

**Р.К. Манатбаев, А.К. Тулепбергенов, Е.Е. Сандыбаев, Н.Б. Каласов,  
С. А. Бергалиева, Д.С. Отегенов**

*Казахский Национальный университет им. Аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан*

## ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕТРОТУРБИНЫ ДАРЬЕ

**Аннотация.** Ветер - экологически чистый источник энергии! Во всех экономически развитых странах мира ветер, как источник энергии, начинает играть заметную роль в их энергетическом балансе. Непрерывно расширяется производство и проектирование эффективных ветроустановок [1-6]. Территория республики Казахстан имеет огромный ветроэнергетический потенциал, что, естественно, предполагают большое будущее для применения ветроэнергетических аппаратов в нашей стране.

Экономичность современных ветротурбин определяется величиной коэффициента использования энергии ветра от единичной площади ометаемой поверхности ветроколеса в воздушном потоке. Поэтому их конструирование относится к разряду наиболее наукоемкого производства.

В работе рассматривается математическая модель нестационарной работы вертикально-осевой ветротурбины Дарье, которая вращается за счет действия подъемной силы на крыловой профиль рабочей лопасти. Разработана математическая постановка задачи и методика расчета угловой скорости ветроэнергетического устройства Дарье при воздействии на нее набегающего потока и получены результаты численного расчета. По проведенным расчетам, ниже разработанной методикой, получены достоверные результаты, которые хорошо представляет физику явления. Разработанная математическая модель, ее численная реализация и полученные результаты могут быть полезным для дальнейшего усовершенствования математической описании проблемы и при проектировании конструкции вертикально-осевых ветротурбин.

**Ключевые слова:** вертикально-осевая ветротурбина Дарье,

### Введение

Наибольшее применение и развитие получили ветроагрегаты, работающие за счет подъемной силы крыла, которые считаются современными. Они имеют сравнительно высокий коэффициент использования энергии ветра  $\xi_{\max} = 0,45$ . Их делят на два типа по расположению вращающихся валов и рабочих лопаток: а) горизонтально-осевые (тип пропеллерный); б) вертикально-осевые («Дарье»).

Главные два преимущества вертикально-осевых ветроагрегатов (называемые ветротурбиной «Дарье», изобретенным французским инженером Дарье в 1905г.) по сравнению с горизонтально-осевыми: а) направление ветра не имеет значения; б) электрогенератор, и другие главные компоненты агрегата расположены на уровне земли, что снижает требования, предъявляемые к башне, и облегчает техническое обслуживание и ремонт.

Целью данной работы является рассмотрение теоретического 2D

моделирования работы ветротурбины карусельного типа дает возможность определить оптимальные параметры турбины (см. рис. 1 и 2). Рассматриваем разработку математической модели для исследования взаимодействия ветротурбины карусельного типа «Дарье» со стационарным воздушным потоком [3-7].

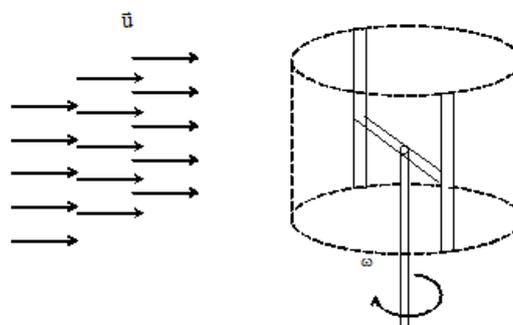


Рисунок 1.- Схематически общий вид взаимодействия

Экономичность современных ветротурбин определяется величиной коэффициента использования энергии

ветра от единичной площади ометаемой поверхности ветроколеса в воздушном потоке. Поэтому их конструирование относится к разряду наиболее наукоемкого производства, опирающегося на современные знания аэродинамики, теории машин, материаловедения и др.

Обычное ветроэнергетическое устройство (ВЭУ) Дарье, изобретенное французским инженером (естествоиспытателем) Дарье в 1904 году, состоит из лопастей типа самолетных крыльев с симметричным относительно хорды профилем (мах), связывающим вертикальный вал вращения с рабочими крыльями (также симметричного профиля), расположенными параллельно оси вращения. Плоскость крыльев размаха (мах) горизонтальна и лежит в плоскости их вращения. Основное отличительное свойство: ВЭУ Дарье работает не реагируя на изменение направление ветра.

