

А.И. Яковлев, М.А. Затучная,
В.Н. Меркушев, В.Н. Пашков

**РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ
ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК
С ГОРИЗОНТАЛЬНО-ОСЕВОЙ
ВЕТРОТУРБИНОЙ И СИНХРОННЫМ
ГЕНЕРАТОРОМ
НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ**

2003

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. Н. Е. ЖУКОВСКОГО**

«Харьковский авиационный институт»

А. И. Яковлев, М. А. Затучная,

В. Н. Меркушев, В. Н. Пашков

**РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ
ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК
С ГОРИЗОНТАЛЬНО-ОСЕВОЙ
ВЕТРОТУРБИНОЙ
И СИНХРОННЫМ ГЕНЕРАТОРОМ
НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ**

Учебное пособие по курсовому проектированию

ХАРЬКОВ «ХАИ» 2003

УДК 621.311.24

Расчет и проектирование ветроэлектрических установок с горизонтально-осевой ветротурбиной и синхронным генератором на постоянных магнитах/ А. И. Яковлев, М. А. Затучная, В. Н. Меркушев, В. Н. Пашков. — Учеб. пособие по курсовому проектированию. — Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2003. — 125 с.

Рассмотрена методика численного построения геометрических параметров лопасти ветротурбины с горизонтальной осью вращения на основании импульсной модели ветроколеса, а также на основании геометрических и аэродинамических соотношений выбранного профиля лопасти. Изложена методика расчета на прочность лопасти при предельно допустимой скорости ветра ветротурбины для выбранного профиля лопасти. Приведен пример расчета на базе описанной модели, результаты которого используются для определения главных размеров синхронного генератора на постоянных магнитах. Описана методика электромагнитного расчета соответствующего генератора.

Для студентов, обучающихся по специальности «Нетрадиционные источники энергии».

Ил. 37. Табл. 27. Библиогр.: 12 назв.

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. Б. И. Кузнецов,
д-р техн. наук, проф. В. В. Кузьмин

© Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт», 2003 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	6
1. Методика аэродинамического расчета ветроколеса с горизонтальной осью вращения	7
1.1. Исходные данные расчета	8
1.2. Методика расчета геометрии лопасти	11
1.2.1. Расчет оптимального коэффициента торможения потока	11
1.2.2. Определение коэффициента мощности	12
1.2.3. Методика расчета относительных параметров геометрии лопасти	13
1.3. Расчет размерных параметров ветроколеса	15
1.3.1. Исходные данные расчета размерных параметров	15
1.3.2. Размерные параметры ветроколеса	16
1.3.3. Построение линейчатой лопасти	17
2. Пример расчета ветроколеса с горизонтальной осью вращения	23
2.1. Расчет оптимального коэффициента торможения потока	23
2.1.1. Коэффициент торможения потока	23
2.1.2. Коэффициент идеальной мощности	23
2.1.3. Коэффициент концевых потерь	23
2.1.4. Коэффициент профильных потерь	24
2.1.5. Коэффициент потерь на кручение струи	24
2.1.6. Предварительный коэффициент мощности	25
2.1.7. Значения параметров, зависящих от коэффициента торможения	25
2.1.8. Выбор максимального значения $C_{p_{предв}}$ и определение соответствующего ему значения $e — e_{opt}$	26
2.1.9. Определение расчетного коэффициента мощности	26
2.2. Расчет относительных параметров геометрии лопасти	26
2.2.1. Относительный радиус расположения сечения лопасти ..	26
2.2.2. Коэффициент быстроходности сечения лопасти	26
2.2.3. Число относительных модулей сечения лопасти	27
2.2.4. Коэффициент суммарной нагруженности сечений лопастей, находящихся в зоне действия элементарной кольцевой струи	27
2.2.5. Значения параметров для пяти сечений лопасти	27
2.2.6. Коэффициент подъемной силы периферийного сечения	28
2.2.7. Относительная хорда (в долях наружного радиуса колеса) периферийного сечения	28
2.2.8. Коэффициент подъемной силы корневого сечения	28

2.2.9. Относительная хорда (в долях наружного радиуса колеса) корневого сечения	29
2.2.10. Относительная хорда (в долях наружного радиуса колеса) промежуточного сечения	29
2.2.11. Коэффициент подъемной силы промежуточного сечения	29
2.2.12. Определение номера элемента на восходящей ветви исходных значений характеристики C_{y_a} , ближайшего к $C_{y_{ak}}$ и большего его	30
2.2.13. Угол атаки промежуточного сечения	30
2.2.14. Угол притекания сечения лопасти	31
2.2.15. Угол заклинения (установки) сечения лопасти	31
2.2.16. Итог расчета относительных параметров геометрии лопасти	31
2.3. Расчет размерных параметров ветроколеса	32
2.3.1. Исходные данные расчета размерных параметров	32
2.3.2. Размерные параметры ветроколеса	32
3. Расчет на прочность лопасти ветроколеса	42
3.1. Основные геометрические характеристики лопасти	42
3.2. Нагрузки, действующие на лопасть	42
3.3. Определение площади профиля типа «Эсперо»	43
3.4. Масса лопасти	44
3.5. Центробежная сила, действующая на лопасть	44
3.6. Напряжение на отрыв, создаваемое центробежной силой	45
3.7. Момент, создаваемый аэродинамическими силами, приложенными к лопасти при расчетной скорости ветра	45
3.8. Сила лобового давления на лопасти ветроколеса при предельно допустимой скорости ветра	47
3.8.1. Стабилизируемое ветроколесо	47
3.8.2. Нестабилизируемое ветроколесо	48
3.9. Изгибающий момент, создаваемый силой лобового давления на лопасть при предельно допустимой скорости ветра	49
3.10. Момент, создаваемый распределенными центробежными силами, действующими на лопасть	49
3.11. Напряжение от моментов, воздействующих на лопасть	54
3.12. Суммарные напряжения, действующие на лопасть	55
3.13. Выбор наружного диаметра трубы маха	55
4. Пример расчета на прочность лопасти ветроколеса	56
4.1. Исходные данные расчета на прочность лопасти	56
4.2. Центробежная сила, действующая на лопасть при предельно допустимой скорости ветра	57
4.3. Момент, создаваемый аэродинамической силой	58

4.3.1. Момент при расчетной скорости ветра	58
4.3.2. Момент при предельно допустимой скорости ветра	58
4.4. Момент, создаваемый распределенными центробежными силами, действующими на лопасть при предельно допустимой скорости ветра	59
4.5. Суммарный момент, действующий на лопасть при предельно допустимой скорости ветра	61
4.6. Выбор диаметра трубы маха	61
4.7. Напряжение на отрыв лопасти от центробежной силы	62
4.7.1. Площадь сечения трубы маха лопасти	62
4.7.2. Напряжения на отрыв	62
4.8. Напряжения от изгибающего момента в опасном сечении	63
4.8.1. Момент сопротивления изгибу сечения трубы маха	63
4.8.2. Напряжение от изгибающего момента	63
4.9. Суммарное напряжение в опасном сечении лопасти	63
4.10. Сравнение суммарного напряжения в опасном сечении с предельно допустимым	63
5. Расчет синхронного генератора с постоянными магнитами	63
5.1. Исходные данные для проектирования синхронного генератора с постоянными магнитами	66
5.2. Определение главных размеров	
5.3. Расчет обмотки и магнитопровода статора	70
5.4. Определение размеров ротора	86
5.5. Расчет проводимостей рассеяния индуктора	88
5.6. Расчет магнитной цепи и построение рабочей диаграммы магнитов	90
5.7. Определение массы активных материалов, потерь и КПД генератора	95
5.8. Расчет характеристик трехфазного генератора	97
5.9. Расчет характеристик однофазного генератора	109
Заключение	115
Библиографический список	116
Приложение 1. Картограмма изотих ветра Украины	117
Приложение 2. Зависимость коэффициента мощности от коэффициента быстроходности для разных типов ветроколес	118
Приложение 3. Конструкции и основные параметры ветроустановок с синхронными генераторами на постоянных магнитах	119

ВВЕДЕНИЕ

В разделе 1 данного учебного пособия описана приближенная инженерная методика аэродинамического расчета ветротурбины пропеллерного типа, которая в ветроустановке с горизонтальной осью вращения преобразует энергию ветра в механическую и электрическую.

Ветротурбина содержит рабочие лопасти, имеющие в сечениях соответствующий аэродинамический профиль крыла самолета. Следуя струйной теории идеального винта [1], разработан метод расчета, в основе которого лежит решение нелинейных уравнений и определенных интегралов численными методами. В результате расчета при заданных мощности и скорости ветра находятся основные размеры ветротурбины, включая геометрические параметры лопастей — углы установки профилей и координаты узловых точек их контуров. Методика дает возможность спроектировать ветротурбину для ветроэлектрической установки мощностью 0,5 ... 100 кВт.

В разделе 2 приведен пример аэродинамического расчета.

В разделе 3 описана упрощенная методика расчета на прочность лопасти ветроколеса для случая сплошной однородной лопасти, а в разделе 4 приведен пример расчета лопасти на прочность, иллюстрирующий эту методику.

В разделе 5 представлены соображения по согласованию параметров ветроколеса и генератора ветроустановки.

В разделе 6 ставится задача проектирования синхронного генератора с постоянными магнитами, работающего на автономную однофазную нагрузку. Методика расчета генератора иллюстрируется на примере расчета генератора мощностью 5 кВт.

1. МЕТОДИКА АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ВЕТРОКОЛЕСА С ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ОСЬЮ ВРАЩЕНИЯ

В настоящем разделе предлагается метод расчета ветроколеса, основанный на двух уравнениях связи, описанных в работах [1, 4], и вытекающий из метода элементарных струй. Первое уравнение связи следует из того, что осевая составляющая силы реакции потока на элементарные лопасти, находящиеся в зоне действия элементарной кольцевой струи (рис.1.1), равна силе от воздействия разности давлений перед и за колесом на площадь сечения элементарной кольцевой струи плоскостью вращения колеса. Следствием этой связи является уравнение

$$i_l \bar{b} C_{y_a} = \frac{8\pi \bar{r} e}{(1+e)(1-e)^2 (Z_u + \mu_a) \sqrt{1+Z_u^2}}. \quad (1.1)$$

Второе уравнение связи отражает теорему об изменении момента количества движения, которая в применении к ветроколесу формулируется следующим образом: момент относительно оси ветряка аэродинамических сил, действующих на элементарные лопасти (рис. 1.1, 1.2), равен по величине и противоположен по знаку моменту количества движения, получаемого элементарной кольцевой струей, увлеченной ветряным колесом. Следствием второго уравнения связи является выражение (1.2)

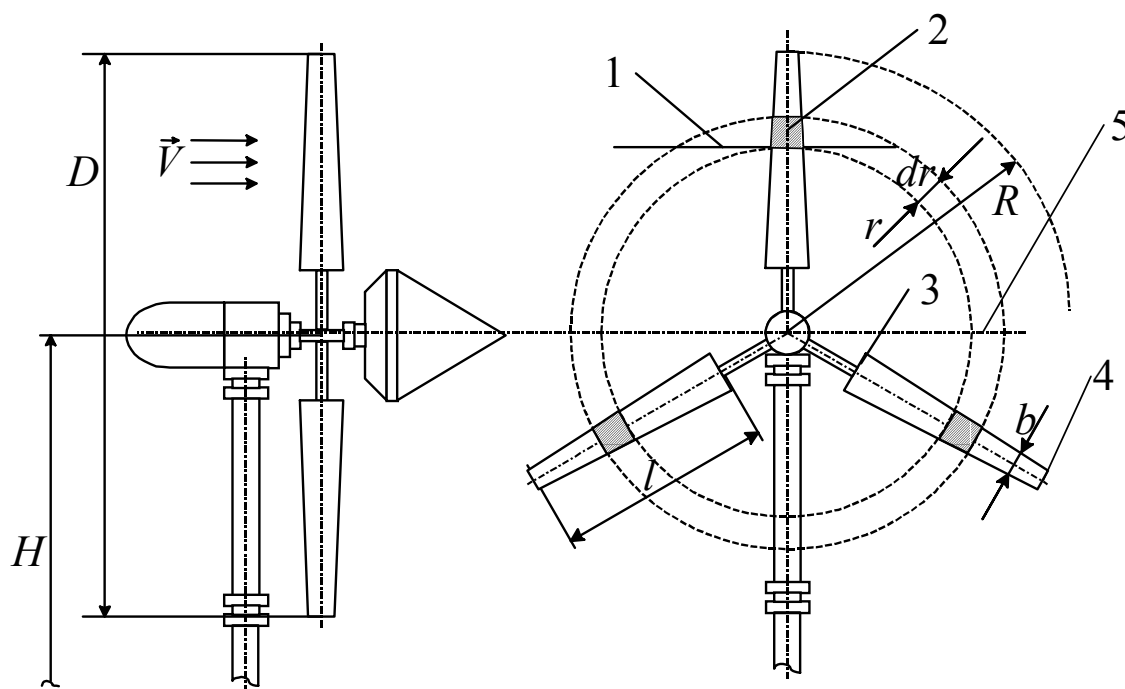


Рис. 1.1. Ветроколесо пропеллерного типа: 1 – промежуточное сечение; 2 – элементарная лопасть; 3 – корневое сечение; 4 – периферийное сечение; 5 – элементарная кольцевая струя

$$Z = Z_u(1 - e) - \frac{e}{1 + e} \frac{1 - \mu_a \cdot Z_u}{Z_u + \mu_a}. \quad (1.2)$$

Уравнения связи (1.1) и (1.2) являются основой для аэродинамического расчета ветроколеса.

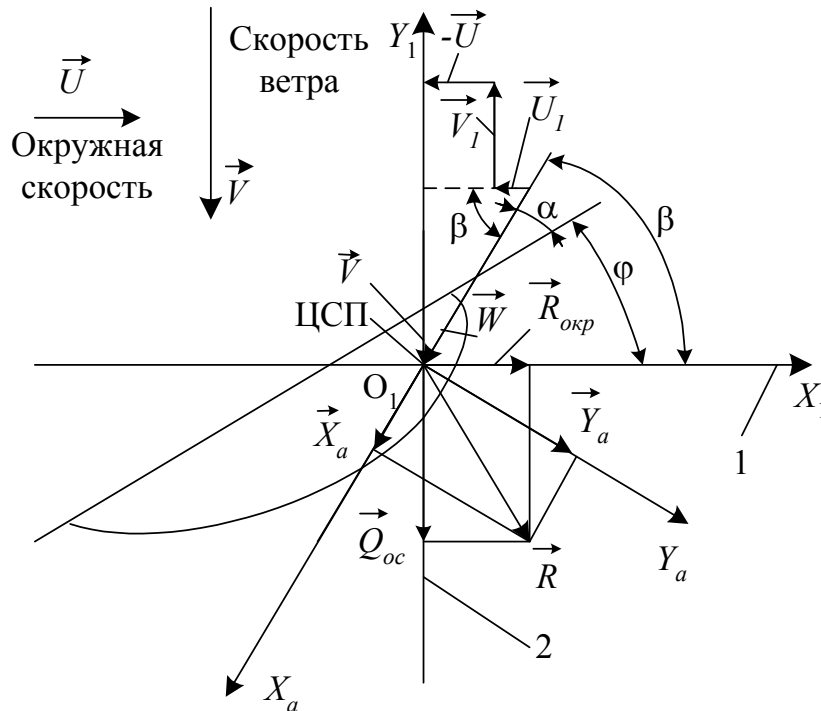


Рис. 1.2. Профиль лопасти, план скоростей и силы реакции:
1 – плоскость вращения; 2 – ось колеса

1.1. Исходные данные расчета

К исходным данным расчета относятся задаваемые ниже параметры (табл. 1.1), а также координаты выбранного профиля (рис. 1.3) и его аэродинамические характеристики. В качестве примера был выбран профиль типа «Эсперо» пятнадцатипроцентной толщины, его аэродинамические и геометрические параметры приведены в табл. 1.1 и 1.2 и на рис. 1.4.

