения угла притекания из-за касательной

составляющей $V \sin \gamma$ и угла поворота ротора Ω [1, 3].

4. Определяем необходимую величину C_T для реализации P_T при заданной скорости ветра V :

$$T = \frac{P_T L}{\varepsilon}; \quad (5)$$

$$T = \frac{1}{2} \pi \rho C_T V^2 \cos^2 \gamma R^2, \quad (6)$$

где T – осевая сила на роторе; P_T – весовое усилие ротора при статическом равновесии с хвостовым стабилизатором (в плоскости вращения ротора); L – расстояние от плоскости вращения ротора до оси вращения гондолы; ε – эксцентриситет; R – радиус ротора.

5. По зависимости $C_T(z)$ для угла косоуго обдува γ определяем коэффициент быстроходности z .

6. По коэффициенту быстроходности z определяем угловую скорость ротора

$$\omega = \frac{zV \cos \gamma}{R}.$$

7. По зависимости $C_M(z)$ и $C_N(z)$ определяем аэродинамический момент и мощность. Таким образом получим зависимость

$$\omega = f(M_H, V).$$

8. Проведя вариации по V и $P_{хв.ст.}$, получим внешнюю характеристику ротора.

При этом необходимо отметить, что задача решается в статике, т.е. динамические характеристики ветра и ВЭГ-3/20, в том числе и изменения затенения хвостового стабилизатора ротором, не учитываются.

Для тестовой задачи с целью проведения расчета внешней характеристики ротора в условиях косоуго обдува были приняты следующие исходные данные: установочный угол лопасти $\varphi_{уст} = 5^\circ$, эксцентриситет 80 мм. Расчетная внешняя характеристика для различных моментов нагрузки и зависимость мощности от скорости ветра для ВЭГ-3/20 приведена на рис. 3, 4. Там же приведена нижняя граница устойчивой работы и характеристика холостого хода ($M_{нагр} = 1,96 \text{ Н}\cdot\text{м}$).

Система измерений на ВЭГ-3/20 позволяет определить в едином времени (изме-

рить и обработать) в 10-секундном, минутном и 10-минутном усреднении следующие параметры:

- частоту вращения ротора, Гц, об/мин;
- напряжение фазное, среднее и каждой фазы, В;
- активную мощность каждой фазы и общую, Вт;
- коэффициент реактивной мощности каждой фазы и общий – $\cos \varphi$;
- азимут головки, град;
- угловое положение хвостового стабилизатора, град;
- скорость ветра, м/с;
- азимут ветра, град;
- температуру окружающей среды, $^\circ\text{C}$;
- давление окружающей среды, мм рт.ст.

На рис. 5, 6 приведены примеры регистрации параметров ВЭГ-3/20 на экране монитора с 10-секундным усреднением в графическом виде (режим холостого хода). На рис. 7–10 изображены экспериментальные точки, полученные системой измерения во время работы ветроэлектрической установки.