### Постановка Задачи

При действии потока ветра на лопасти появляются подъемная сила и силы аэродинамического сопротивления. Подъемная сила действует на лопасти положительно, раскручивая ротор. А сила сопротивления – отрицательна. Для работы агрегата эффективные значения этих сил зависят от параметра  $Z$ , называемого «быстроходность агрегата».

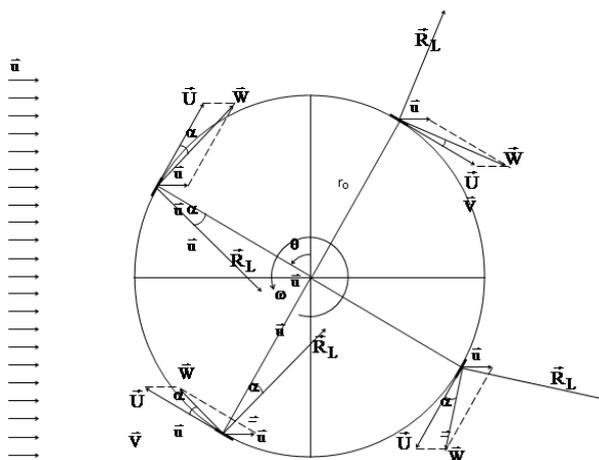


Рисунок 2.– Схема взаимодействия турбины со стационарным потоком.

Параметр быстроходности ветроколеса определяется следующим образом

$$Z = \frac{W_*}{u_\infty}$$

где,  $u_\infty$  - скорость потока,  $W_* = \omega r_0$  - линейная скорость лопасти,  $\omega$  - угловая скорость вращения ротора,  $r_0$  - радиус, расстояние от центра вращения вала до лопасти.

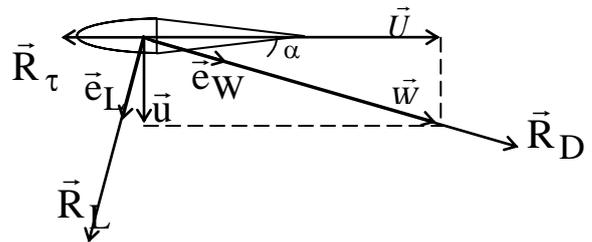


Рисунок 3.– Схема воздействия аэродинамических сил на профиль лопасти.

В качестве аэродинамических сил сопротивления ветровому потоку берутся проекции осредненных сил сопротивления и подъемной силы лопасти (в обратном направлении) на оси  $Ox$  и  $Oy$  в виде сосредоточенных источников  $R_x$ ,  $R_y$  и входят в правую часть уравнений движения.

Для определения этих массовых сил сначала определяется угол атаки  $\alpha$  и скорость атаки  $\vec{W}$ , а коэффициенты подъемной силы и сил сопротивления зависят только от угла атаки (см. рис.2).

$$|\vec{W}| = \sqrt{(u \sin \theta - v \cos \theta)^2 + (r_0 \omega + u \cos \theta + v \sin \theta)^2},$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{u \sin \theta - v \cos \theta}{r_0 \omega + u \cos \theta + v \sin \theta}. \quad (1)$$

Вводя локальное число быстроходности  $Z = \frac{r_0 \omega}{u_\infty}$ , получим,

$$\alpha = \operatorname{arctg} \left( \frac{u \sin \theta - v \cos \theta}{Z + u \cos \theta + v \sin \theta} \right) \quad (2)$$

Для определения аэродинамических сил введем единичные векторы, как

показана на рисунке 3:  $\vec{e}_w$  – единичный вектор сопротивления, направленный вдоль вектора относительной скорости и  $\vec{e}_L$  – единичный вектор подъемной силы направленный перпендикулярно ему.