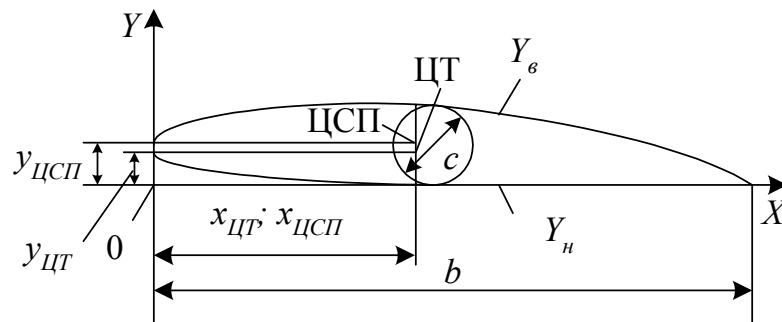


Рис. 1.3. Геометрические параметры профиля лопасти

Таблица 1.1

Условные обозначения исходных данных расчета
и их величины для конкретного примера

Наименование параметра	Обозначение	Единицы измерения	Величина
Номинальная мощность	N	Вт	1500
Среднегодовая скорость ветра	$V_{\text{ср.год}}$	м/с	7,5
Скорость ветра при порыве	$V_{\text{пор}}$	м/с	25
Количество лопастей	i_l	о. е.	3
КПД электрический	$\eta_{\text{эл}}$	о. е.	0,6
КПД механический (трансмиссии)	$\eta_{\text{мех}}$	о. е.	0,9
Плотность воздуха при нормальных атмосферных условиях	ρ	кг/ м ³	1,23
Предварительно заданный коэффициент быстроходности на конце лопасти в рабочей точке характеристики ветроколеса	Z_R	о. е.	6,5
Относительный радиус расположения корневого сечения лопасти	\bar{r}_0	о. е.	0,2
Число сечений лопасти	n	о. е.	5
Число точек деления задаваемого интервала коэффициента торможения для выбора его оптимального значения	n_e	о. е.	6
Относительная толщина профиля лопасти у корня	$\bar{c}_{\text{корн}}$	о. е.	0,20
Относительная толщина профиля лопасти на периферии	$\bar{c}_{\text{периф}}$	о. е.	0,10
Поправочный коэффициент при расчете коэффициента мощности	$K_{\text{мощн}}$	о. е.	0,8

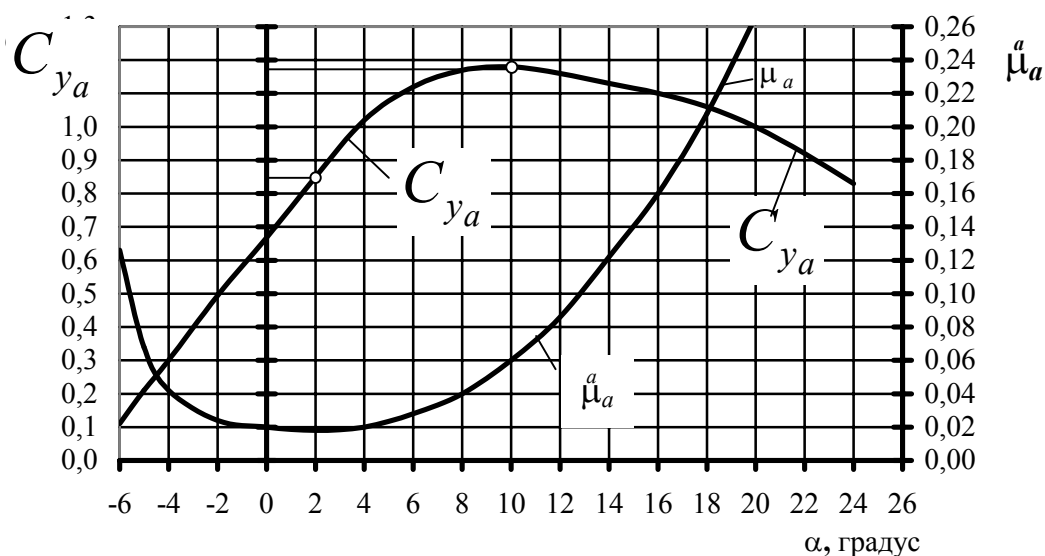


Рис. 1.4. Аэродинамические характеристики профиля типа «Эсперо»

Таблица 1.2

Аэродинамические характеристики профиля типа «Эсперо»
пятнадцатипроцентной толщины (по данным Г. Х. Сабинина [3])

Наименование параметров		Угол атаки	Коэффициент подъемной силы	Коэффициент обратного аэродинамического качества
Обозначение		α	C_{y_a}	μ_a
Единицы измерения		градус	о. е.	о. е.
Номер точки характеристики	1	-6°	0,10	0,1250
	2	-4°	0,30	0,0417
	3	-2°	0,50	0,0250
	4	0°	0,65	0,0192
	5	1°	0,76	0,0197
	6	2°	0,85	0,0182
	7	4°	1,03	0,0194
	8	6°	1,12	0,0268
	9	8°	1,16	0,0410
	10	10°	1,18	0,0593
	11	12°	1,16	0,0862
	12	14°	1,13	0,1217
	13	16°	1,10	0,1568
	14	18°	1,05	0,2071
	15	20°	0,99	0,2626

Таблица 1.3

Безразмерные координаты профиля типа «Эсперо»

Номер точки	$\bar{x} = (x/b)100\%$	$\bar{y}_e = (y_e/c)100\%$	$\bar{y}_n = (y_n/c)100\%$
1	0	41,7	41,7
2	1,25	53,8	27,9
3	2,5	60,6	22,9
4	5	69,4	16,6
5	10	82,2	11,1
6	20	96,0	5,5
7	30	100,6	2,3
8	35,2	100,533	1,133
9	40	100	0
10	50	94,5	0
11	60	83,2	0
12	70	69,4	0
13	80	51,0	0
14	90	30,7	0
15	97,5	11,6	0
16	100	2,3	0

Координаты центра тяжести (ЦТ):

$$\begin{cases} x_{ЦТ} = 0,352b, \\ y_{ЦТ} = 0,4c \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} (x_{ЦТ}/b)100\% = 35,2\%, \\ (y_{ЦТ}/c)100\% = 40\%. \end{cases}$$

Координаты центра совмещения профилей (ЦСП):

$$\begin{cases} x_{ЦСП} = 0,352b, \\ y_{ЦСП} = 0,5c \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} (x_{ЦСП}/b)100\% = 35,2\%, \\ (y_{ЦСП}/c)100\% = 50\%. \end{cases}$$

Для выбранного профиля типа «Эсперо» пятнадцатипроцентной толщины величина $c = 0,15b$.

1.2. Методика расчета геометрии лопасти

1.2.1. Расчет оптимального коэффициента торможения потока

Задаем несколько значений коэффициента торможения потока e через равный шаг от 0,27 до 0,42:

$$e_k = 0,27 + 0,15 \frac{k_e - 1}{n_e - 1}, \quad (1.3)$$

где n_e — число точек деления интервала определения e ; $k_e = 1, 2, \dots, n_e$.

Определяем значения коэффициента идеальной мощности, соответствующие e_k :

$$C_{P_{ид}} = 4e \frac{1-e}{1+e}. \quad (1.4)$$

Находим значения коэффициента концевых потерь, соответствующие e_k :

$$\bar{T}_j = \frac{e}{1-e} \left(\frac{8 \sqrt{1 + \left(\frac{1-e}{Z_R} \right)^2}}{(1+e)i_l Z_R} - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{i_l Z_R}{\pi(1-e/2)} \right)^2}} \right). \quad (1.5)$$

Определяем значения коэффициента профильных потерь, соответствующие e_k :

$$\bar{T}_p = 2\mu_{a_{\min}} \left(\frac{1-e}{Z_R} + \frac{Z_R}{3(1-e)} \right), \quad (1.6)$$

где $\mu_{a_{\min}}$ — минимальное значение μ_a из таблицы аэродинамических характеристик профиля (см. табл. 1.2).

Вычисляем коэффициент потерь на кручение струи.

Средний по высоте лопасти коэффициент быстроходности

$$Z_{cp} = \frac{1+\bar{r}_0}{2} Z_R. \quad (1.7)$$

Средний по высоте лопасти относительный КПД элементарного ветряка

$$\eta_{отн} = \frac{1 - \mu_{a_{\min}} Z_{cp} / (1-e)}{1 + \mu_{a_{\min}} (1-e) / Z_{cp}}, \quad (1.8)$$

где величину $\eta_{отн}$ определяем для каждого e_k .

Итак, коэффициент потерь на кручение струи

$$\bar{T}_m = C_{P_{u0}} \eta_{отн}^2 \frac{\ln(1/\bar{r}_0)}{2Z_R^2}, \quad (1.9)$$

где величину \bar{T}_m вычисляем для каждого e_k .

Определяем предварительный коэффициент мощности:

$$C_{P_{предв}} = C_{P_{u0}} ((1 - \bar{d}_0^2) - \bar{T}_j - \bar{T}_p - \bar{T}_m), \quad (1.10)$$

где величину $C_{P_{предв}}$ находим для каждого e_k .

С помощью сравнения найденных величин $C_{P_{предв}}$ вычисляем их максимальный элемент $C_{P_{предв. \max}}$ и соответствующий этому значению элемент e_k из заданного ряда его значений, идущих через равный шаг. Этот элемент и является оптимальным значением e_k , т. е. таким образом определяем e_{opt} .

1.2.2. Определение коэффициента мощности

На основании численных экспериментов величина коэффициента мощности в рабочей точке характеристики

$$C_p = K_{мощн} C_{P_{предв. \max}}, \quad (1.11)$$

где $K_{\text{мощн}}$ приведен в исходных данных

Коэффициент момента в рабочей точке

$$C_m = C_p / Z_R. \quad (1.12)$$

1.2.3. Методика расчета относительных параметров геометрии лопасти

Принимаем, что коэффициент торможения e равен e_{opt} .

Относительный радиус расположения сечения лопасти

$$\bar{r}_k = \bar{r}_0 + \frac{(1 - \bar{r}_0)(k - 1)}{(n - 1)}, \quad (1.13)$$

где n — число сечений лопасти; k — номер сечения.

Коэффициент быстроходности сечения

$$Z_k = Z_R \bar{r}_k. \quad (1.14)$$

Число относительных модулей сечения

$$Z_{u_k} = Z_k \frac{1 + \sqrt{1 + C_{P_{u0}} / Z_k^2}}{2(1 - e)}, \quad (1.15)$$

где $e = e_{\text{opt}}$, а под $C_{P_{u0}}$ подразумевается значение $C_{P_{u0}}$, вычисленное для $e = e_{\text{opt}}$ по формуле (1.4).

Выражение (1.15), полученное путем разрешения уравнения (1.2) относительно Z_u с учетом малости величины μ_a , является следствием второго уравнения связи (1.2).

Коэффициент суммарной нагруженности $C_{\text{нагр}_k}$ сечений лопасти, находящихся в зоне действия элементарной кольцевой струи, определяется по первому уравнению связи (1.1). С учетом принятого обозначения $C_{\text{нагр}} = i_l \bar{b} C_{y_a}$ имеем

$$C_{\text{нагр}_k} = \frac{8\pi \bar{r}_k e}{(1 + e)(1 - e)^2 (Z_{u_k} + \mu_a) \sqrt{1 + Z_{u_k}^2}}, \quad (1.16)$$

где $e = e_{\text{opt}}$; $\mu_a = \mu_{a \text{ min}}$.

Принимаем, что коэффициент подъемной силы периферийного сечения равен значению C_{y_a} при $\mu_{a_{\min}}$, взятому из аэродинамических характеристик профиля (см. табл. 1.2 для выбранного профиля и рис. 1.4):

$$C_{y_{a\text{периф}}} = C_{y_a}(\mu_{a_{\min}}). \quad (1.17)$$

Относительная хорда (в долях наружного радиуса колеса) периферийного сечения

$$\bar{b}_{\text{периф}} = \frac{C_{\text{нагр}_{\text{периф}}}}{i_{\text{л}} C_{y_{a\text{периф}}}}, \quad (1.18)$$

где индекс «периф» означает номер сечения, равного n (n — число сечений).

Коэффициент подъемной силы корневого сечения принимают обычно

$$C_{y_{a\text{корн}}} = (0,9 \dots 1,0) C_{y_{a\text{max}}}, \quad (1.19)$$

где $C_{y_{a\text{max}}}$ — максимальное значение коэффициента подъемной силы, выбранное из табл. 1.2 или рис. 1.4.

Относительная хорда (в долях наружного радиуса колеса) корневого сечения

$$\bar{b}_{\text{корн}} = \frac{C_{\text{нагр}_{\text{корн}}}}{i_{\text{л}} C_{y_{a\text{корн}}}}, \quad (1.20)$$

где индекс «корн» означает номер сечения, равного единице.

Задаемся линейным законом изменения относительной хорды вдоль лопасти:

$$\bar{b}_k = \bar{b}_{\text{корн}} + \frac{(\bar{b}_{\text{периф}} - \bar{b}_{\text{корн}})(k-1)}{n-1}, \quad (1.21)$$

где n — число сечений лопасти.

Коэффициент подъемной силы промежуточного сечения

$$C_{y_{a k}} = \frac{C_{\text{нагр}_k}}{i_{\text{л}} \bar{b}_k}. \quad (1.22)$$

Определяем угол атаки α_k , соответствующий найденному значению $C_{y_{a k}}$, по рис. 1.4 на восходящей ветви функции $C_{y_{a k}}$ или по табл. 1.2.

По табл. 1.2 (см. столбец C_{y_a}) на восходящей ветви значений ($C_{y_a} \leq C_{y_{a \max}}$) находим значение C_{y_a} , ближайшее по величине к $C_{y_{ak}}$, но большее. Пусть его номер в столбце таблицы будет i_k , тогда номер предыдущего элемента — $i_k - 1$. Произведем линейную интерполяцию на интервале ($C_{y_a}(i_k - 1), C_{y_a}(i_k)$) для определения α_k :

$$\alpha_k = \alpha(i_k - 1) + (\alpha(i_k) - \alpha(i_k - 1)) \frac{C_{y_{ak}} - C_{y_a}(i_k - 1)}{C_{y_a}(i_k) - C_{y_a}(i_k - 1)}. \quad (1.23)$$

Угол притекания сечения лопасти

$$\beta_k = \arctg(1/Z_{u_k}). \quad (1.24)$$

Угол установки (заклинения) лопасти

$$\varphi_k = \beta_k - \alpha_k. \quad (1.25)$$

Относительная толщина профиля

$$\bar{C}_k = \frac{1}{\bar{b}_k} \left[\bar{C}_{\text{корн}} \bar{b}_{\text{корн}} + (\bar{C}_{\text{периф}} \bar{b}_{\text{периф}} - \bar{C}_{\text{корн}} \bar{b}_{\text{корн}}) \frac{k-1}{n-1} \right], \quad (1.26)$$

где $\bar{C}_{\text{корн}}$ и $\bar{C}_{\text{периф}}$ — величины относительной толщины профиля у корня лопасти и на периферии в долях хорды профиля, значения которых приведены в табл. 1.1.

Итак, для каждого сечения лопасти имеем следующие параметры: относительный радиус расположения сечения, относительную (в долях наружного радиуса) хорду профиля, относительную толщину профиля \bar{C}_k , коэффициент подъемной силы, угол притекания, угол атаки, угол заклинения (угол установки) профиля.

Размерные параметры могут быть получены по заданной величине мощности, найденному коэффициенту мощности C_P и заданному коэффициенту быстроходности Z .

1.3. Расчет размерных параметров ветроколеса

1.3.1. Исходные данные расчета размерных параметров

Исходными данными для расчета размерных параметров являются следующие: номинальная мощность, КПД электрический, КПД механический, плотность воздуха, среднегодовая скорость ветра, скорость ветра при порыве,

параметры характеристик в рабочей точке C_P , C_m , $Z_{p.m}$, безразмерные координаты выбранного профиля, найденные расчетным путем, а затем уточненные.

1.3.2. Размерные параметры ветроколеса

Расчетная скорость ветра

В табл. 1.4 приведены значения $V_{\text{ср.год}}$ и соответствующие им значения V для $V_{\text{ср.год}} \leq 6$ м/с по [1] и $V_{\text{ср.год}} > 6$ м/с — по [5].

Таблица 1.4

Зависимость расчетной скорости ветра от среднегодовой

$V_{\text{ср.год}}, \text{ м/с}$	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0
$V, \text{ м/с}$	5,0	6,5	7,5	8,5	9,7	10,8	12,0	13,3

На рис. 1.5 дана графическая зависимость $V(V_{\text{ср.год}})$. График с достаточной для расчетов точностью может быть аппроксимирован трехзвенной ломаной.

Первый участок ($3 \text{ м/с} \leq V_{\text{ср.год}} < 4 \text{ м/с}$) —

$$V = 0,5 + 1,5V_{\text{ср.год}}; \quad (1.27)$$

второй участок ($4 \text{ м/с} \leq V_{\text{ср.год}} \leq 6 \text{ м/с}$) —

$$V = 2,5 + V_{\text{ср.год}}; \quad (1.28)$$

третий участок ($V_{\text{ср.год}} > 6 \text{ м/с}$) —

$$V = 1,3 + 1,2V_{\text{ср.год}}. \quad (1.29)$$

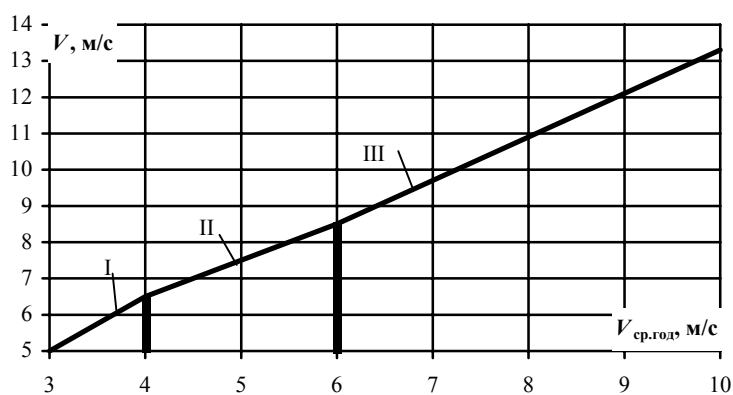


Рис. 1.5. Зависимость установленной скорости ветра V от среднегодовой скорости ветра $V_{\text{ср.год}}$

Наружный диаметр ветроколеса, м,

$$D = \sqrt{\frac{8N}{C_P \rho V^3 \pi \eta_{эл} \eta_{мех}}}. \quad (1.30)$$

Внутренний диаметр ветроколеса, м,

$$d = \bar{d}_0 D. \quad (1.31)$$

Радиус ветроколеса, м,

$$R = D/2. \quad (1.32)$$

Радиус расположения сечения лопасти, м,

$$r_k = \bar{r}_k R. \quad (1.33)$$

Относительный шаг между сечениями лопасти, м,

$$\Delta \bar{r} = \frac{1 - \bar{r}_0}{n - 1}. \quad (1.34)$$

Шаг между сечениями лопасти, м,

$$\Delta r = \Delta \bar{r} R. \quad (1.35)$$

Хорда сечения, м,

$$b_k = \bar{b}_k R. \quad (1.36)$$

где \bar{b}_k рассчитываем по (1.21).

Толщина профиля, м, (см. рис. 1.3)

$$c_k = \bar{c}_k b_k, \quad (1.37)$$

где \bar{c}_k — задаваемая максимальная относительная (в долях хорды b_k) толщина профиля (см. формулу (1.26)).