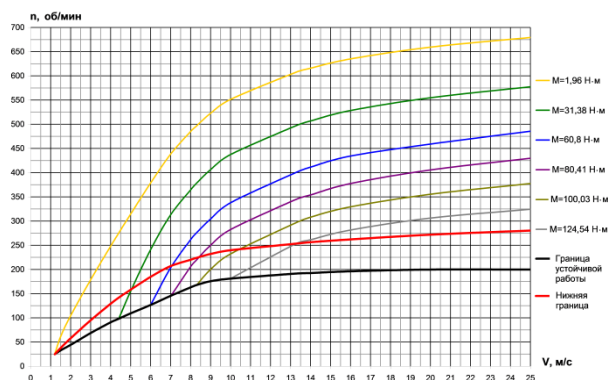


Рис. 3. Зависимость частоты вращения ротора от скорости ветра

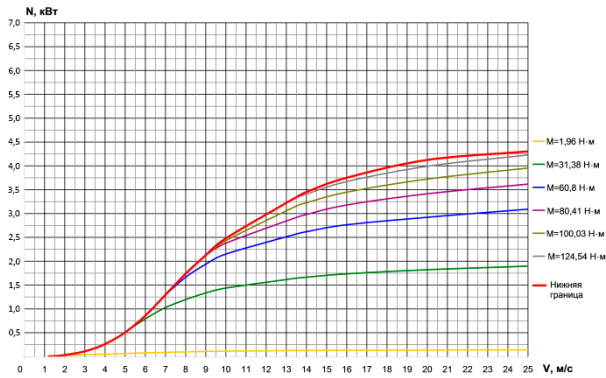


Рис. 4. Зависимость механической мощности от скорости

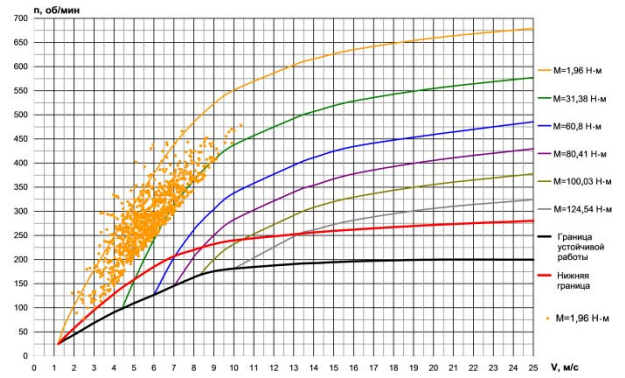


Рис. 7. Зависимость частоты вращения ротора от скорости ветра ($\varphi_{уст} = 5^\circ$, $\varepsilon = 80$ мм, $M_{нагр} = 1,96$ Н·м)

По результатам проведения натуральных испытаний ВЭГ-3/20 на установочном угле 5° с эксцентриситетом 80 мм и полученным экспериментальным точкам (моментные зависимости от скорости ветра $n=f(M, V)$, $N=f(M, V)$, рис. 6–9) можно сделать следующие выводы:

– на режиме холостого хода ($M_{нагр} = 1,96$ Н·м) и под нагрузкой частота вращения ротора превышает номинальное значение $n = 300$ об/мин (таблица);

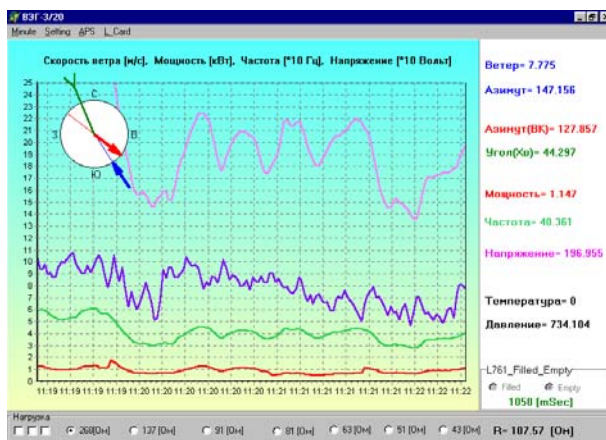


Рис. 5. Регистрация параметров ВЭГ-3/20 на экране монитора

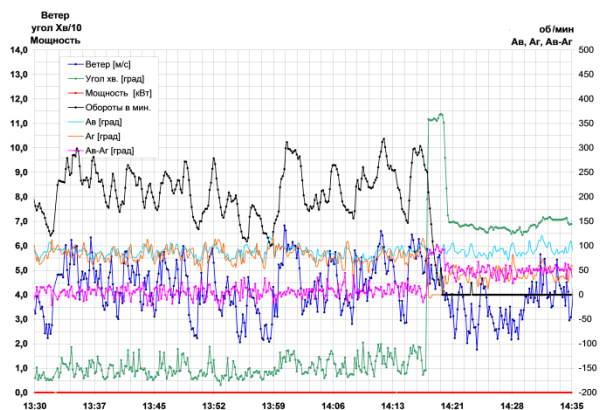


Рис. 6. Регистрация параметров ВЭГ-3/20 (в графическом виде)

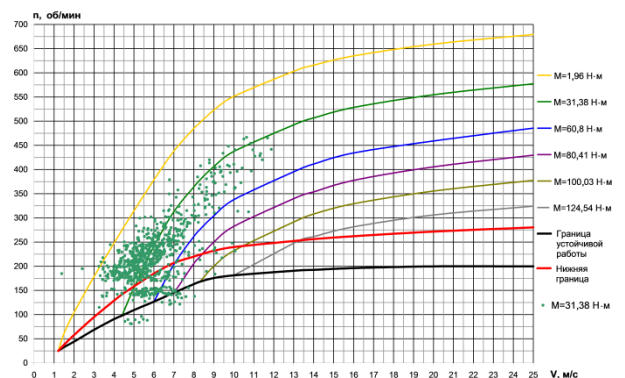


Рис. 8. Зависимость частоты вращения ротора от скорости ветра ($\varphi_{уст} = 5^\circ$, $\varepsilon = 80$ мм, $M_{нагр} = 31,38$ Н·м)