Элементарные составляющие аэродинамических сил:

а) подъемная сила профиля:

$$\vec{R}_L = C_L(\alpha)\rho \frac{W^2}{2} h \vec{e}_L, \quad (3)$$

где  $C_L(\alpha)$  – коэффициент подъемной силы,  $h$  – длина хорды профиля,

б) сила сопротивления

$$\vec{R}_D = C_D(\alpha)\rho \frac{W^2}{2} h \vec{e}_w, \quad (4)$$

$C_D(\alpha)$  – коэффициент силы сопротивления. Потом вычисляется  $R_x, R_y$

$$R_x = \text{пр}_{Ox}(\vec{R}_L) + \text{пр}_{Ox}(\vec{R}_D)$$

$$R_y = \text{пр}_{Oy}(\vec{R}_L) + \text{пр}_{Oy}(\vec{R}_D) \quad (5)$$

Коэффициенты  $C_L(\alpha)$ ,  $C_D(\alpha)$  как формулы угла атаки, являются результатами продувок используемого профиля для значений  $\alpha$  в интервале  $0^\circ - 360^\circ$ . В книге [6] для определения этих коэффициентов предлагается брать из результатов проведенного эксперимента в лаборатории LMAL-NASA (США) для трех симметричных профилей, которые приведены в таблице 1 (NASA-0006, NASA-0012, NASA-0021).

Для проведения расчетов нами на основании аэродинамических характеристик крылового профиля NASA-0021 была проведена обработка и получены эмпирические формулы зависимости коэффициентов подъемной силы ( $C_L$ ) и силы сопротивления ( $C_D$ ) от угла атаки. Результаты обработки данных коэффициентов подъемной силы ( $C_L$ ) и силы сопротивления ( $C_D$ ) для крылового профиля NASA-0021 приведены на рисунке 4.

На рисунке 7 сплошные линии построены по приближенным формулам, которые имеют вид

$$C_L = -0,00011 \cdot \alpha^3 + 0,0023 \cdot \alpha^2 + 0,0633 \cdot \alpha \quad (6)$$

$$C_D = 0,0005 \cdot \alpha^2 - 0,002 \cdot \alpha + 0,0129 \quad (7)$$

Ромб, квадрат – экспериментальные данные, взятые из [6,7] для профиля NASA-0021

Как видно, из рисунка 7 экспериментальные данные NASA достаточно хорошо согласуются формулами (6) и (7).

Были проведены расчеты распределения индуктивной скорости на наветренной стороне турбины. Затем рассчитано поле скорости перед взаимодействием воздушного потока с турбиной подветренной стороне. Для этого рассчитаны поле скорости после прохождения наветренной стороны турбины. Используя эти данные было рассчитано распределение индуктивной скорости на подветренной стороне.

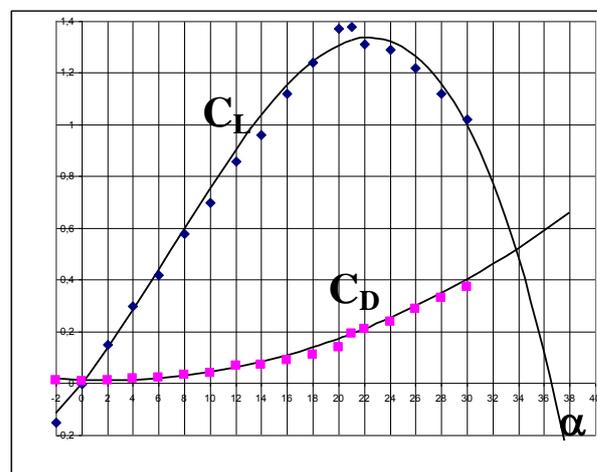


Рисунок 4.– Коэффициенты подъемной силы  $C_L$  и силы сопротивления  $C_D$  для симметричного профиля NASA-0021.

Для определения угловой скорости вращения ротора Дарье, при воздействии ветрового потока применяем теорему об изменении кинетического момента механической системы [6]. Эта выражения в конечной форме имеет вид

$$\frac{dL_z}{dt} = M_{\text{турб}} + \sum M_i, \quad (8)$$

где  $L_z$  – кинетический момент ветротурбины, состоящей в данном случае из вала, маха и рабочей лопасти относительно оси  $z$ .  $M_{\text{турб}}$  – вращательный момент, создаваемый рабочими лопастями турбины, который определялся во втором

разделе данной работы,  $M_i$  - момент различных сил сопротивления.

Для турбины Дарье с двумя прямыми лопастями имеем

$$I = \frac{2}{3} r_0^2 m_i + r_0^2 m_e + r_a^2 m_a, \quad (9)$$

где  $r_0$  - расстояние от оси вращения до лопастей (оно практически равно длине махов),  $r_e$  - радиус вала, передающего вращение генератору электрического тока,  $m_m, m_l, m_e$  - соответственно массы махов, лопастей, вала вращения.