Координаты профилей сечений лопасти строим в соответствии с табл. 1.3, где

$$x_i = \bar{x}_i \frac{b_k}{100}, \quad y_{\epsilon_i} = \bar{y}_{\epsilon_i} \frac{c_k}{100}, \quad y_{\eta_i} = \bar{y}_{\eta_i} \frac{c_k}{100}. \quad (1.38)$$

1.3.3. Построение линейчатой лопасти

По классической методике в области корня лопасти крутка сечений получается, как правило, большой, что очень осложняет технологический про-

цесс изготовления лопасти. Анализ показал, что крутящие моменты, создаваемые элементарными лопастями, лежащими ниже среднего сечения, существенно меньше крутящих моментов, создаваемых элементарными лопастями, расположенными в верхней половине лопасти. Вследствие этого было предложено [6] заменить построение лопасти по классической методике [1, 4] построением по упрощенной методике, где за основу берутся два сечения — среднее и периферийное. Геометрические параметры этих сечений принимаются такими же, как и параметры этих сечений, посчитанные по классической методике. Через точки, имеющие один и тот же номер на двух исходных профилях, проводят пространственные прямые. Относительная хорда в долях радиуса среднего и периферийного сечений может быть взята такой же, как получается по классической методике, но может быть скорректирована, по сравнению с расчетными значениями, в соответствии с конструктивными соображениями. Относительная толщина в долях хорды для заданных двух сечений выбирается так, чтобы в среднем сечении был профиль пятнадцатипроцентной толщины, т. е. $C_{cp} = 0,15b_{cp}$, а на периферийном сечении, в связи с необходимостью уменьшить толщину профиля из соображений прочности, можно принять $C_{периф} = 0,10b_{периф}$.

Для слабо закрученных лопастей в их верхней части, т. е. для $\Delta\varphi_{верхн} = \varphi_{cp} - \varphi_{периф}$, меньшего 8° , относительные хорды профилей по высоте лопасти подчиняются линейному закону и выраженные в долях радиуса колеса подчинены уравнению

$$\bar{b}_{k_R} = \bar{b}_{cp_R} + (\bar{b}_{периф_R} - \bar{b}_{cp_R})S_k, \quad (1.39)$$

где

$$S_k = 2\left(\frac{k-1}{n-1} - 0,5\right). \quad (1.40)$$

Относительная толщина профиля в долях радиуса колеса, так же как и относительная хорда, для величин $\Delta\varphi_{верх}$, меньших 8° , изменяется по линейному закону, в то время как относительная толщина в долях хорды подчиняется нелинейному закону:

$$\bar{c}_k = \frac{1}{\bar{b}_{k_R}} \left[\bar{c}_{cp} \bar{b}_{cp_R} + (\bar{c}_{периф} \bar{b}_{периф_R} - \bar{c}_{корн} \bar{b}_{корн}) \right] S_k, \quad (1.41)$$

где \bar{b}_{k_R} и S_k определены по формулам (1.39) и (1.40).

В частном случае, когда $\bar{b}_{k_R} = const$, \bar{c}_k изменяется по линейному закону.

Координаты центра совмещения профилей выразим так:

$$x_{ЦСП_k} = 0,352b_k, \quad y_{ЦСП_k} = 0,5c_k, \quad (1.42)$$

где b_k и c_k вычисляем по формулам

$$b_k = \bar{b}_{k_R} R, \quad c_k = \bar{c}_k b_k,$$

причем \bar{c}_k изменяется по формуле (1.41).

Координаты профилей в этом случае находим через их безразмерные величины, хорду b_k и толщину профиля c_k с помощью табл. 1.3 и по формулам (1.38)

$$x_i = \frac{\bar{x}_i b_k}{100}, \quad y_{\epsilon_i} = \frac{\bar{y}_{\epsilon_i} c_k}{100}, \quad y_{\eta_i} = \frac{\bar{y}_{\eta_i} c_k}{100}.$$

Определим углы установки сечений.

Угол установки профиля φ (рис. 1.6) — это угол между его хордой (его уплощенной стороной) и плоскостью вращения. Поэтому если взять любые две точки, например, одиннадцатую и тринадцатую на уплощенной стороне (на корытце) профиля, то в системе координат $X_1 O_1 Y_1$ тангенс угла φ_k k -го сечения

$$\operatorname{tg} \varphi_k = \frac{y_{1_{кор.k}}(11) - y_{1_{кор.k}}(13)}{x_{1_{кор.k}}(11) - x_{1_{кор.k}}(13)}. \quad (1.43)$$

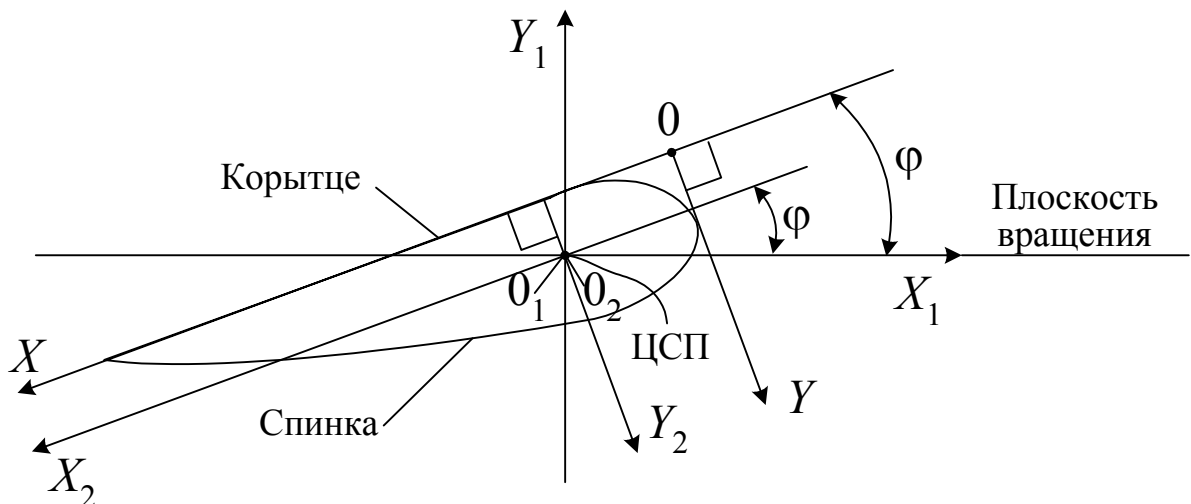


Рис. 1.6. Связь между системами координат профиля

Для того, чтобы получить координаты точек профилей промежуточных сечений в системе координат $X_1 O_1 Y_1$, следует вначале получить координаты точек профилей в той же системе координат для двух исходных сечений

лопасти — периферийного и среднего, углы установки, хорды и толщины которых известны, а также известны определенные по (1.42) координаты центра совмещения профилей среднего и периферийного сечений:

$$\begin{cases} x_{ЦСП_{cp}}, \\ y_{ЦСП_{cp}}; \end{cases} \begin{cases} x_{ЦСП_{периф}}, \\ y_{ЦСП_{периф}}. \end{cases}$$

Формулы для координат точек корытца среднего сечения:

$$\begin{cases} x_{1_{кор.ср}}(i) = -(x_{ср}(i) - x_{ЦСП_{ср}}) \cos \varphi_{ср} + \\ \quad + (y_{н_{ср}}(i) - y_{ЦСП_{ср}}) \sin \varphi_{ср}, \\ y_{1_{кор.ср}}(i) = -(x_{ср}(i) - x_{ЦСП_{ср}}) \sin \varphi_{ср} - \\ \quad - (y_{н_{ср}}(i) - y_{ЦСП_{ср}}) \cos \varphi_{ср}. \end{cases} \quad (1.44)$$

Формулы для координат точек корытца периферийного сечения:

$$\begin{cases} x_{1_{кор.периф}}(i) = -(x_{периф}(i) - x_{ЦСП_{периф}}) \cos \varphi_{периф} + \\ \quad + (y_{н_{периф}}(i) - y_{ЦСП_{периф}}) \sin \varphi_{периф}, \\ y_{1_{кор.периф}}(i) = -(x_{периф}(i) - x_{ЦСП_{периф}}) \sin \varphi_{периф} - \\ \quad - (y_{н_{периф}}(i) - y_{ЦСП_{периф}}) \cos \varphi_{периф}. \end{cases} \quad (1.45)$$

Формулы для координат точек корытца промежуточных профилей:

$$\begin{cases} x_{1_{кор.k}}(i) = x_{1_{кор.ср}}(i) + [x_{1_{кор.периф}}(i) - x_{1_{кор.ср}}(i)] S_k, \\ y_{1_{кор.k}}(i) = y_{1_{кор.ср}}(i) + [y_{1_{кор.периф}}(i) - y_{1_{кор.ср}}(i)] S_k, \end{cases} \quad (1.46)$$

где S_k определяем по формуле (1.40).

Для точек корытца с номерами, например, $i = 11$ и $i = 13$, угол φ_k определяем по формуле (1.43)

Итак, для слабой закрученности, т. е. $\Delta \varphi_{верх} \leq 8^\circ$, имеем полный расчет координат профилей, включая углы установки.

При сильной закрученности лопасти хорда b_k не подчиняется линейному закону, поэтому координаты профилей нельзя получить последовательным применением формул (1.39) — (1.41) и табл. 1.3. В этом случае к выражениям (1.44), (1.45) и (1.46) для координат точек корытца среднего, периферийного и промежуточного сечений следует добавить формулы для координат

нат точек спинки среднего (1.47), периферийного (1.48) и промежуточного (1.49) сечений:

$$\begin{cases} x_{1_{cn.cp}}(i) = -(x_{cp}(i) - x_{ЦСП_{cp}}) \cos \varphi_{cp} + \\ \quad + (y_{\epsilon_{cp}}(i) - y_{ЦСП_{cp}}) \sin \varphi_{cp}, \\ y_{1_{cn.cp}}(i) = -(x_{cp}(i) - x_{ЦСП_{cp}}) \sin \varphi_{cp} - \\ \quad - (y_{\epsilon_{cp}}(i) - y_{ЦСП_{cp}}) \cos \varphi_{cp}; \end{cases} \quad (1.47)$$

$$\begin{cases} x_{1_{cn.периф}}(i) = -(x_{периф}(i) - x_{ЦСП_{периф}}) \cos \varphi_{периф} + \\ \quad + (y_{\epsilon_{периф}}(i) - y_{ЦСП_{периф}}) \sin \varphi_{периф}, \\ y_{1_{cn.периф}}(i) = -(x_{периф}(i) - x_{ЦСП_{периф}}) \sin \varphi_{периф} - \\ \quad - (y_{\epsilon_{периф}}(i) - y_{ЦСП_{периф}}) \cos \varphi_{периф}; \end{cases} \quad (1.48)$$

$$\begin{cases} x_{1_{cn.k}}(i) = x_{1_{cn.cp}}(i) + [x_{1_{cn.периф}}(i) - x_{1_{cn.cp}}(i)] S_k, \\ y_{1_{cn.k}}(i) = y_{1_{cn.cp}}(i) + [y_{1_{cn.периф}}(i) - y_{1_{cn.cp}}(i)] S_k, \end{cases} \quad (1.49)$$

где S_k определяем по формуле (1.40).

Зная координаты точек профиля любого сечения в системе координат $X_1O_1Y_1$ и проделав поворот «назад» к системе координат $X_2O_2Y_2$ вокруг точки O_1 (или, что то же самое, точки O_2), получим координаты профиля в этой системе (см. рис. 1.6):

$$\begin{cases} x_{2_k} = -x_{1_k} \cos \varphi_k - y_{1_k} \sin \varphi_k, \\ y_{2_k} = x_{1_k} \sin \varphi_k - y_{1_k} \cos \varphi_k. \end{cases} \quad (1.50)$$

В системе координат $X_2O_2Y_2$ найдем хорду как абсолютную величину разности между абсциссами крайних точек профиля:

$$b_k = |x_{2_k}(i=1) - x_{2_k}(i=i_{носл})|. \quad (1.51)$$

Определим ординату центра совмещения профилей (ЦСП) в системе координат XOY как ординату, взятую с обратным знаком, любой точки, принадлежащей уплощенной лопасти профиля — корытцу, в системе координат $X_2O_2Y_2$, например, 12-й точки:

$$y_{ЦСП_k} = -y_{2_k} \quad (1.52)$$

Абсцисса точки ЦСП в системе координат XOY выражается как взятая с обратным знаком абсцисса начальной точки в системе координат $X_2O_2Y_2$:

$$x_{ЦСП_k} = -y_{2_k} \quad (1.53)$$

Окончательно имеем координаты точек профиля в системе координат XOY (см. рис. 1.6):

$$\begin{aligned} x_k &= x_{2_k} + x_{ЦСП_k}; \\ y_k &= y_{2_k} + y_{ЦСП_k}. \end{aligned} \quad (1.54)$$

Толщина профиля равна удвоенной ординате:

$$c_k = 2y_{ЦСП_k}. \quad (1.55)$$

Углы установки, как и ранее, определяем по формуле (1.43).

Схематично линейчатая лопасть показана на рис. 1.7, где для наглядности показаны сходственные точки, лежащие на одной и той же пространственной прямой (например, точка корытца каждого профиля 7к или точка спинки каждого сечения 2с).

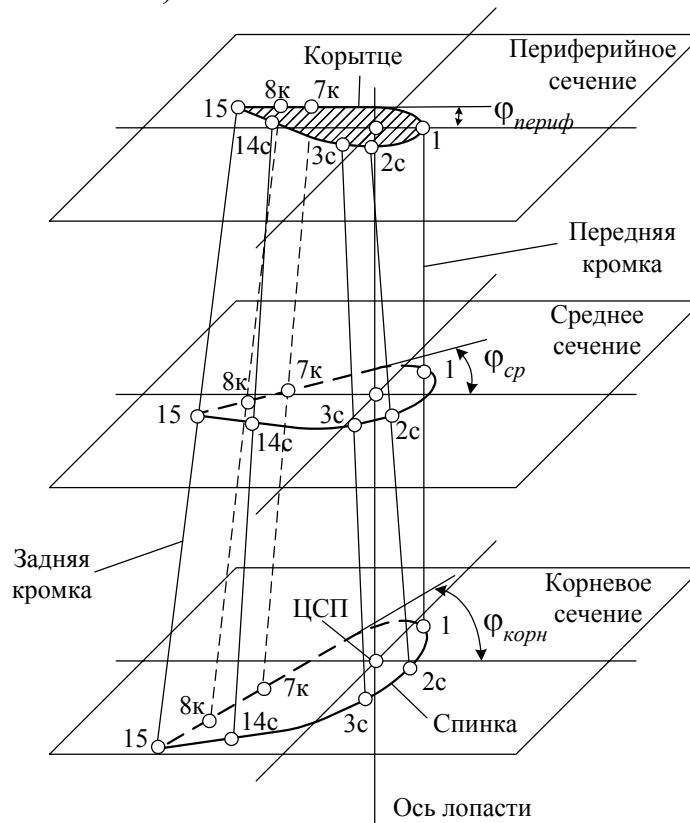


Рис. 1.7. Схематичное изображение линейчатой лопасти

2. ПРИМЕР РАСЧЕТА ВЕТРОКОЛЕСА С ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ОСЬЮ ВРАЩЕНИЯ

2.1. Расчет оптимального коэффициента торможения потока

2.1.1. Коэффициент торможения потока

Задаем шесть значений коэффициента торможения потока e через равный шаг от 0,27 до 0,42 по формуле (1.3):

$$e_k = 0,27 + 0,15 \frac{k_e - 1}{n_e - 1}.$$

При $n_e = 6$

$$e_k = 0,27 + 0,15 \frac{k_e - 1}{6 - 1} = 0,27 + 0,03(k_e - 1);$$

$$k_e = 1; 2; 3; 4; 5; 6;$$

$$e_1 = 0,27; e_2 = 0,3; e_3 = 0,33; e_4 = 0,36; e_5 = 0,39; e_6 = 0,42.$$

2.1.2. Коэффициент идеальной мощности

По формуле (1.4) определяем шесть значений коэффициента идеальной мощности $C_{p_{ид}}$, соответствующих шести значениям e_k :

$$C_{p_{ид}} = 4e \frac{1 - e}{1 + e};$$

$$C_{p_{ид1}} = 4e_1 \frac{1 - e_1}{1 + e_1} = 4 \cdot 0,27 \frac{1 - 0,27}{1 + 0,27} = 0,621.$$

Для остальных значений e_k величины $C_{p_{идk}}$ представлены ниже в табл. 2.1.