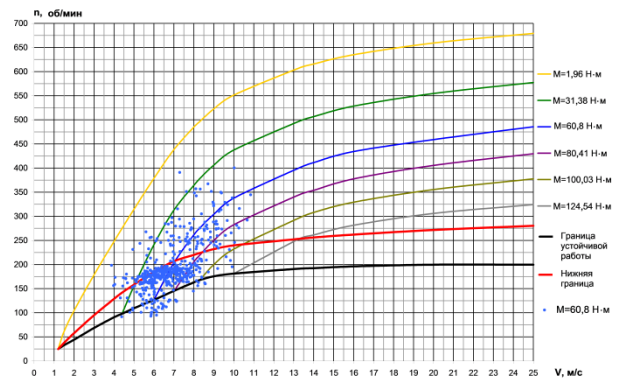


Рис. 9. Зависимость частоты вращения ротора от скорости ветра ($\varphi_{уст} = 5^\circ$, $\varepsilon = 80$ мм, $M_{нагр} = 60,8$ Н·м)

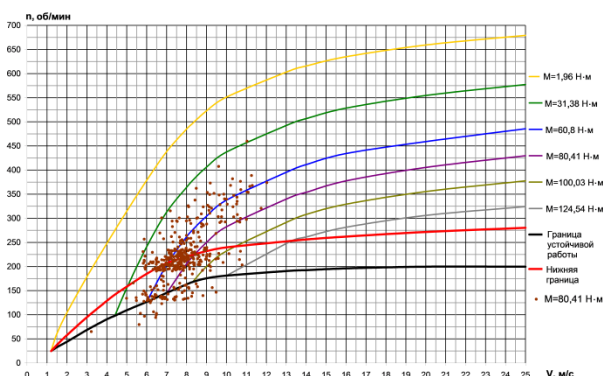


Рис. 10. Зависимость частоты вращения ротора от скорости ветра ($\varphi_{уст} = 5^\circ$, $\varepsilon = 80$ мм, $M_{нагр} = 80,41$ Н·м)

– на режиме работы ВЭУ под нагрузкой при номинальной скорости ветра 8,5–9 м/с мощность на роторе не превышает 2,2 кВт. Это объясняется тем, что на установочном угле 5° максимальный коэффициент мощности $C_N = 0,35$.

Дальнейшие работы необходимо провести в направлении оптимизации внешней характеристики ротора для получения оптимальных характеристик ветроэлектрической установки, а именно:

– определить угол установки лопасти для достижения номинальной мощности ветроэлектрической установки (при $V_{ном} = 8,5 \dots 9$ м/с, $C_N = \max$, $N_{ном} = 3$ кВт);

– провести оптимизацию по регулированию частоты вращения ротора по величине эксцентриситета, углу наклона оси шарнира хвостового стабилизатора, положению центров тяжести и давления хвостового стабилизатора;

– для построения алгоритма системы управления целесообразно, учитывая нерегулируемость генератора ВЭГ-3/20 и его коэффициент полезного действия, перейти от внешней характеристики ротора по моменту нагрузки к внешней характеристике по электрическому сопротивлению в цепи генератора.

Выводы

1. Разработана методика и программа расчета внешней характеристики ротора

для автономных ВЭУ с выводом ротора из-под ветра.

2. Результаты расчетных характеристик подтверждены натурными испытаниями экспериментальной ветроэлектрической установки ВЭГ-3/20.

3. Проведенная работа показывает, что оптимальные параметры внешних характеристик ротора зависят от конструктивных особенностей ветроэлектрической установки в целом.

Список использованной литературы

1. Кальныш Р.В. Регулирование частоты вращения автономных ВЭУ выводом ветроколеса из-под ветра // Энергетика и электрификация. – 2008. – № 8. – С. 23-30.

2. Франкфурт М.О. Аэродинамическое регулирование ветродвигателя выводом ветроколеса из-под ветра // Промышленная аэродинамика. – Вып. 26. – М.: Машиностроение, 1964.

3. Кальныш Р.В., Фоменко В.С. Разработка методики определения аэродинамических коэффициентов ротора ветроагрегата с горизонтальной осью вращения в условиях косоугольного обдува // Материалы V Международного конф. "Нетрадиционная энергетика в XXI веке" (23 – 27 сент. 2004 г.). – АР Крым, пгт Николаевка, 2004. – С. 150-155.

4. Франкфурт М.О., Волосных В.Н. Аэродинамические характеристики хвостовых оперений и боковых планов для ветроустановок // Промышленная аэродинамика. – 1964. – Вып. 26.

5. Франкфурт М.О., Волосных В.Н. Моменты, действующие на хвост при косоугольном обдуве ветроколеса // Промышленная аэродинамика. – 1962. – Вып. 21.

Статья поступила 20.12.2015