Разобьем рабочую лопасть на элементарные площадки  $dx$ , соответственно, угол  $d\theta$  под которой видна эта площадка, очевидно, будет равна

$$dx = r_0 \sin \theta d\theta; \quad d\theta = -\frac{dx}{r_0 \sin \theta},$$

где  $d\theta$  - это элементарный угол поворота вокруг оси  $Oz$ , покрываемый лопастью при перемещении в промежутке от  $x$  до  $(x+dx)$

Доля времени, затрачиваемая за один оборот при прохождении элемента  $dx dz$  равна

$$rd\theta = Vd\tau = \frac{2\pi}{T} r_0 d\tau, \quad d\theta = \frac{2\pi}{T}, \quad \frac{d\theta}{T} = \frac{d\theta}{2\pi}.$$

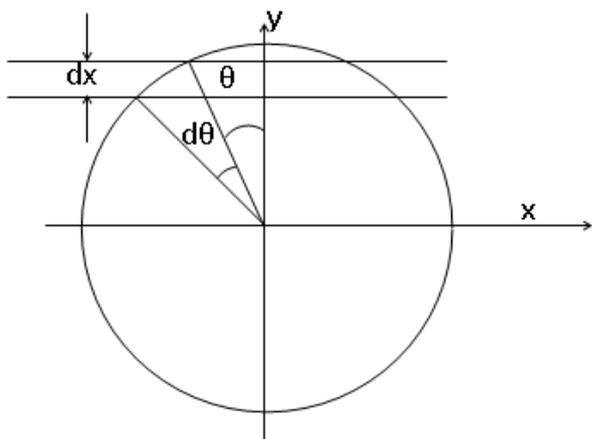


Рисунок 5. - Схематический вид прохождения трубки тока через элементарной площадки ометаемой поверхности турбины

Разность времени выразим

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{d\theta}{dt}, \quad (10)$$

где  $d\theta$  - соответствует, углу поворота рабочей лопасти относительно оси  $z$  за промежуток времени  $dt$ ;

$T$  - затраченное время за один оборот турбины.

Отсюда следует написать

$$dt = \frac{T}{2\pi} d\theta = \frac{1}{\omega} d\theta, \quad (11)$$

В формулу (8) подставив (11) получим

$$\omega \frac{dL_z}{d\theta} = M_{\text{турб}} + \sum M_i, \quad (12)$$

Угловая скорость вращения турбины при воздействии жидкости поступающей из гидронасоса и меняющейся в зависимости от работы дросселя

$$I\omega \frac{d\omega}{d\theta} = M_{\text{турб}} + \sum M_i, \quad (13)$$

### Полученные результаты численного расчета

Формулу (13) напишем в разностном виде

$$I\omega \frac{\omega^{n+1} - \omega^n}{\theta^{n+1} - \theta^n} = M_{\text{турб}} + \sum M_i, \quad (14)$$

где  $M_{\text{турб}} = (R_L \sin \alpha - R_D \cos \alpha) r_0$

$$\omega^{n+1} = \omega^n + \frac{(R_L \sin \alpha - R_D \cos \alpha) r_0 + \sum M_i}{I\omega^n} *$$

$$*(\theta^{n+1} - \theta^n) \quad (15)$$

где  $\omega^{n+1}$  и  $\omega^n$  - соответственно, угловые скорости турбины в момент времени  $t^{n+1}$  и  $t^n$ ;

Таким образом, определения угловой скорости  $\omega$  будет продолжаться, пока не сойдется к своему единственному значению.

Результаты этих расчетов приведены на рисунках 6-8 (для  $I=0,5$ ).

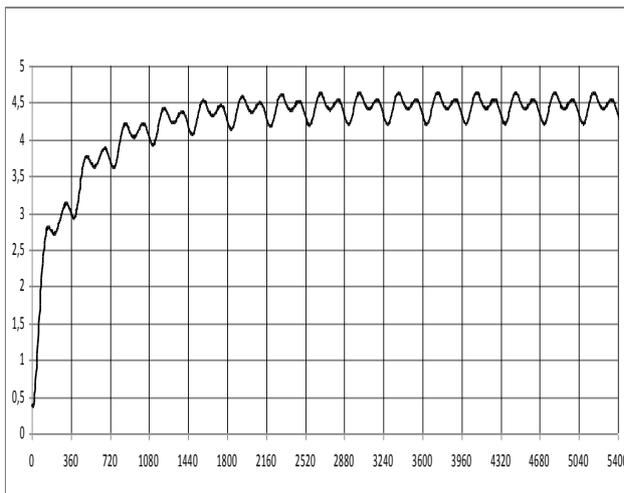


Рисунок 6. – График зависимости угловой скорости от положения движущейся рабочей лопасти при относительно малой величине  $I=0,5$  и без учета сопротивления на турбину