2.1.3. Коэффициент концевых потерь

По формуле (1.5) находим шесть значений коэффициента концевых потерь \bar{T}_j , соответствующих e_k :

$$\bar{T}_j = \frac{e}{1-e} \left(\frac{8 \sqrt{1 + \left(\frac{1-e}{z_R} \right)^2}}{(1+e)i_{\lambda} Z_R} - \left(\sqrt{1 + \left(\frac{i_{\lambda} Z_R}{\pi(1-e/2)} \right)^2} \right)^{-1} \right).$$

Вычисляем \bar{T}_j для e_1 , остальные значения приведем в табл. 2.1:

$$\bar{T}_{j1} = \frac{0,27}{1-0,27} \left(\frac{8 \sqrt{1 + \left(\frac{1-0,27}{6,5} \right)^2}}{(1+0,27)3 \cdot 6,5} - \left(\sqrt{1 + \left(\frac{3 \cdot 6,5}{\pi(1-0,27/2)} \right)^2} \right)^{-1} \right) = 0,069.$$

2.1.4. Коэффициент профильных потерь

По формуле (1.6) находим шесть значений коэффициента профильных потерь \bar{T}_p , соответствующих e_k :

$$\bar{T}_p = 2\mu_{a_{\min}} \left(\frac{1-e}{Z_R} + \frac{Z_R}{3(1-e)} \right).$$

Находим \bar{T}_p для e_1 , остальные значения даны в табл. 2.1:

$$\bar{T}_{p1} = 2 \cdot 0,0182 \left(\frac{1-0,27}{6,5} + \frac{6,5}{3(1-0,27)} \right) = 0,112.$$

2.1.5. Коэффициент потерь на кручение струи

По формуле (1.7) определяем средний по высоте лопасти коэффициент быстроходности:

$$Z_{cp} = \frac{1+\bar{r}_0}{2} Z_R = \frac{1+0,2}{2} 6,5 = 3,9.$$

По формуле (1.8) вычисляем средний по высоте лопасти относительный КПД элементарного ветряка $\eta_{отн}$ для e_1 , остальные значения даны в табл. 2.1:

$$\eta_{отн_1} = \frac{1 - \frac{0,0182 \cdot 3,9}{1 - 0,27}}{1 + \frac{0,0182(1 - 0,27)}{3,9}} = 0,8997 \approx 0,900 .$$

По формуле (1.9) определяем коэффициент потерь на кручение струи для e_1 , остальные значения приведены в табл. 2.1:

$$\bar{T}_{m_1} = 0,621 \cdot 0,9^2 \frac{\ln(1/0,2)}{2 \cdot 6,5^2} = 0,0096 \approx 0,010 .$$

2.1.6. Предварительный коэффициент мощности

По формуле (1.10) вычисляем предварительный коэффициент мощности $C_{P_{предв}}$ для e_1 , остальные значения $C_{P_{предв}}$ даны в табл. 2.1:

$$C_{P_{предв 1}} = 0,621((1 - 0,2^2) - 0,069 - 0,112 - 0,010) = 0,477 .$$

2.1.7. Значения параметров, зависящих от коэффициента торможения

В табл. 2.1 приведем величины найденных параметров при различных значениях e .

Таблица 2.1

Величины найденных параметров при различных значениях e

Наименование параметров	Обозначение	Номер точки					
		1	2	3	4	5	6
Коэффициент торможения потока	e	0,27	0,3	0,33	0,36	0,39	0,42
Коэффициент идеальной мощности	$C_{P_{ид}}$	0,621	0,646	0,665	0,678	0,685	0,686
Коэффициент концевых потерь	\bar{T}_j	0,069	0,078	0,087	0,097	0,107	0,119
Коэффициент профильных потерь	\bar{T}_p	0,112	0,117	0,121	0,127	0,133	0,139
Средний по высоте лопасти относительный КПД	$\eta_{отн}$	0,900	0,896	0,891	0,886	0,881	0,875
Коэффициент потерь на кручение струи	\bar{T}_m	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010
Предварительный коэффициент мощности	$C_{P_{предв}}$	0,477	0,488	0,493	0,492	0,486	0,475

2.1.8. Выбор максимального значения $C_{p_{предв}}$ и определение соответствующего ему значения $e — e_{opt}$

Из последней строки табл. 2.1 видно, что максимальным значением $C_{p_{предв}}$ является число 0,493, т. е.

$$C_{p_{предв} \max} = 0,493, \text{ а } e_{opt} = 0,33.$$

2.1.9. Определение расчетного коэффициента мощности

По формуле (1.11) определяем расчетный коэффициент мощности:

$$C_P = K_{\text{мощн}} C_{p_{предв} \max} = 0,8 \cdot 0,493 = 0,394.$$

2.2. Расчет относительных параметров геометрии лопасти

Для $e = e_{opt} = 0,33$ при числе сечений лопасти $n = 5$ определяем геометрию лопасти при выбранных пяти сечениях.

2.2.1. Относительный радиус расположения сечения лопасти

По формуле (1.11) вычисляем \bar{r}_k для $n = 5$:

$$\bar{r}_k = \bar{r}_0 + \frac{(1 - \bar{r}_0)(k - 1)}{(5 - 1)}, \quad k = 1, 2, \dots, 5.$$

При $\bar{r}_0 = 0,2$

$$\bar{r}_k = 0,2 + 0,8 \frac{k - 1}{4};$$

$\bar{r}_1 = 0,2$ — корневое сечение;

$$\bar{r}_2 = 0,4; \quad \bar{r}_3 = 0,6; \quad \bar{r}_4 = 0,8; \quad \bar{r}_5 = 1.$$

2.2.2. Коэффициент быстроходности сечения лопасти

По формуле (1.14) находим

$$Z_k = Z_R \bar{r}_k = 6,5 \bar{r}_k;$$

$$Z_1 = 1,3; \quad Z_2 = 2,6; \quad Z_3 = 3,9; \quad Z_4 = 5,2; \quad Z_5 = 6,5.$$

2.2.3. Число относительных модулей сечения лопасти

По формуле (1.15) вычисляем

$$Z_{u_k} = Z_k \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{C_{P_{u0}}}{Z_k^2}}}{2(1 - e_{opt})} = Z_k \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{0,665}{Z_k^2}}}{2(1 - 0,33)}.$$

Для $k = 1$

$$Z_{u_1} = \frac{1,3 \left(1 + \sqrt{1 + \frac{0,665}{1,3^2}} \right)}{2(1 - 0,33)} = 2,115.$$

Остальные значения Z_u даны в табл. 2.2.

2.2.4. Коэффициент суммарной нагруженности сечений лопастей, находящихся в зоне действия элементарной кольцевой струи

По формуле (1.16) определяем

$$C_{нагр_k} = \frac{8\pi \bar{r}_k e_{opt}}{(1 + e_{opt})(1 - e_{opt})^2} \frac{1}{(Z_{u_k} + \mu_{a_{min}}) \sqrt{1 + Z_{u_k}^2}}.$$

Для $k = 1$

$$C_{нагр_1} = \frac{8\pi \cdot 0,2 \cdot 0,33}{(1 + 0,33)(1 - 0,33)^2} \frac{1}{(2,115 + 0,0182) \sqrt{1 + 2,115^2}} = 0,557.$$

Остальные значения $C_{нагр}$ приведены в табл. 2.2.

2.2.5. Значения параметров для пяти сечений лопасти

Таблица 2.2

Значения параметров для пяти сечений

Наименование параметров	Обозначение	Номер сечения лопасти				
		1 (корень)	2	3	4	5 (периферия)
Относительное расстояние сечения лопасти от оси колеса	\bar{r}_k	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
Коэффициент быстроходности сечения лопасти	Z_k	1,3	2,6	3,9	5,2	6,5

Наименование параметров	Обозначение	Номер сечения лопасти				
		1 (корень)	2	3	4	5 (периферия)
Число относительных модулей сечения лопасти	$Z_{ик}$	2,115	3,974	5,884	7,809	9,740
Коэффициент суммарной нагрузки	$C_{нагрк}$	0,557	0,340	0,237	0,180	0,145

2.2.6. Коэффициент подъемной силы периферийного сечения

Из выражения (1.17) — $C_{y_{a\text{ периф}}} = C_{y_a}(\mu_{a\min})$ — и табл. 1.2. имеем $\mu_{a\min} = 0,0182$, соответствующее ему

$$C_{y_a}(\mu_{a\min}) = 0,85.$$

Итак, $C_{y_{a\text{ периф}}} = 0,85$.

2.2.7. Относительная хорда (в долях наружного радиуса колеса) периферийного сечения

По формуле (1.18) находим

$$\bar{b}_{\text{периф}} = \frac{C_{нагр\text{ периф}}}{i_{\text{л}} C_{y_{a\text{ периф}}}} = \frac{C_{нагр5}}{i_{\text{л}} C_{y_{a\text{ периф}}}} = 0,145 / (3 \cdot 0,85) = 0,057 \approx 0,06.$$

Относительная хорда в долях диаметра колеса

$$\bar{b}_{\text{периф}D} = \bar{b}_{\text{периф}} / 2 \approx 0,06 / 2 = 0,03 \text{ (т.е. около 3 \%)}.$$

2.2.8. Коэффициент подъемной силы корневого сечения

По уравнению (1.19) определяем

$$C_{y_{a\text{ корн}}} = 0,9 C_{y_{a\text{ max}}}.$$

Из исходных данных (см. табл. 1.2) имеем $C_{y_{a\text{ max}}} = 1,18$, следовательно, но,

$$C_{y_{a\text{ корн}}} = 0,9 \cdot 1,18 = 1,062.$$

2.2.9. Относительная хорда (в долях наружного радиуса колеса) корневого сечения

По выражению (1.20) находим

$$b_{\text{корн}} = \frac{C_{\text{нагр}_{\text{корн}}}}{i_{\text{л}} C_{y_{\text{корн}}}} = \frac{0,557}{3 \cdot 1,062} = 0,175.$$

Принимаем $\bar{b}_{\text{корн}} = 0,18$.

Относительная хорда в долях диаметра колеса

$$b_{\text{корнD}} = \frac{b_{\text{корн}}}{2} = \frac{0,18}{2} = 0,09.$$

2.2.10. Относительная хорда (в долях радиуса колеса) промежуточного сечения

По формуле (1.21) вычисляем

$$b_k = b_{\text{корн}} + (b_{\text{периф}} - b_{\text{корн}}) \frac{k-1}{n-1}.$$

Для $k = 1$ (корневое сечение)

$$\bar{b}_1 = \bar{b}_{\text{корн}} = 0,18 \text{ (см. выше),}$$

для $k = 2$

$$b_2 = 0,18 + (0,06 - 0,18) \frac{2-1}{5-1} = 0,15,$$

для $k = 3$ $\bar{b}_3 = 0,12$, для $k = 4$ $\bar{b}_4 = 0,09$, для $k = 5$ $\bar{b}_5 = 0,06$ (периферия).

2.2.11. Коэффициент подъемной силы промежуточного сечения

По формуле (1.22) — $C_{y_{ak}} = \frac{C_{\text{нагр}_k}}{i_{\text{л}} \bar{b}_k}$ — находим

$$C_{y_{a1}} = 0,557 / (3 \cdot 0,18) = 1,062,$$

$$C_{y_{a2}} = 0,340 / (3 \cdot 0,15) = 0,779,$$

$$C_{y_a 3} = 0,237 / (3 \cdot 0,12) = 0,681 ,$$

$$C_{y_a 4} = 0,180 / (3 \cdot 0,09) = 0,696 ,$$

$$C_{y_a 5} = 0,146 / (3 \cdot 0,06) = 0,85 .$$

2.2.12. Определение номера элемента на восходящей ветви исходных значений характеристики C_{y_a} , ближайшего к $C_{y_a k}$ и большего его

Сравниваем $C_{y_a k}$ с возрастающей по величине частью массива исходных данных (см. табл. 1.2). Определяем номер элемента, ближайшего по величине к $C_{y_a k}$ и большего его.

Для первого сечения $C_{y_a 1} = 1,062$ и, сравнивая его с элементами табл. 1.2 (для $C_{y_a k} < 1,18$), имеем $i_1 = 8$;

для второго сечения — $C_{y_a 2} = 0,779$, $i_2 = 6$;

для третьего сечения — $C_{y_a 3} = 0,681$, $i_3 = 5$;

для четвертого сечения — $C_{y_a 4} = 0,696$, $i_4 = 5$;

для пятого сечения — $C_{y_a 5} = 0,85$, $i_5 = 6$

(для пятого сечения значение $C_{y_a 5}$ совпадает со значением элемента массива C_{y_a} в табл. 1.2).

2.2.13. Угол атаки промежуточного сечения

По выражению (1.23) определяем

$$\alpha_k = \alpha(i_k - 1) + (\alpha(i_k) - \alpha(i_k - 1)) \frac{C_{y_a k} - C_{y_a}(i_k - 1)}{C_{y_a}(i_k) - C_{y_a}(i_k - 1)} .$$

Приведем вычисление α_k , например, для $k = 3$, а для остальных запишем результаты вычислений: для $k = 3$ — $i_3 = 5$, тогда $i_3 - 1 = 4$; $\alpha(4) = 0^\circ$; $\alpha(5) = 1^\circ$; $C_{y_a}(4) = 0,65$; $C_{y_a}(5) = 0,76$. При $k = 3$ $C_{y_a 3} = 0,681$ (см. выше).

Итак, для $k = 3$

$$\alpha_3 = \alpha(4) + (\alpha(5) - \alpha(4)) \frac{0,681 - C_{y_a}(4)}{C_{y_a}(5) - C_{y_a}(4)} =$$

$$= 0^\circ + (1^\circ - 0^\circ) \frac{0,681 - 0,65}{0,76 - 0,65} = 0,28^\circ.$$

Аналогично получаем остальные α_k :

$$\alpha_1 = 4,71^\circ; \alpha_2 = 1,22^\circ; \alpha_3 = 0,28^\circ; \alpha_4 = 0,41^\circ; \alpha_5 = 2^\circ.$$

Величины α можно также определить по графику на рис. 1.4.

2.2.14. Угол притекания сечения лопасти

По формуле (1.24) определяем $\beta_k = \arctg(1/Z_{u_k})$.

В соответствии с полученными значениями Z_{u_k} , приведенными в табл. 2.2,

$$\beta_1 = \arctg(1/2,115) = 25,3^\circ;$$

$$\beta_2 = 14,1^\circ; \beta_3 = 9,6^\circ; \beta_4 = 7,3^\circ; \beta_5 = 5,9^\circ.$$

2.2.15. Угол заклинения (установки) сечения лопасти

По выражению (1.25) — $\varphi_k = \beta_k - \alpha_k$; — находим

$$\varphi_1 = \beta_1 - \alpha_1 = 25,3^\circ - 4,7^\circ = 20,6^\circ;$$

$$\varphi_2 = 12,9^\circ; \varphi_3 = 9,4^\circ; \varphi_4 = 6,9^\circ; \varphi_5 = 3,9^\circ.$$

2.2.16. Итог расчета относительных параметров геометрии лопасти

В табл. 2.3 приведены относительные параметры расчета геометрии лопасти.

Таблица 2.3

Относительные параметры геометрии лопасти

Наименование параметров, единицы измерения	Обозначение	Номер сечения				
		1 (корень)	2	3	4	5 (периферия)
Относительный радиус расположения сечения лопасти, о. е.	\bar{r}_k	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
Относительная (в долях наружного радиуса колеса) хорда сечения лопасти, о. е.	\bar{b}_k	0,18	0,15	0,12	0,09	0,06

Наименование параметров, единицы измерения	Обозначение	Номер сечения				
		1 (корень)	2	3	4	5 (периферия)
Коэффициент подъемной силы, о. е.	$C_{y_{ak}}$	1,062	0,779	0,681	0,696	0,85
Угол притекания, градус	β_k	25,3	14,1	9,6	7,3	5,9
Угол заклинения (установки) сечения лопасти, градус	φ_k	20,6	12,9	9,4	6,9	3,9

2.3. Расчет размерных параметров ветроколеса

2.3.1. Исходные данные расчета размерных параметров

Исходными данными для расчета размерных параметров являются (см. табл. 1.1):

- номинальная мощность $N = 1500$ Вт;
- КПД электрический $\eta_{эл} = 0,6$;
- КПД механический $\eta_{мех} = 0,9$;
- плотность воздуха $\rho = 1,23$ кг/м³;
- среднегодовая скорость ветра $V = 7,5$ м/с;
- скорость ветра при порыве $V_{пор} = 25$ м/с;
- заданный коэффициент быстроходности в рабочей точке $Z_{p.m} = 6,5$,

а также полученный по (1.11) в подразд. 2.1.9 коэффициент $C_{P_{расч}}$ в рабочей точке $C_{P_{расч}} = 0,394$.

Принимаем $C_{P_{расч}} = 0,4$, тогда

$$C_{m_{расч}} = \frac{C_{P_{расч}}}{Z_{p.m}} = \frac{0,4}{6,5} = 0,0615.$$

К исходным данным расчета относятся также безразмерные координаты профиля типа «Эсперо» пятнадцатипроцентной толщины (см. табл. 1.3).

2.3.2. Размерные параметры ветроколеса

Расчетная скорость ветра

Поскольку $V_{ср.год} = 7,5$ м/с, то есть $V_{ср.год} > 6$ м/с, то по формуле (1.29) вычисляем

$$V = 1,3 + 1,2V_{\text{ср.год}} = 10,3 \text{ м/с.}$$

Наружный диаметр ветроколеса

По соотношению (1.30) определяем

$$D_{\text{расч}} = \sqrt{\frac{8N}{C_p \rho V^3 \pi \eta_{\text{эл}} \eta_{\text{мех}}}} = \sqrt{\frac{8 \cdot 1500}{0,4 \cdot 1,23 \cdot 10,3^3 \pi \cdot 0,6 \cdot 0,9}} = 3,63 \text{ м.}$$

Принимаем $D = 4 \text{ м.}$

Радиус ветроколеса

$$R = D / 2 = 4 / 2 = 2 \text{ м} = 2000 \text{ мм.}$$

Внутренний диаметр ветроколеса

$$d_0 = \bar{d}_0 D = 0,2 \cdot 4 = 0,8 \text{ м.}$$

Радиус расположения сечения лопасти

Из формулы 1.33 имеем

$$\begin{aligned} r_k &= \bar{r}_k R; \\ r_1 &= 0,2 \cdot 2000 \text{ мм} = 400 \text{ мм}; \quad r_2 = 0,4 \cdot 2000 \text{ мм} = 800 \text{ мм}; \\ r_3 &= 0,6 \cdot 2000 \text{ мм} = 1200 \text{ мм}; \quad r_4 = 0,8 \cdot 2000 \text{ мм} = 1600 \text{ мм}; \\ r_5 &= 1 \cdot 2000 \text{ мм} = 2000 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Относительный шаг между сечениями

По формуле (1.34) рассчитываем

$$\Delta \bar{r} = \frac{1 - \bar{r}_0}{n - 1} = \frac{1 - 0,2}{5 - 1} = 0,2.$$

Расстояние между сечениями лопасти (шаг)

Из уравнения (1.35) находим

$$\Delta r = \Delta \bar{r} R = 0,2 \cdot 2,0 = 0,4 \text{ м} = 400 \text{ мм.}$$

Хорда сечения

По формуле (1.36) определяем $b_k = \bar{b}_k R$.