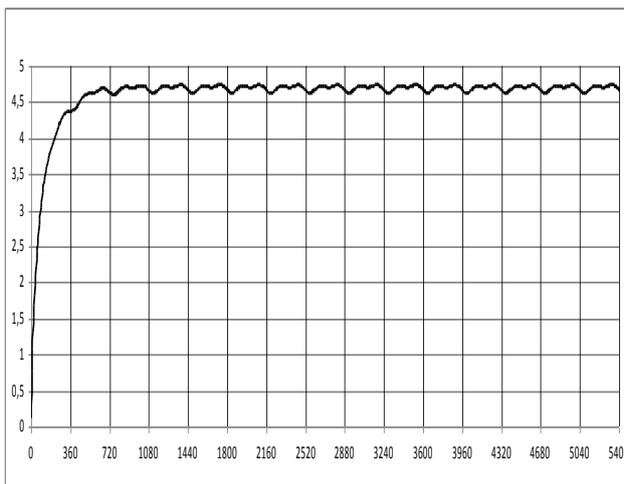


Рисунок 7. – График зависимости угловой скорости от положения движущейся рабочей лопасти при  $I=0,5$  и с учетом сопротивления на турбину 0,5%

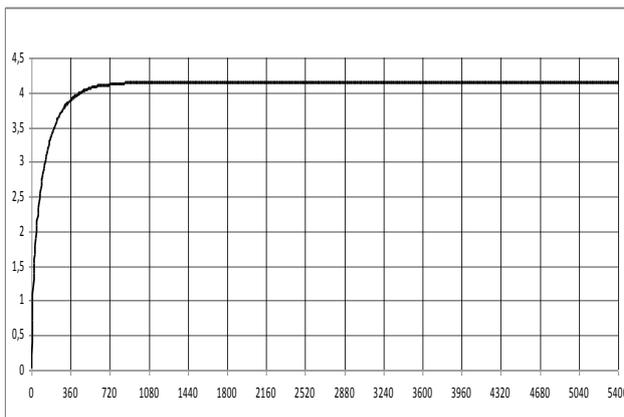


Рисунок 8. – График зависимости угловой скорости от положения движущейся рабочей лопасти при  $I=0,5$  и с учетом сопротивления на турбину 5%

### Список литературы

- 1 Турян К. Дж., Стрикленд Дж., Х., Бэрг Д.Э. Мощность ветроэлектрических агрегатов с вертикальной осью вращения //Аэрокосмическая техника. – 1988. – № 8. – С. 105-121.
- 2 Migliore P.G., Wolfe W.P., Fanucci J.B. Flow Curvature Effects on Darrieus Turbine Blade Aerodynamics //J. Energy. – 1980. – Vol. 4, № 2. – P. 49-55.
- 3 Mei-Kao Liu, Mark A.Yocke, and Tomas C. Myers. Mathematical Model For the Analysis of Wind – Turbine Wakes //J. Energy. – 1983. – Vol.7, № 1. – P.73-78.
- 4 Jon Paraschivoiu and Philippe Desy. Aerodynamics of Small – Scale Vertical – Axis Wind Turbines //J. Propulsion. – 1986. – Vol. 2, № 3. – P. 282-288.
- 5 Brochier G., P. Fraunie, and Bequier C. Water Channel Experiments of Dynamic Stall on Darrieus Wind Turbine Blades //J. Propulsion. – 1986. – Vol. 2, №5. – P. 445-449.
- 6 Ершина А.К., Ершин Ш.А., Жапбасбаев У.К. Основы теории ветротурбины Дарье. – Алматы, 2001. – 104 с.
- 7 Иванов И. И., Иванова Г.А., Перфилов О. Л.. Модельные исследования роторных рабочих колес ветроэнергетических станций. Сборник научных трудов гидропроекта. – М., 1988. – С. 106 -113.