Найденные и представленные в табл. 2.3 величины \bar{b}_k должны быть скорректированы. В связи с тем, что полученная величина $\bar{b}_{\text{корн}R} = 0,18$ очень велика, а общепринятым значением является $\bar{b}_{\text{корн}R} = 0,12$ или

$\bar{b}_{корн_D} = 0,06$, получим значения \bar{b}_{k_R} для всех промежуточных сечений, считая, как и раньше, что \bar{b}_k меняется по линейному закону от \bar{r}_k . На периферийном сечении $\bar{b}_{периф_R} = 0,06$, заменим его на $\bar{b}_{периф_R} = 0,08$:

$$\bar{b}_{k_R} = \bar{b}_{корн_R} + (\bar{b}_{периф_R} - \bar{b}_{корн_R}) \frac{k-1}{5-1},$$

или, учитывая, что $\bar{b}_{корн_R} = 0,12$, а $\bar{b}_{периф_R} = 0,08$,

$$\bar{b}_{k_R} = 0,12 + (0,08 - 0,12) \frac{k-1}{4},$$

или

$$\bar{b}_{k_R} = 0,12 - 0,01(k-1).$$

Безразмерные величины хорды в зависимости от номера сечения лопасти даны в табл. 2.4, 2.5.

Таблица 2.4

Безразмерные величины хорды

Номер сечения	1 (корень)	2	3 (середина)	4	5 (периферия)
\bar{b}_{k_R}	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08

Таблица 2.5

Размерная хорда при $R = 2,0$ м = 2000 мм

Номер сечения	1 (корень)	2	3 (середина)	4	5 (периферия)
b_k , мм	240	220	200	180	160

Толщина профиля

Толщина профиля k -го сечения (см. формулу (1.37)) $c_k = \bar{c}_k \cdot b_k$. Для \bar{c}_k , определенного по (1.26), при $\bar{c}_{корн} = 0,2$ и $\bar{c}_{периф} = 0,1$ для пяти сечений результат приведен в табл. 2.6.

Таблица 2.6

Относительная толщина, построенная по корневому
и периферийному сечениям

Номер сечения	1 (корень)	2	3 (середина)	4	5 (периферия)
\bar{c}_k	0,200	0,182	0,160	0,133	0,100

Уточнение относительной толщины профиля

Ниже уточним \bar{c}_k , перейдя к построению линейчатой лопасти с заданным средним и периферийным сечениями.

Поскольку \bar{b}_k изменяется по линейному закону, то, приняв величину \bar{b}_k на срединном сечении и на периферии такую же, как и в табл. 2.4, и подчинив \bar{b}_k соотношению (1.39), получим те же значения, что и в табл. 2.4. Относительную толщину профиля строим по следующим значениям для среднего и периферийного сечений:

$$\bar{c}_{cp} = 0,15; \quad \bar{c}_{периф} = 0,10.$$

Тогда для остальных сечений в соответствии с выражениями (1.40) и (1.41)

$$\bar{c}_k = \frac{1}{\bar{b}_{k_R}} \left[\bar{c}_{cp} \bar{b}_{cp_k} + (\bar{c}_{периф} \bar{b}_{периф_R} - \bar{c}_{cp} \bar{b}_{cp_R}) S_k \right],$$

где

$$S_k = 2 \left(\frac{k-1}{n-1} - 0,5 \right).$$

При $\bar{b}_{cp_R} = 0,1$ и $\bar{b}_{периф_R} = 0,08$ и значениях \bar{b}_{k_R} для всех пяти сечений, данных в табл. 2.4, имеем величины \bar{c}_k и приводим их в табл. 2.7.

Таблица 2.7

Относительная толщина, построенная по среднему и периферийному сечениям, и вспомогательный множитель S_k

Номер сечения	1 (корень)	2	3 (середина)	4	5 (периферия)
S_k	-1,0	-0,5	0,0	0,5	1,0
\bar{c}_k	0,183	0,168	0,150	0,128	0,100

Из табл. 2.7 видно, что величина $\bar{c}_k = 0,15$ задана в среднем сечении, что обеспечивает профиль пятнадцатипроцентной толщины в этом сечении.

Размерные величины толщины профиля представлены в табл. 2.8.

Таблица 2.8

Размерные толщины профилей

Номер сечения	1 (корень)	2	3 (середина)	4	5 (периферия)
c_k , мм	44,0	37,0	30,0	23,0	16,0

Из табл. 2.8 видно, что размерные величины толщин профилей, в отличие от безразмерных в долях хорды, ведут себя как линейная функция по высоте лопасти.

Координаты профилей

Для выбранного профиля типа «Эсперо» безразмерные координаты верхней (\bar{x}, \bar{y}_e) и нижней (\bar{x}, \bar{y}_n) дуг приведены в табл. 1.3.

С помощью пересчета для размерных хорд b_k и толщин c_k получаем таблицы размерных координат профилей.

Приводим координаты профилей для третьего (среднего) (табл. 2.9) и пятого (периферийного) (табл. 2.10) сечений, полученных по формулам (1.38):

$$x_i = \bar{x}_i \frac{b_k}{100}; \quad y_{e_i} = \bar{y}_{e_i} \frac{c_k}{100}; \quad y_{n_i} = \bar{y}_{n_i} \frac{c_k}{100}$$

Для $k = 3$ (среднее сечение) — $b_3 = 200$ мм, $c_3 = 30$ мм.

Для $k = 5$ (периферийное сечение) — $b_5 = 160$ мм, $c_5 = 16$ мм.

Таблица 2.9

Координаты профиля третьего (среднего) сечения лопасти

Номер точки	x , мм	y_e , мм	y_n , мм
1	0	12,5	12,5
2	2,5	16,1	8,4
3	5,0	18,2	6,9
4	10,0	20,8	5,0
5	20,0	24,7	3,3
6	40,0	28,8	1,7
7	60,0	30,2	0,7
8	70,4	30,16	0,34
9	80,0	30,0	0,0

Номер точки	x , мм	$y_в$, мм	$y_н$, мм
10	100,0	28,4	0,0
11	120,0	25,0	0,0
12	140,0	20,8	0,0
13	160,0	15,3	0,0
14	180,0	9,2	0,0
15	195,0	3,5	0,0
16	200,0	0,7	0,0

Таблица 2.10

Координаты профиля пятого (периферийного) сечения

Номер точки	x , мм	$y_в$, мм	$y_н$, мм
1	0,0	6,7	6,7
2	2,0	8,6	4,5
3	4,0	9,7	3,7
4	8,0	11,1	2,7
5	16,0	13,2	1,8
6	32,0	15,4	0,9
7	48,0	16,1	0,4
8	56,3	16,09	0,18
9	64,0	16,0	0,0
10	80,0	15,1	0,0
11	96,0	13,3	0,0
12	112,0	11,1	0,0
13	128,0	8,2	0,0
14	144,0	4,9	0,0
15	156,0	1,9	0,0
16	160,0	0,4	0,0

Координаты центра совмещения профилей (ЦСП)

В соответствии с подразд. 1.1 имеем

$$x_{\text{цсп}} = 0,352b_k, \quad y_{\text{цсп}} = 0,5c_k.$$

Для третьего (среднего) сечения

$$x_{\text{цсп}_3} = 0,352b_3 = 0,352 \cdot 200 \text{ мм} = 70,4 \text{ мм},$$

$$y_{\text{цсп}_3} = 0,5c_3 = 0,5 \cdot 30 \text{ мм} = 15,0 \text{ мм}.$$

Аналогично для остальных сечений

$$\begin{cases} x_{цсп_1} = 84,5 \text{ мм}, & x_{цсп_2} = 77,4 \text{ мм}, \\ y_{цсп_1} = 22,0 \text{ мм}; & y_{цсп_2} = 18,5 \text{ мм}; \\ x_{цсп_4} = 63,4 \text{ мм}, & x_{цсп_5} = 56,3 \text{ мм}, \\ y_{цсп_4} = 11,5 \text{ мм}; & y_{цсп_5} = 8,0 \text{ мм}. \end{cases}$$

Углы установки среднего и периферийного сечений

Принимаем для среднего и периферийного сечений углы установки такие же, как были получены по классической методике (см. табл. 2.3), а именно:

$$\varphi_{cp} = 9,4^\circ; \quad \varphi_{периф} = 3,9^\circ \approx 4^\circ.$$

Определяем координаты одиннадцатой и тринадцатой точек корытца профиля для среднего и периферийного сечений по формулам (1.44) и (1.45).

Для одиннадцатой точки корытца среднего сечения

$$\begin{cases} x_{1_{кор.ср}}(11) = -(x_{cp}(11) - x_{цсп_{cp}}) \cos \varphi_{cp} + \\ + (y_{н_{cp}}(11) - y_{цсп_{cp}}) \sin \varphi_{cp} = \\ = -(140,0 - 70,4) \cos 9,4^\circ + (0,0 - 15,0) \sin 9,4^\circ = -71,1 \text{ мм}, \\ y_{1_{кор.ср}}(11) = -(x_{cp}(11) - x_{цсп_{cp}}) \sin \varphi_{cp} - \\ - (y_{н_{cp}}(11) - y_{цсп_{cp}}) \cos \varphi_{cp} = \\ = -(140,0 - 70,4) \sin 9,4^\circ + (0,0 - 15,0) \cos 9,4^\circ = 3,4 \text{ мм}. \end{cases}$$

Для тринадцатой точки корытца среднего сечения

$$\begin{cases} x_{1_{кор.ср}}(13) = -(x_{cp}(13) - x_{цсп_{cp}}) \cos \varphi_{cp} + \\ + (y_{н_{cp}}(13) - y_{цсп_{cp}}) \sin \varphi_{cp} = \\ = -(180,0 - 70,4) \cos 9,4^\circ + (0,0 - 15,0) \sin 9,4^\circ = -110,6 \text{ мм}, \\ y_{1_{кор.ср}}(13) = -(x_{cp}(13) - x_{цсп_{cp}}) \sin \varphi_{cp} - \\ - (y_{н_{cp}}(13) - y_{цсп_{cp}}) \cos \varphi_{cp} = \\ = -(180,0 - 70,4) \sin 9,4^\circ + (0,0 - 15,0) \cos 9,4^\circ = -3,1 \text{ мм}. \end{cases}$$

Итак, для среднего сечения имеем две точки:

$$\begin{cases} x_{1_{кор.ср}}(11) = -71,1 \text{ мм}, & \begin{cases} x_{1_{кор.ср}}(13) = -110,6 \text{ мм}, \\ y_{1_{кор.ср}}(13) = -3,1 \text{ мм}. \end{cases} \\ y_{1_{кор.ср}}(11) = 3,4 \text{ мм}; \end{cases}$$

Для одиннадцатой точки периферийного сечения (см. формулу (1.45))

$$\begin{cases} x_{1_{кор.периф}}(11) = -(x_{периф}(11) - x_{ЦСП_{периф}}) \cos \varphi_{периф} + \\ + (y_{периф}(11) - y_{ЦСП_{периф}}) \sin \varphi_{периф} = \\ = -(112,0 - 56,3) \cos 4^\circ + (0,0 - 8,0) \sin 4^\circ = -56,1 \text{ мм}, \\ y_{1_{кор.периф}}(11) = -(x_{периф}(11) - x_{ЦСП_{периф}}) \sin \varphi_{периф} - \\ - (y_{периф}(11) - y_{ЦСП_{периф}}) \cos \varphi_{периф} = \\ = -(112,0 - 56,3) \sin 4^\circ - (0,0 - 8,0) \cos 4^\circ = 4,1 \text{ мм}. \end{cases}$$

Для тринадцатой точки корытца периферийного сечения

$$\begin{cases} x_{1_{кор.периф}}(13) = -(x_{периф}(13) - x_{ЦСП_{периф}}) \cos \varphi_{периф} + \\ + (y_{периф}(13) - y_{ЦСП_{периф}}) \sin \varphi_{периф} = \\ = -(144,0 - 56,3) \cos 4^\circ + (0,0 - 8,0) \sin 4^\circ = -88,0 \text{ мм}, \\ y_{1_{кор.периф}}(13) = -(x_{периф}(13) - x_{ЦСП_{периф}}) \sin \varphi_{периф} - \\ - (y_{периф}(13) - y_{ЦСП_{периф}}) \cos \varphi_{периф} = \\ = -(144,0 - 56,3) \sin 4^\circ + (0,0 - 8,0) \cos 4^\circ = 1,9 \text{ мм}. \end{cases}$$

Итак, для периферийного сечения имеем две точки с номерами одиннадцать и тринадцать:

$$\begin{cases} x_{1_{кор.периф}}(11) = -56,1 \text{ мм}, & \begin{cases} x_{1_{кор.периф}}(13) = -88,0 \text{ мм}, \\ y_{1_{кор.периф}}(13) = 1,9 \text{ мм}. \end{cases} \\ y_{1_{кор.периф}}(11) = 4,1 \text{ мм}; \end{cases}$$

Рассмотрим пример вычисления координат одиннадцатой и тринадцатой точек для корневого сечения, т. е. для $k = 1$, а остальные значения координат приведем в виде таблицы.

Выпишем по (1.46) и (1.40) координаты одиннадцатой точки корневого сечения, т. е. $k = 1$, $S_k = -1,0$ (см. табл. 2.7):

$$\left\{ \begin{aligned} x_{1_{кор.1}}(11) &= x_{1_{кор.ср}}(11) + [x_{1_{кор.периф}}(11) - x_{1_{кор.ср}}(11)]S_1 = \\ &= x_{1_{кор.ср}}(11) + [x_{1_{кор.периф}}(11) - x_{1_{кор.ср}}(11)](-1) = \\ &= 2x_{1_{кор.ср}}(11) - x_{1_{кор.периф}}(11) = 2(-71,1) - (-56,1) = -86,1 \text{ мм}, \\ y_{1_{кор.1}}(11) &= y_{1_{кор.ср}}(11) + [y_{1_{кор.периф}}(11) - y_{1_{кор.ср}}(11)]S_1 = \\ &= y_{1_{кор.ср}}(11) + [y_{1_{кор.периф}}(11) - y_{1_{кор.ср}}(11)](-1) = \\ &= 2y_{1_{кор.ср}}(11) - y_{1_{кор.периф}}(11) = 2 \cdot 3,4 - 4,1 = 2,8 \text{ мм}. \end{aligned} \right.$$

Аналогичный расчет произведем для тринадцатой точки корневого сечения:

$$\left\{ \begin{aligned} x_{1_{кор.1}}(13) &= x_{1_{кор.ср}}(13) + [x_{1_{кор.периф}}(13) - x_{1_{кор.ср}}(13)]S_1 = \\ &= x_{1_{кор.ср}}(13) + [x_{1_{кор.периф}}(13) - x_{1_{кор.ср}}(13)](-1) = \\ &= 2x_{1_{кор.ср}}(13) - x_{1_{кор.периф}}(13) = \\ &= 2(-110,6) - (-88,0) = -133,1 \text{ мм}, \\ y_{1_{кор.1}}(13) &= y_{1_{кор.ср}}(13) + [y_{1_{кор.периф}}(13) - y_{1_{кор.ср}}(13)]S_1 = \\ &= y_{1_{кор.ср}}(13) + [y_{1_{кор.периф}}(13) - y_{1_{кор.ср}}(13)](-1) = \\ &= 2y_{1_{кор.ср}}(13) - y_{1_{кор.периф}}(13) = 2(-3,1) - 1,9 = -8,1 \text{ мм}. \end{aligned} \right.$$

Итак, для одиннадцатой и тринадцатой точек корневого сечения имеем

$$\left\{ \begin{aligned} x_{1_{кор.1}}(11) &= -86,1 \text{ мм}, & \left\{ \begin{aligned} x_{1_{кор.1}}(13) &= -133,1 \text{ мм}, \\ y_{1_{кор.1}}(11) &= 2,8 \text{ мм}; & y_{1_{кор.1}}(13) &= -8,1 \text{ мм}. \end{aligned} \right. \end{aligned} \right.$$

Находим угол установки корневого сечения по формуле (1.43):

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{y_{1_{кор.1}}(11) - y_{1_{кор.1}}(13)}{x_{1_{кор.1}}(11) - x_{1_{кор.1}}(13)} = \frac{2,8 - (-8,1)}{-86,1 - (-133,2)} = 0,23,$$

откуда определяем, что $\varphi_1 = 13^\circ$.

Значения координат точек № 11 и 13 корытца промежуточных повернутых профилей и углы установки профилей φ_k приведены соответственно в табл. 2.11 и 2.12.

Таблица 2.11

Координаты точек № 11 и 13 корытца повернутых профилей

Номер сечения	1 (корень)	2	3 (середина)	4	5 (периферия)
$\begin{cases} x_{1_{кор}}(11), \text{ мм} \\ y_{1_{кор}}(11), \text{ мм} \end{cases}$	$\begin{cases} -86,1 \\ 2,8 \end{cases}$	$\begin{cases} -78,6 \\ 3,1 \end{cases}$	$\begin{cases} -71,1 \\ 3,4 \end{cases}$	$\begin{cases} -63,6 \\ 3,8 \end{cases}$	$\begin{cases} -56,1 \\ 4,1 \end{cases}$
$\begin{cases} x_{1_{кор}}(13), \text{ мм} \\ y_{1_{кор}}(13), \text{ мм} \end{cases}$	$\begin{cases} -133,1 \\ -8,1 \end{cases}$	$\begin{cases} -121,9 \\ -5,6 \end{cases}$	$\begin{cases} -110,6 \\ -3,1 \end{cases}$	$\begin{cases} -99,3 \\ -0,6 \end{cases}$	$\begin{cases} -88,0 \\ 1,86 \end{cases}$

Таблица 2.12

Углы установки профилей

Номер сечения	1 (корень)	2	3 (середина)	4	5 (периферия)
φ_k	13°	$11,4^\circ$	$9,4^\circ$	$7,0^\circ$	$4,0^\circ$

На рис. 2.1 приведены рассчитанные углы установки профилей линейчатой лопасти.