Таблица 1. Значение коэффициентов  $C_L(\alpha)$ ,  $C_D(\alpha)$  полученных входе проведенного эксперимента в лаборатории LMAL–NACA (США) для трех симметричных профилей(NACA-0006, NACA-0012, NACA-0021).

Крыло с профилем NACA-0006			Крыло с профилем NACA-0012			Крыло с профилем NACA-0021		
$\alpha^0$	$C_y$	$C_x$	$\alpha^0$	$C_y$	$C_x$	$\alpha^0$	$C_y$	$C_x$
-2	-0,15	0,007	-8	-0,60	0,033	-2	-0,15	0,012
0	0,00	0,0064	-4	-0,30	0,015	0	0,00	0,010
2	0,16	0,007	-2	-0,15	0,009	2	0,15	0,012
4	0,32	0,014	0	0,00	0,007	4	0,30	0,019
6	0,47	0,021	2	0,15	0,009	6	0,42	0,024
8	0,61	0,038	4	0,30	0,0155	8	0,58	0,032
10	0,72	0,070	6	0,445	0,0205	10	0,70	0,042
12	0,81	0,140	8	0,60	0,033	12	0,86	0,068
14	0,86	0,2	10	0,745	0,041	14	0,96	0,072
16	0,86	0,250	12	0,90	0,059	16	1,12	0,092
18	0,87	0,295	14	1,045	0,075	18	1,24	0,110
20	0,86	0,350	16	1,2	0,096	20	1,37	0,140
22	0,835	0,360	18	1,32	0,119	22,2	1,38	0,192
24	0,83	0,396	20	1,46	0,142	22,2	1,31	0,210
26	0,825	-	22,1	1,55	0,173	24	1,29	0,240
28	0,822	-	22,1	1,20	0,262	26	1,22	0,290
30	0,818	-	24	1,09	0,322	28	1,12	0,330
			26	0,92	0,410	30	1,02	0,372
			30	0,89	0,430			

Результаты этих расчетов приведены на рисунках 6-8 (для  $I=0,5$ ).

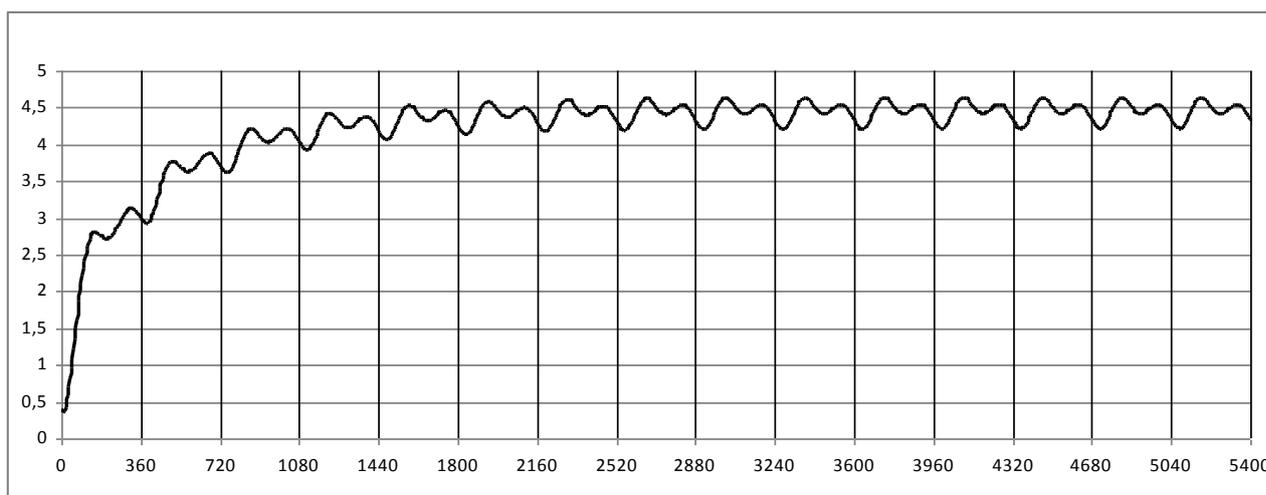


Рисунок 6 – График зависимости угловой скорости от положения движущейся рабочей лопасти при относительно малой величине  $I=0,5$  и без учета сопротивления на турбину