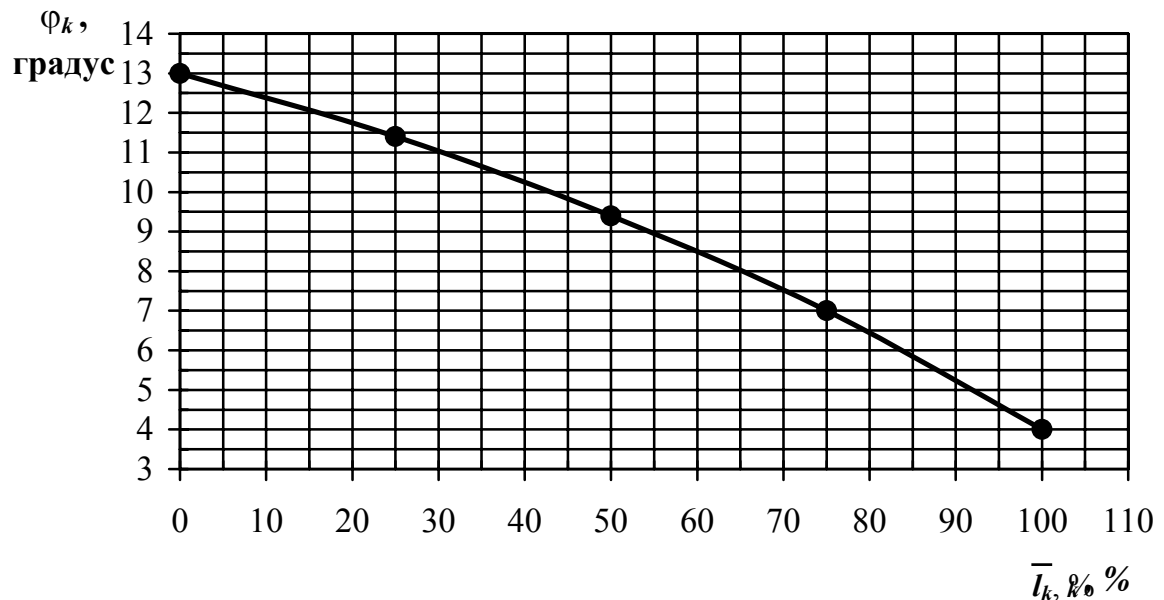


Рис. 2.1. Зависимость угла установки профилей линейчатой лопасти от относительного расстояния сечения лопасти от корневого сечения для исходных данных примера расчета

3. РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ ЛОПАСТИ ВЕТРОКОЛЕСА

3.1. Основные геометрические характеристики лопасти

Геометрические характеристики лопасти известны из аэродинамических расчетов. Обычно лопасть имеет следующие геометрические характеристики: радиус лопасти R (диаметр ветроколеса D); удлинение лопасти $\lambda = l^2/S$;

сужение лопасти $\eta = \frac{b_{\text{корн}}}{b_{\text{пер}}}$; угол стреловидности по передней кромке χ_0 ;

относительная толщина профиля у корня $\bar{C}_{\text{корн}}$ и у периферии $\bar{C}_{\text{периф}}$. Форма профиля лопасти — профиль типа «Эсперо». Форма лопасти в плане — прямое крыло трапецевидной формы.

3.2. Нагрузки, действующие на лопасть

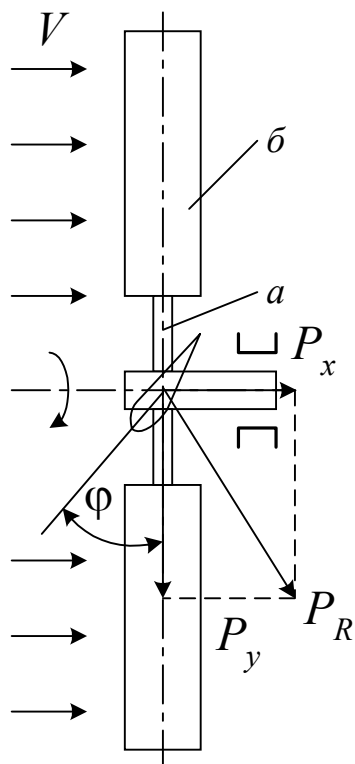


Рис. 3.1. Вид ветроколеса в плане

На рис. 3.1 представлен условный вид ветроколеса в плане. Крыло ветроколеса состоит из маха a и лопасти b , закрепленной на махе так, что оно образует с плоскостью вращения некоторый угол φ — угол заклинения лопасти. При этом на ее элементы набегающий воздушный поток с относительной скоростью W под углом атаки α и действует с силой P_R . Силу P_R разлагают на силы P_x и P_y . Сила P_x производит давление в направлении ветра, называемое лобовым давлением. Сила P_y создает крутящий момент [1].

Из аэродинамических расчетов известны сила лобового давления при заданной скорости ветра и максимальная сила лобового давления при порыве ветра. Результирующая сил лобового давления приложена в центре парусности.

Мах лопасти подвергается действию момента центробежных сил $M_{ц.с}$, момента аэроди-

намических сил M_a и растяжению от центробежных сил.

Для определения напряжений в сечении маха, создаваемых моментами, приложенными к лопасти, и напряжений от центробежной силы следует рассмотреть геометрию профиля типа «Эсперо», заданного коэффициентами собственного контура в табл. 1.3.

3.3. Определение площади профиля типа «Эсперо»

На рис. 3.2 показан профиль типа «Эсперо» в системе координат XOY .

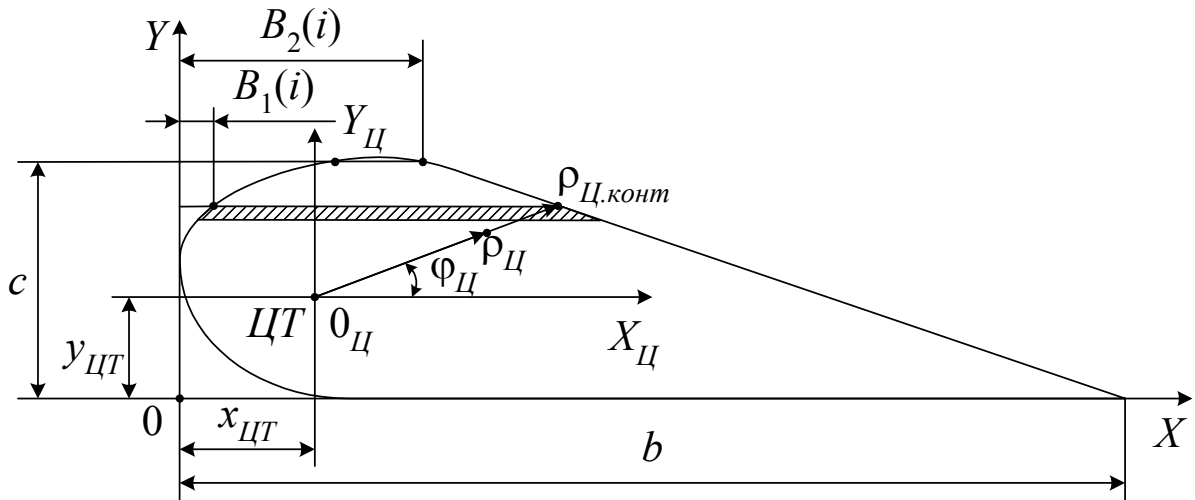


Рис. 3.2. К вычислению площади профиля и момента инерции лопасти относительно ее оси

При разбиении профиля на горизонтальные полосы постоянной толщины, параллельные его хорде, получаем величины абсцисс точек контура в системе координат XOY : $B_1(i)$ и $B_2(i)$ (см. рис. 3.2).

Относительные величины $\bar{B}_1(i)$ и $\bar{B}_2(i)$ рассчитываем по следующим формулам:

$$\bar{B}_1(i) = \frac{B_1(i)}{b}, \quad \bar{B}_2(i) = \frac{B_2(i)}{b}. \quad (3.1)$$

Для профиля типа «Эсперо» эти значения приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Значения параметров $\bar{B}_1(i)$ и $\bar{B}_2(i)$ при разбиении профиля типа «Эсперо» на 10 полос равной толщины

Номер точки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$\bar{B}_1(i)$	0,400	0,114	0,033	0,010	0,001	0,006	0,023	0,052	0,090	0,150	0,267
$\bar{B}_2(i)$	1,000	0,980	0,942	0,903	0,855	0,805	0,756	0,696	0,628	0,546	0,400

Нумерация i от 1 до 11 начинается со стороны уплощенной части профиля (см. рис. 3.2).

Площадь профиля получаем как сумму площадей элементарных площадок — трапеций:

$$S_{проф} = \frac{bc}{n-1} \left(\frac{(\bar{B}_2(1) - \bar{B}_1(1)) + (\bar{B}_2(n) - \bar{B}_1(n))}{2} + \sum_{i=2}^{n-1} (\bar{B}_2(i) - \bar{B}_1(i)) \right), \quad (3.2)$$

где $n - 1$ — число элементарных полос.

Для $n = 11$

$$S_{проф} = 0,7 \cdot b \cdot C. \quad (3.3)$$

3.4. Масса лопасти

Рассмотрим вариант сплошной лопасти с плотностью $\rho_{лон}$.

В этом случае масса лопасти

$$m_{лон} = \rho_{лон} V_{лон}, \quad (3.4)$$

где

$$V_{лон} = S_{проф} l \quad (3.5)$$

объем лопасти, взятый с запасом, если $S_{проф}$ означает площадь профиля корневого сечения; l — длина лопасти, м.

3.5. Центробежная сила, действующая на лопасть

Центробежную силу, действующую на лопасть, рассчитываем по выражению

$$F_{ц.б} = m_{лон} \omega^2 R_{ц.м}. \quad (3.6)$$

Здесь $\omega = \frac{\pi n_{вк}}{30}$ — угловая частота вращения ветроколеса, c^{-1} ;

$n_{вк} = \frac{60VZ}{\pi D}$ — частота вращения ветроколеса, об/мин; V — скорость ветра, м/с; Z — коэффициент быстроходности в рабочей точке; D — наружный диаметр ветроколеса, м; $R_{ц.м}$ — радиус расположения центра тяжести лопасти,

$$R_{ц.м} = 0,6 R, \quad (3.7)$$

где R — наружный радиус ветроколеса, м.

3.6. Напряжение на отрыв, создаваемое центробежной силой

Напряжение на отрыв, Н/м², рассчитываем по формуле

$$\sigma_{отр} = F_{ц.б} / S_{маха}, \quad (3.8)$$

где $S_{маха}$ — площадь сечения маха в области крепления лопасти (в опасном сечении), м².

3.7. Момент, создаваемый аэродинамическими силами, приложенными к лопасти при расчетной скорости ветра

Суммарный момент, создаваемый аэродинамическими силами, действующими на элементарные,

$$M_a = \int_{r_0}^R C_{y_a}(r) b(r) r \frac{\rho W^2(r)}{2} dr. \quad (3.9)$$

Используя формулу $W = \frac{V(1-e)}{\sin \beta}$ и выражения $b(r)$ и r через безразмерные величины, получим

$$M_a = \frac{\rho V^2}{2} R^3 \int_{\bar{r}_0}^1 C_{y_a}(\bar{r}) \bar{b}(\bar{r}) \bar{r} \frac{(1-e)^2}{\sin^2 \beta} d\bar{r}. \quad (3.10)$$

Интеграл, входящий в правую часть выражения (3.10), можно вычислить по методу трапеций:

$$M_a = \frac{\rho V^2}{2} R^3 \left(\frac{f_1 + f_n}{2} + \sum_{i=2}^{n-1} f_i \right), \quad (3.11)$$

где f_i — значение подынтегральной функции на i -м отрезке при замене интеграла суммой.

Величины $C_{y_a}(\bar{r})$, e и β , входящие в правую часть выражения (3.10), определяем соответственно по интерполяционным формулам работы [4], а величину относительной хорды $\bar{b}(\bar{r})$ — по выражению (1.19).

Если ввести в расчет радиус центра парусности, то момент аэродинамических сил относительно основания лопасти

$$M_a = P_{a_{лон}} (r_{нар} - r_0), \quad (3.12)$$

где $r_{нар}$ — радиус центра парусности, м; r_0 — внутренний радиус ветроколеса, м;

$$P_{a_{лон}} = B \frac{1}{i_{лон}} \frac{\rho V^2}{2} \frac{\pi D^2}{4} \quad (3.13)$$

равнодействующая аэродинамических сил, действующих на лопасть, Н; B — коэффициент лобового давления на колесо, о. е.; $i_{лон}$ — число лопастей.

Коэффициент B , вычисленный для различных величин коэффициента быстроходности Z [4], представлен на графике, приведенном на рис. 3.3.

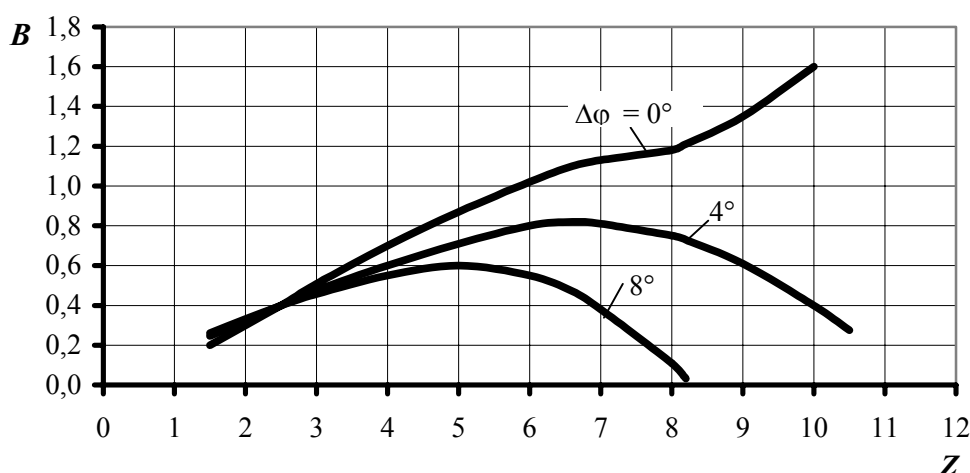


Рис. 3.3. Зависимость коэффициента лобового давления от коэффициента быстроходности

По графику на рис. 3.3 определяем, что для $Z = 6 \dots 9$ коэффициент лобового давления $B = 1,0 \dots 1,35$. Принимаем $B = 1,4$. Безразмерный радиус центра парусности, выраженный в долях наружного радиуса ветроколеса:

$$\bar{r}_{нар} \equiv \frac{r_{нар}}{R} = \frac{M_a}{RP_{a_{лон}}} = \frac{\int_{\bar{r}_0}^1 C_{y_a}(\bar{r}) \bar{b}(\bar{r}) \bar{r} \frac{(1-e)^2}{\sin^2 \beta} d\bar{r}}{B} i_{лон} \quad (3.14)$$

Интеграл, стоящий в числителе выражения (3.14), — это тот же интеграл, который входит в соотношение (3.10).

Производя вычисление интеграла по формуле (3.11), можно получить графическую зависимость $\bar{r}_{нар}(Z)$, приведенную на рис. 3.4.

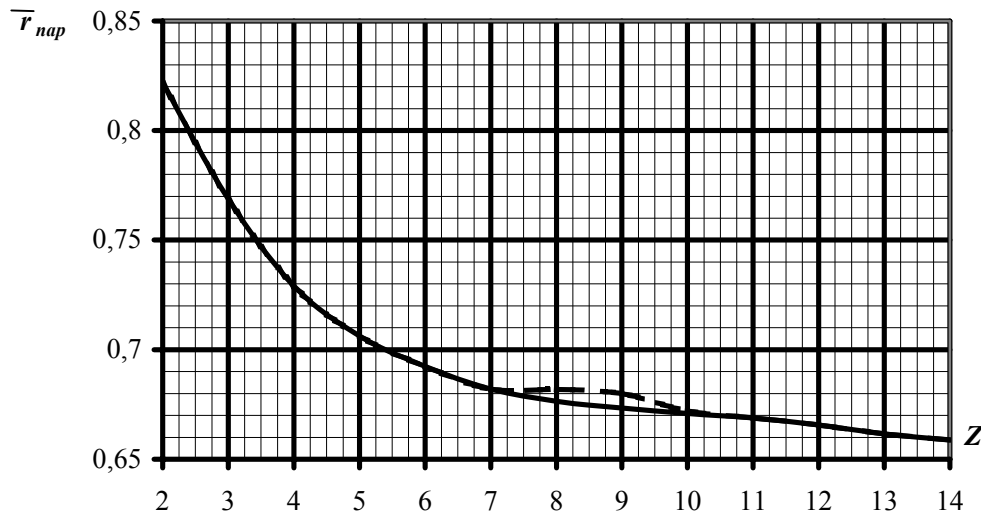


Рис. 3.4. Зависимость безразмерного радиуса центра парусности от коэффициента быстроходности

Итак, при выбранном значении коэффициента $B = 1,4$ (с завышением) и величине $\bar{r}_{нар}$, определенной по графику на рис. 3.4 для заданного коэффициента быстроходности Z , получаем момент аэродинамических сил M_a по формуле (3.12), которая удобна для оценочных расчетов при расчетной скорости ветра.