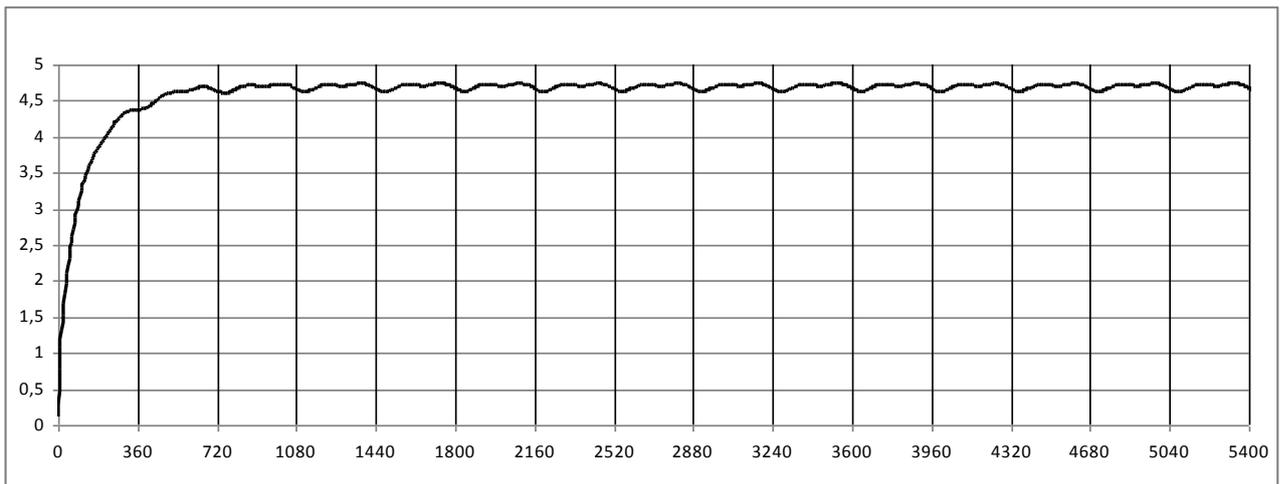


Рисунок 7 – График зависимости угловой скорости от положения движущейся рабочей лопасти при  $I=0,5$  и с учетом сопротивления на турбину  $0,5\%$

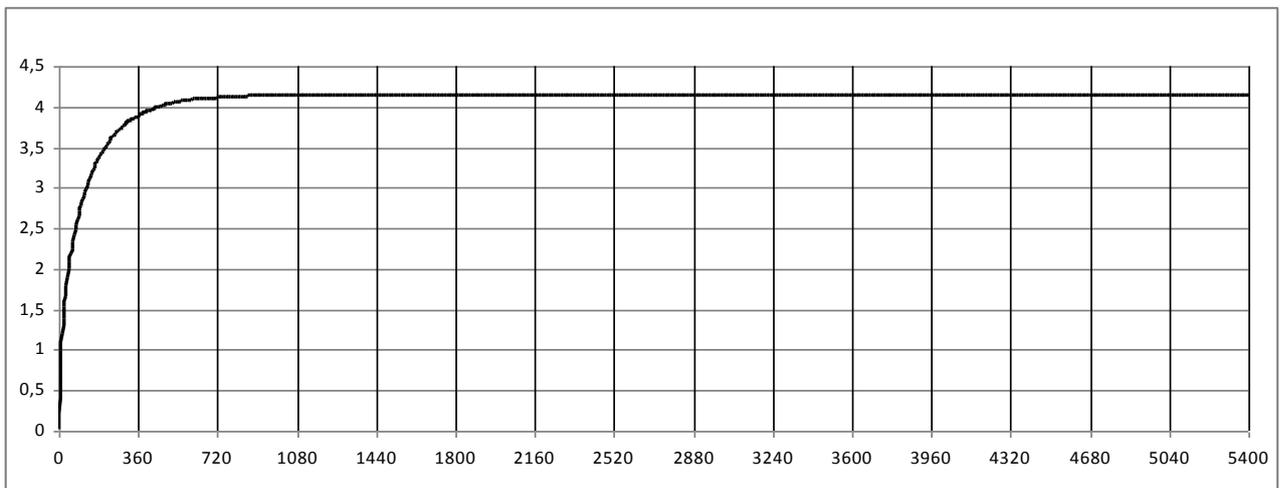


Рисунок 8 – График зависимости угловой скорости от положения движущейся рабочей лопасти при  $I=0,5$  и с учетом сопротивления на турбину  $5\%$