3.8. Сила лобового давления на лопасти ветроколеса при предельно допустимой скорости ветра

3.8.1. Стабилизируемое ветроколесо

В соответствии с работой [2] для стабилизируемого ветроколеса сила лобового давления на лопасть при порыве ветра и, в частности, при предельно допустимой скорости ветра

$$P_{\max_{\text{стаб}}} = C_{y_{\max}} S_{\text{лон}} \frac{\rho}{2} (\omega^2 r_m^2 + V^2) n_{\text{перез}}, \quad (3.15)$$

или

$$P_{\max_{\text{стаб}}} = C_{y_{\max}} S_{\text{лон}} \frac{\rho}{2} (Z^2 \bar{r}_m^2 + 1) V^2 n_{\text{перез}}, \quad (3.16)$$

где V — расчетная скорость ветра, м/с; $\omega = \frac{ZV}{R}$ — угловая скорость вращения стабилизируемого ветроколеса, с^{-1} ; Z — задаваемый коэффициент быстроходности; R — наружный радиус ветроколеса, м; r_m — условный радиус лопасти, м;

$$\bar{r}_m^2 = \frac{r_m^2}{R^2} = \frac{1 + \bar{r}_0 + \bar{r}_0^2}{3} \quad (3.17)$$

квадрат относительного условного радиуса лопасти;

$$S_{лон} = \frac{R^2 (1 - \bar{r}_0) (\bar{b}_{R_{корн}} + \bar{b}_{R_{периф}})}{2} \quad (3.18)$$

площадь лопасти, м²; \bar{r}_0 — относительный внутренний радиус ветроколеса;

$$n_{перез} = \frac{Z_m^2 + K^2}{Z_m^2 + 1} \quad (3.19)$$

коэффициент перегрузки при порыве ветра (в нашем случае — при предельно допустимой скорости ветра);

$$Z_m = \frac{\omega r_m}{V} = Z \bar{r}_m \quad (3.20)$$

условный коэффициент быстроходности при $r = r_m$;

$$K = \frac{V_{пред.дон}}{V} \quad (3.21)$$

коэффициент порыва; $V_{пред.дон}$ — предельно допустимая скорость ветра, м/с.

3.8.2. Нестабилизируемое ветроколесо

В случае нестабилизируемого ветроколеса сила лобового давления на лопасть при предельно допустимой скорости ветра по [1] имеет вид

$$P_{\max} = C_{y_{\max}} S_{лон} \frac{\rho}{2} (\tilde{\omega}^2 r_m^2 + V_{пред.дон}^2), \quad (3.22)$$

где $C_{y_{\max}}$, r и $S_{лон}$ — те же величины, что и для стабилизируемого ветроколеса;

$$r_m^2 = \bar{r}_m^2 R^2 \quad (3.23)$$

квадрат условного радиуса лопасти; \bar{r}_m — относительный условный радиус лопасти, о. е.;

$$\tilde{\omega} = Z V_{пред.дон} / R \quad (3.24)$$

угловая скорость при предельно допустимой скорости ветра для нестабилизируемого ветроколеса, с⁻¹.

Учитывая формулы (3.23) для r_m и (3.24) для $\tilde{\omega}$, имеем для P_{\max} в случае нестабилизируемого ветроколеса

$$P_{\max} = C_{y_{\max}} S_{\text{лон}} \frac{\rho}{2} (Z^2 \bar{r}_m^2 + 1) V_{\text{пред.дон}}^2, \quad (3.25)$$

где Z — задаваемый коэффициент быстроходности.

3.9. Изгибающий момент, создаваемый силой лобового давления на лопасть при предельно допустимой скорости ветра

Стабилизируемое ветроколесо

Изгибающий момент от силы лобового давления на лопасть при предельно допустимой скорости ветра

$$M_{a_{\text{пред.дон}} \text{стаб}} = P_{\max \text{стаб}} (r_{\text{нар}} - r_0), \quad (3.26a)$$

где $P_{\max \text{стаб}}$ — вычисляется по формуле (3.15); $r_{\text{нар}} = \bar{r}_{\text{нар}} R$, $\bar{r}_{\text{нар}}$ — относительный (в долях радиуса ветроколеса) радиус парусности лопасти, величина $\bar{r}_{\text{нар}}$ определяется по графику на рис. 3.4 для заданного коэффициента быстроходности; $r_0 = \bar{r}_0 R$ — внутренний радиус ветроколеса; \bar{r}_0 — задаваемая величина относительного внутреннего радиуса ветроколеса — обычно принимается $\bar{r}_0 = 0,2$.

Нестабилизируемое ветроколесо

Изгибающий момент от силы лобового давления на лопасть при предельно допустимой скорости ветра для нестабилизируемого ветроколеса

$$M_{a_{\text{пред.дон}}} = P_{\max} (r_{\text{нар}} - r_0), \quad (3.26б)$$

где P_{\max} — вычисляется по формуле (3.25); $r_{\text{нар}}$ и r_0 — вычисляются так же, как и в случае стабилизируемого ветроколеса.

3.10. Момент, создаваемый распределенными центробежными силами, действующими на лопасть

В соответствии с работой [1] момент, создаваемый распределенными центробежными силами, действующими на лопасть, и стремящийся повернуть лопасть перпендикулярно валу ветроколеса,

$$M_{\text{ц.с}} = 0,5 I_{\text{лон}} \omega^2 \sin 2\varphi, \quad (3.27)$$

где ω — угловая частота вращения ветроколеса, с^{-1} ; φ — угол заклинения (установки) профиля в корневом сечении, градус;

$$I_{\text{лон}} = \int \rho_{\text{ц}}^2 dm \quad (3.28)$$

момент инерции лопасти относительно ее оси; $\rho_{\text{ц}}$ — полярный радиус произвольной точки профиля.

В случае лопасти постоянной плотности $\rho_{\text{лон}}$

$$dm = \rho_{\text{лон}} dV_{\text{лон}}. \quad (3.29)$$

В цилиндрических координатах

$$dV_{\text{лон}} = dz \rho_{\text{ц}} d\rho_{\text{ц}} d\varphi_{\text{ц}}.$$

Считая профили одинаковыми по высоте лопасти и совпадающими с корневым профилем (для того, чтобы создать запас прочности), получаем

$$I_{\text{лон}} = l \rho_{\text{лон}} \int_0^{2\pi} d\varphi_{\text{ц}} \int_0^{\rho_{\text{ц.конт}}(\varphi_{\text{ц}})} \rho_{\text{ц}}^3 d\rho_{\text{ц}}, \quad (3.30)$$

где l — длина лопасти.

Произведя интегрирование по $\rho_{\text{ц}}$, имеем

$$I_{\text{лон}} = \frac{l}{4} \rho_{\text{лон}} \int_0^{2\pi} \rho_{\text{ц.конт}}^4(\varphi_{\text{ц}}) d\varphi_{\text{ц}}. \quad (3.31)$$

Точечную зависимость $\rho_{\text{ц.конт}}(\varphi_{\text{ц}})$ можно получить, пользуясь рис. 3.2 и табл. 3.1.

Вначале найдем абсциссы точек контура в системе координат $X_{\text{ц}}O_{\text{ц}}Y_{\text{ц}}$:

$$x_{\text{ц}_1} = B_1(i) - x_{\text{ц.м}}, \quad (3.32)$$

$$x_{\text{ц}_2} = B_2(i) - x_{\text{ц.м}}. \quad (3.33)$$

В случае профиля типа «Эсперо»

$$x_{\text{ц.м}} = 0,352b, \quad y_{\text{ц.м}} = 0,4c.$$

Построим цепочку координат точек всего контура профиля при его обходе против часовой стрелки: $0 \leq \varphi_{\text{ц}} \leq 2\pi$ (рис. 3.5). Количество точек — $2n + 1$. В случае нашего примера при $n = 11$ — всего 23 точки. Примем номер промежуточной точки k , где k меняется от 1 до 23. Пусть на-

чало отсчета ($k = 1$) соответствует $\varphi_y = 0$, тогда последняя точка ($k = 23$) будет соответствовать $\varphi_y = 2\pi$.

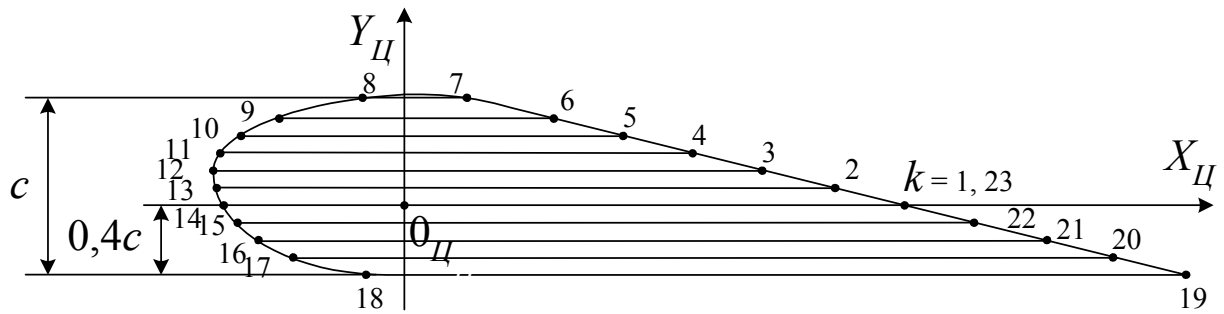


Рис. 3.5. Построение цепочки точек при обходе контура профиля
Для $k = 1, 2, \dots, 7$

$$y_u = \frac{c}{10}(k-1). \quad (3.34)$$

Для $k = 8, 9, \dots, 18$

$$y_u = -\frac{c}{10}(k-8) + 0,6c. \quad (3.35)$$

Для $k = 19, 20, \dots, 23$

$$y_u = \frac{c}{10}(k-19) - 0,4c. \quad (3.36)$$

Выражая y_u через \bar{y}_u , находим соотношение

$$y_u = c\bar{y}_u = \bar{c}_v b\bar{y}_u,$$

которое получается из формул (3.34) — (3.36).

Для \bar{y}_u получаем следующие соотношения:

- для $k = 1, 2, \dots, 7$

$$\bar{y}_u = \frac{k-1}{10}; \quad (3.37)$$

- для $k = 8, 9, \dots, 18$

$$\bar{y}_u = -\frac{k-8}{10} + 0,6; \quad (3.38)$$

- для $k = 19, 20, \dots, 23$

$$\bar{y}_u = \frac{k-19}{10} - 0,4. \quad (3.39)$$

Безразмерные в долях хорды b абсциссы точек, соответствующих номерам $k = 1, 2, \dots, 23$ при круговом обходе профиля (см. рис. 3.5) в системе координат $X_u O_u Y_u$, представим в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Безразмерные абсциссы точек при круговом обходе профиля
в долях хорды b

Номер точки	\bar{x}_u	Номер точки	\bar{x}_u	Номер точки	\bar{x}_u	Номер точки	\bar{x}_u
1	0,503	7	0,048	13	-0,346	19	0,648
2	0,453	8	-0,085	14	-0,351	20	0,628
3	0,404	9	-0,202	15	-0,342	21	0,590
4	0,344	10	-0,262	16	-0,319	22	0,551
5	0,276	11	-0,300	17	-0,238	23	0,503
6	0,194	12	-0,329	18	0,048		

Отметим, что $\bar{x}_u(23) = \bar{x}_u(1) = 0,503$.

Определим полярные углы Φ_u каждой из 23 точек:

$$\Phi_u(k) = \begin{cases} \arctg(y_u/x_u), & \text{если } x_u > 0 \text{ и } y_u > 0, \\ \pi + \arctg(y_u/x_u), & \text{если } x_u < 0 \text{ и } y_u > 0, \\ \pi + \arctg(y_u/x_u), & \text{если } x_u < 0 \text{ и } y_u < 0, \\ 2\pi + \arctg(y_u/x_u), & \text{если } x_u > 0 \text{ и } y_u < 0, \end{cases} \quad (3.40)$$

где $x_u = \bar{x}_u b$ для $k = 1, 2, 3, \dots, 23$ изменяется в соответствии с табл. 3.2, а y_u для $k = 1, 2, 3, \dots, 23$ — в соответствии с формулами (3.34) — (3.36).

Величины y_u и x_u , входящие в отношение y_u/x_u , можно выразить через \bar{y}_u и \bar{x}_u :

$$x_u = \bar{x}_u b; \quad y_u = \bar{y}_u c = \bar{y}_u \bar{c}_e b; \quad \frac{y_u}{x_u} = \frac{\bar{y}_u}{\bar{x}_u} \bar{c}_e. \quad (3.41)$$

Полярный радиус точки контура профиля

$$\rho_{\varphi.\text{конт}} = \left| \frac{y_{\varphi}}{\sin \varphi_{\varphi}} \right| = \left| \frac{\bar{y}_{\varphi} c}{\sin \varphi_{\varphi}} \right| = \bar{c}_b b \left| \frac{\bar{y}_{\varphi}}{\sin \varphi_{\varphi}} \right|. \quad (3.42)$$

Подставив $\rho_{\varphi.\text{конт}}$ из выражения (3.38) в формулу (3.27), получим

$$I_{\text{лон}} = \frac{l}{4} \rho_{\text{лон}} b^4 \bar{c}_b^4 \int_0^{2\pi} \left| \frac{\bar{y}_{\varphi}}{\sin \varphi_{\varphi}} \right|^4 d\varphi_{\varphi}. \quad (3.43)$$

Определим приближенное значение интеграла, входящего в соотношение (3.43) для момента инерции, по методу трапеций с переменным шагом:

$$\int_0^{2\pi} f(\varphi_{\varphi}) d\varphi_{\varphi} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{22} h_k (f_k + f_{k+1}), \quad (3.44)$$

где $f(\varphi_{\varphi})$, f_k и h_k рассчитываем по следующим формулам:

$$f(\varphi_{\varphi}) = \left| \frac{\bar{y}_{\varphi}}{\sin \varphi_{\varphi}} \right|^4; \quad f_k = \left| \frac{\bar{y}_{\varphi}(k)}{\sin \varphi_{\varphi}(k)} \right|^4; \quad (3.45)$$

$$h_k = \varphi_{\varphi}(k+1) - \varphi_{\varphi}(k) — \quad (3.46)$$

переменный шаг при численном интегрировании.

Обозначим через S_s комплекс, зависящий от \bar{c}_b и входящий в (3.43):

$$S_s = \bar{c}_b^4 \int_0^{2\pi} \left| \frac{y_{\varphi}}{\sin \varphi_{\varphi}} \right|^4 d\varphi_{\varphi}. \quad (3.47)$$

Для профиля пятнадцатипроцентной толщины ($\bar{c}_b = 0,15$)

$$S_s(0,15) \approx 0,0998.$$

Значения комплекса S_s для других значений \bar{c}_b даны в табл. 3.3. В этой же таблице приведены значения коэффициента K_c учета относительной толщины профиля при вычислении момента инерции профиля,

$$K_c = \frac{S_s(\bar{c}_b)}{S_s(0,15)}.$$

Учет влияния толщины профиля на комплекс S_s

\bar{c}_θ	0,10	0,12	0,15	0,18	0,20	0,22	0,24	0,26
S_s	0,0756	0,0857	0,0998	0,1100	0,1170	0,1235	0,1300	0,1360
K_c	0,756	0,867	1,0	1,116	1,193	0,270	0,347	1,424

Аппроксимация в виде ломаной величин K_c при различных величинах \bar{c}_θ , представленных в табл. 3.3, дает следующие формулы:

- для $\bar{c}_\theta < 0,15$

$$K_c = 0,7652 + 4,6964(\bar{c}_\theta - 0,1); \quad (3.48)$$

- для $\bar{c}_\theta \geq 0,15$

$$K_c = 1 + 3,586(\bar{c}_\theta - 0,15). \quad (3.49)$$

Итак,

$$I_{\text{лон}} = \frac{l}{4} \rho_{\text{лон}} b^4 S_s, \quad (3.50)$$

где

$$S_s = 0,0988 K_c, \quad (3.51)$$

а коэффициент K_c определяем по формулам (3.48) и (3.49).

Для профиля пятнадцатипроцентной толщины

$$K_c = 1, \quad S_s = 0,0988.$$

Итак, момент инерции сплошной лопасти рассчитан.

3.11. Напряжение от моментов, воздействующих на лопасть

На лопасть ветроколеса при неподвижной ветроголовке ветротурбины действуют момент аэродинамических сил M_a и момент от распределенных центробежных сил $M_{ц.с.}$. Поскольку векторы этих моментов взаимно перпендикулярны, то модуль суммарного вектора

$$M = \sqrt{M_a^2 + M_{ц.с.}^2}. \quad (3.52)$$

Напряжение при изгибе, Н/м²,

$$\sigma_{\text{изг}} = M / W_{\text{сопр}}, \quad (3.53)$$

где $W_{сопр}$ — момент сопротивления сечения маха, который зависит от конкретной конструкции (труба, тавр, двутавр и т. д.), m^3 , [7].

3.12. Суммарные напряжения, действующие на лопасть

Суммарные напряжения, действующие на лопасть, рассчитываем в соответствии с выражением

$$\sigma_{сум} = \sigma_{изг} + \sigma_{отр}, \quad (3.54)$$

где $\sigma_{отр}$ — напряжения, создаваемые центробежной силой (находим по выражению (3.8)); $\sigma_{изг}$ — напряжения, создаваемые суммарным изгибающим моментом.

В зависимости от материала, из которого изготовлен мах лопасти, имеем максимально допустимые напряжения $[\sigma_{max}]$.

Следует соблюдать неравенство

$$\sigma_{сум} < [\sigma_{max}]. \quad (3.55)$$

Если неравенство (3.55) не соблюдается, следует изменить конструкцию маха лопасти или подобрать другой материал для его изготовления.

3.13. Выбор наружного диаметра трубы маха

Исходя из того, что момент сопротивления изгибу трубы [7]

$$W = \pi D_{тр}^3 \frac{1 - \alpha^4}{32}, \quad (3.56)$$

где $D_{тр}$ — наружный диаметр трубы; $\alpha = \frac{d_{тр}}{D_{тр}}$ — относительный внутренний диаметр трубы, и используя соотношение

$$\sigma_{изг} = \frac{M_{изг_{пред.дон}}}{W}, \quad (3.57)$$

где $\sigma_{изг}$ — расчетное максимальное напряжение в сечении от изгибающего момента, имеем наружный диаметр трубы

$$D_{тр} = \sqrt[3]{\frac{32 M_{изг_{пред.дон}}}{\sigma_{изг} \pi (1 - \alpha^4)}}. \quad (3.58)$$

Числом $\alpha = d_{тр} / D_{тр}$ задаемся в пределах $\alpha = 0,8 \dots 0,9$.

Задаваясь запасом прочности

$$n_{np} = [\sigma_{\max}] / \sigma_{изг}, \quad (3.59)$$

где $[\sigma_{\max}]$ — предельно допустимое напряжение в сечении для выбранного материала маха, имеем для $\sigma_{изг}$, входящего в (3.57),

$$\sigma_{изг} = [\sigma_{\max}] / n_{np}. \quad (3.60)$$

По выбранному наружному диаметру D_{mp} , уточненному по стандартам для труб [8], а также по предлагаемому в работе [8] ряду толщин трубы Δ , соответствующему выбранному D_{mp} , пересчитываем напряжение в заданном сечении по формулам (3.56) и (3.57), где

$$\alpha = \frac{d_{mp}}{D_{mp}} = \frac{D_{mp} - 2\Delta}{D_{mp}}, \quad (3.61)$$

или

$$\Delta = D_{mp} \frac{1 - \alpha}{2}. \quad (3.62)$$

4. ПРИМЕР РАСЧЕТА НА ПРОЧНОСТЬ ЛОПАСТИ ВЕТРОКОЛЕСА

4.1. Исходные данные расчета на прочность лопасти

Большинство исходных данных для расчета лопасти на прочность является результатом аэродинамического расчета лопасти. К исходным данным расчета на прочность относятся:

- диаметр ветроколеса — $D = 4$ м (результат аэродинамического расчета);
- относительный внутренний радиус ветроколеса $\bar{r}_0 = 0,2$;
- длина лопасти — $l = 0,4D = 1,6$ м (результат аэродинамического расчета);
- относительная хорда корневого сечения лопасти в долях радиуса — $\bar{b}_{R_{\text{корн}}} = 0,12$ (результат аэродинамического расчета);
- относительная хорда периферийного сечения лопасти в долях радиуса — $\bar{b}_{R_{\text{периф}}} = 0,08$ (результат аэродинамического расчета);

- относительная толщина профиля корневого сечения лопасти — $\bar{c}_{b_{\text{корн}}} = 0,183$ (является результатом аэродинамического расчета (см. табл. 2.7));
- относительная толщина профиля среднего сечения лопасти — $\bar{c}_b = 0,15$;
- угол установки профиля корневого сечения $\varphi = 13^\circ$ (является результатом аэродинамического расчета (см. табл. 2.11));
- плотность материала лопасти (предполагаем, что лопасть будет выполнена из дерева, в качестве которого выбираем сосну) $\rho_{\text{лон}} = 0,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$;
- число лопастей — $i_l = 3$;
- тип профиля лопасти — «Эсперо»;
- колесо нестабилизируемое;
- предельно допустимая скорость ветра $V_{\text{пред.дон}} = 25 \text{ м/с}$;
- максимальный коэффициент подъемной силы $C_{y_{\text{max}}} = 1,2$;
- материал трубы маха — сталь 20;
- расчетная скорость ветра — $V = 10,3 \text{ м/с}$ (результат аэродинамического расчета);
- коэффициент быстроходности в рабочей точке характеристики ветроустановки — $Z = 6,5$;
- плотность воздуха — $\rho = 1,23 \text{ кг/м}^3$.

4.2. Центробежная сила, действующая на лопасть при предельно допустимой скорости ветра

Рассчитываем радиус расположения центра тяжести лопасти:

$$R_{ц.т} = 0,6R = 0,6 \cdot 2 = 1,2 \text{ м.}$$

Определяем частоту вращения ветроколеса:

$$n_{\text{пред.дон}} = \frac{60VZ}{\pi D} = \frac{60 \cdot 25 \cdot 6,5}{\pi \cdot 4} = 775,9 \text{ об/мин,}$$

тогда угловая скорость ветроколеса

$$\omega_{\text{пред.дон}} = \frac{\pi n}{30} = \frac{\pi \cdot 775,9}{30} = 81,3 \text{ с}^{-1}.$$

По соотношению (3.3) находим площадь профиля лопасти у корня:

$$S_{\text{проф}} \approx 0,7bc = 0,7\bar{c}_b b^2 = 0,7 \cdot 0,183 \cdot (0,2)^2 = 0,0051 \text{ м}^2,$$

тогда масса лопасти (см. выражение (3.4))

$$m_{\text{лоп}} = \rho_{\text{лоп}} V_{\text{лоп}} = \rho_{\text{лоп}} S_{\text{проф}} l = 0,6 \cdot 10^3 \cdot 0,0051 \cdot 1,6 = 4,919 \text{ кг}.$$

Теперь по формуле (3.6) рассчитываем центробежную силу, действующую на лопасть:

$$F_{\text{ц.б.пред.дон}} = m_{\text{лоп}} \omega_{\text{пред.дон}}^2 R_{\text{ц.м}} = 4,919 \cdot (81,3)^2 \cdot 1,2 = 38969,7 \text{ Н}.$$

4.3. Момент, создаваемый аэродинамической силой

4.3.1. Момент при расчетной скорости ветра

По графику на рис. 3.4 находим величину относительного радиуса парусности. Для данного значения коэффициента быстроходности $Z = 6,5$ относительный радиус парусности $\bar{r}_{\text{пар}} = 0,69$. Для заданных геометрических размеров ветроколеса $D = 4$ м, т. е. радиус ветроколеса $R = 2$ м, размерная величина радиуса парусности

$$r_{\text{пар}} = \bar{r}_{\text{пар}} R = 0,69 \cdot 2 = 1,38 \text{ м}.$$

В соответствии с рекомендациями разд. 3 и по рис. 3.3 определяем коэффициент лобового давления на лопасть для заданного значения быстроходности и принимаем его с запасом: $B = 1,4$ (на случай увеличения быстроходности).

По формуле (3.13) рассчитываем силу лобового давления на лопасть:

$$P_{a_{\text{лоп}}} = B \frac{1}{i_{\text{лоп}}} \frac{\rho V^2}{2} \frac{\pi D^2}{4} = 1,4 \cdot \frac{1}{3} \frac{1,23 \cdot 10,3^2}{2} \frac{\pi \cdot 4^2}{4} = 382,6 \text{ Н}.$$

Внутренний радиус ветроколеса $r_0 = \bar{r}_0 R = 0,2 \cdot 2 = 0,4$ м.

Теперь в соответствии с выражением (3.12) находим момент, создаваемый аэродинамической силой при расчетной скорости ветра:

$$M_a = P_{a_{\text{лоп}}} (r_{\text{пар}} - r_0) = 382,6(1,38 - 0,4) = 374,9 \text{ Н·м}.$$

4.3.2. Момент при предельно допустимой скорости ветра

Так как колесо нестабилизируемое, то расчет силы лобового давления на лопасть при предельно допустимой скорости ветра производим по формуле (3.25). Вначале определим величины, входящие в (3.25).

По формуле (3.18) определяем площадь лопасти в плане:

$$S_{\text{лон}} = \frac{R^2(1 - \bar{r}_0)(\bar{b}_{R_{\text{корн}}} + \bar{b}_{R_{\text{периф}}})}{2} =$$

$$= \frac{2^2(1 - 0,2)(0,12 + 0,08)}{2} = 0,32 \text{ м}^2.$$

Квадрат относительной величины условного радиуса по (3.17)

$$\bar{r}_m^2 = \frac{1 + \bar{r}_0 + \bar{r}_0^2}{3} = \frac{1 + 0,2 + 0,2^2}{3} = 0,413 \text{ о. е.}$$

Сила лобового давления на лопасть при скорости ветра $V_{\text{пред.дон}} = 25 \text{ м/с}$ по (3.25)

$$P_{\text{max}} = C_{y_{\text{max}}} S_{\text{лон}} \frac{\rho}{2} (Z^2 \bar{r}_m^2 + 1) V_{\text{пред.дон}}^2 =$$

$$= 1,2 \cdot 0,32 \frac{1,23}{2} (6,5^2 \cdot 0,413 + 1) 25^2 = 2723 \text{ Н.}$$

Изгибающий момент от силы лобового давления на лопасть при предельно допустимой скорости ветра

$$M_{a_{\text{пред.дон}}} = P_{\text{max}} (r_{\text{нар}} - r_0) = 2723(1,38 - 0,4) = 2668,5 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

4.4. Момент, создаваемый распределенными центробежными силами, действующими на лопасть при предельно допустимой скорости ветра

В соответствии с (3.27) создаваемый распределенными центробежными силами момент, Н·м,

$$M_{\text{ц.с}_{\text{пред.дон}}} = \frac{1}{2} I_{\text{лон}} \omega_{\text{пред.дон}}^2 \sin 2\varphi.$$

Угол φ — это угол установки корневого сечения лопасти, в соответствии с исходными данными $\varphi = 13^\circ$. Угловая скорость определена в подразд. 4.2: $\omega_{\text{пред.дон}} = 81,3 \text{ с}^{-1}$ при предельно допустимой скорости ветра и нестабилизируемом ветроколесе. Из выражений (3.50) и (3.51) имеем величину момента инерции лопасти

$$I_{\text{лон}} = \frac{l}{4} \rho_{\text{лон}} b^4 S_s,$$

где $S_s = 0,0988K_c$, а K_c определяем по (3.48) или (3.49).

Поскольку в данном случае $\bar{c}_b = 0,183 > 0,15$, по формуле (3.49) находим коэффициент K_c , предварительно найдя все входящие в него величины.

Высота лопасти

$$l = \frac{D(1 - \bar{d}_0)}{2}.$$

Для $\bar{d}_0 = \bar{r}_0 = 0,2$

$$l = \frac{D(1 - \bar{d}_0)}{2} = \frac{D(1 - 0,2)}{2} = 0,4D = 0,4 \cdot 4 = 1,6 \text{ м.}$$

Хорда лопасти у корня

$$b_{\text{корн}} = \bar{b}_{R_{\text{корн}}} R = 0,12 \cdot 2 = 0,24 \text{ м} = 240 \text{ мм.}$$

Коэффициент

$$K_c = 1 + 3,586(\bar{c}_b - 0,15) = 1 + 3,586(0,183 - 0,15) = 1,118,$$

откуда

$$S_s = 0,0988K_c = 0,0988 \cdot 1,118 = 0,1104.$$

Таким образом, момент инерции лопасти, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$,

$$I_{\text{лон}} = \frac{1,6}{4} 0,6 \cdot 10^3 (0,24)^4 \cdot 0,1104 = 0,0879.$$

Теперь рассчитываем создаваемый распределенными центробежными силами момент при предельно допустимой скорости ветра, Н·м:

$$\begin{aligned} M_{\text{ц.с.пред.дон}} &= \frac{1}{2} I_{\text{лон}} \omega_{\text{пред.дон}}^2 \sin 2\varphi = \\ &= \frac{1}{2} 0,0879 (81,3)^2 \sin 26^\circ = 127,3. \end{aligned}$$

4.5. Суммарный момент, действующий на лопасть при предельно допустимой скорости ветра

Модуль суммарного момента в соответствии с (3.52), Н·м,

$$\begin{aligned} M_{пред.доп} &= \sqrt{M_{a_{пред.доп}}^2 + M_{ц.с_{пред.доп}}^2} = \\ &= \sqrt{(2668,5)^2 + (127,3)^2} = 2671,5. \end{aligned}$$

4.6. Выбор диаметра трубы маха

Если мах лопасти представляет собой трубу, то в соответствии с формулами (3.58) — (3.60) определяем наружный диаметр трубы маха.

Вначале задаемся запасом прочности $n_{пр} = 2,4$.

Выбираем материал трубы (предварительно) — сталь 20. Предельно допустимые напряжения стали 20 по [7] составляют $[\sigma_{\max}] = 400$ МПа.

Задаемся числом α : $\alpha = 0,8$.

Тогда по (3.60)

$$\sigma_{изг} = [\sigma_{\max}] / n_{пр} = 400 / 2,4 = 166,7 \text{ МПа} = 166,7 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

При $M_{изг_{пред.доп}} = 2671,5$ Н·м (см. выше) по формуле (3.58) вычисляем наружный диаметр трубы маха:

$$D_{тр} = \sqrt[3]{\frac{M_{изг_{пред.доп}} \cdot 32}{\sigma_{изг} \pi (1 - \alpha^4)}} = \sqrt[3]{\frac{2671,5 \cdot 32}{166,7 \cdot 10^6 \pi (1 - 0,8^4)}} = 0,065 \text{ м}.$$

Сравним его с максимальной толщиной корневого сечения

$$c_{\max_{корн}} = \bar{c}_{\max_{корн}} b_{корн} = 0,183 \cdot 0,24 = 0,044 \text{ м}.$$

Видим, что $D_{тр} > c_{\max_{корн}}$.

Для уменьшения $D_{тр}$ выбираем сталь с более высоким предельно допустимым напряжением.

По данным [7] можно взять сталь легированную хромистую марки 20Х, у которой $[\sigma_{\max}] = 80 \text{ кгс/мм}^2 = 800 \text{ МПа}$.

Тогда по (3.60)

$$\sigma_{изг} = [\sigma_{\max}] / n_{пр} = 800 / 2,4 = 333,3 \text{ МПа}$$

и

$$D_{mp} = \sqrt[3]{\frac{2671,5 \cdot 32}{333,3 \cdot 10^6 \pi (1 - 0,8^4)}} = \sqrt[3]{1,38 \cdot 10^4} = 0,051 \text{ м.}$$

Итак, $D_{mp} > c_{\max_{\text{корн}}}$.

Можно сделать двадцатиоднопроцентный профиль в корневом сечении. Тогда $c_{\max_{\text{корн}}} = 0,21b_{\text{корн}} = 0,21 \cdot 0,24 = 0,0504$ — полученные величины близки. Но в этом случае надо изменять углы установки.

Выберем по [8] (3-й том) трубу с $D_{mp} = 50 \dots 76$ мм, где можно принять диаметр из предлагаемого ряда: $D_{mp} = 51 \text{ мм} = 0,051 \text{ м}$ и толщиной стенок $\Delta = 1,0 \dots 12 \text{ мм}$.

$$\text{Для } \alpha = 0,8 \text{ по (3.62) } \Delta = D_{mp} \frac{1-\alpha}{2} = 51 \frac{1-0,8}{2} = 5,1 \text{ мм.}$$

Примем из предлагаемого ряда $\Delta = 5,0 \text{ мм}$. Для проверки (3.61):

$$\alpha = \frac{D_{mp} - 2\Delta}{D_{mp}} = \frac{51 - 2 \cdot 5}{51} = 0,8,$$

Итак, $D_{mp} = 0,051 \text{ м}$; $\Delta = 5,0 \text{ мм} = 0,005 \text{ м}$;

$$d_{mp} = D_{mp} - 2\Delta = 0,051 - 2 \cdot 0,005 = 0,041 \text{ м},$$

4.7. Напряжения на отрыв лопасти от центробежной силы

4.7.1. Площадь сечения трубы маха лопасти

Рассчитываем площадь сечения трубы маха лопасти:

$$S_{\text{маха}} = \frac{\pi}{4} (D_{mp}^2 - d_{mp}^2) = \frac{\pi}{4} (0,051^2 - 0,041^2) = 7,22 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

4.7.2. Напряжения на отрыв

По формуле (3.8) находим

$$\sigma_{\text{отр}} = \frac{F_{ц.б_{\text{пред.дон}}}}{S_{\text{маха}}} = \frac{38969,7}{7,22 \cdot 10^{-4}} = 54,0 \cdot 10^6 \text{ Па} = 54,0 \text{ МПа.}$$

4.8. Напряжения от изгибающего момента в опасном сечении

4.8.1. Момент сопротивления изгибу сечения трубы маха

По (3.56) определяем

$$W = \pi D_{тр}^3 \frac{1 - \alpha^4}{32} = \pi \cdot 0,051^3 \frac{1 - 0,8^4}{32} = 7,69 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

4.8.2. Напряжение от изгибающего момента

Определяем изгибающий момент:

$$\sigma_{изг} = \frac{M_{изг_{пред. доп}}}{W} = \frac{2668,5}{7,69 \cdot 10^{-6}} = 347,1 \cdot 10^6 \text{ Па} = 347,1 \text{ МПа}.$$

4.9. Суммарное напряжение в опасном сечении лопасти

Суммарное напряжение в опасном сечении лопасти, МПа, определяем как сумму напряжений от изгиба и отрыва, т. е.

$$\sigma_{сум} = \sigma_{изг} + \sigma_{отр} = 3471,1 + 54,0 = 401,1.$$

4.10. Сравнение суммарного напряжения в опасном сечении с предельно допустимым

Посчитано, что для скорости ветра $V = 25$ м/с $\sigma_{сум} = 401,1$ МПа. С другой стороны, известно предельно допустимое напряжение для выбранного материала трубы маха — $[\sigma_{\max}] = 80 \text{ кгс/мм}^2 = 800 \text{ МПа}$. Таким образом, вычисляем запас прочности маха:

$$n_{пр} = [\sigma_{\max}] / \sigma_{сум} = 800 / 401,1 \approx 2,0.$$

Вывод: при предельно допустимой скорости ветра $V = 25$ м/с данная конструкция лопасти напряжение выдержит.

5. РАСЧЕТ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Генератор приводится во вращение от регулируемого привода с постоянной частотой вращения $n = 250$ об/мин и имеет следующие исходные данные:

- 1) активная мощность $P = 5000$ Вт;
- 2) напряжение на выходе $U = 220$ В;

- 3) частота переменного напряжения генератора $f_1 = 50$ Гц с возможностью перехода на $f_2 = 400$ Гц;
- 4) охлаждение генератора осуществляется путем самовентиляции.

При проектировании возникает ряд вопросов, требующих решения на начальной стадии разработки.

Рассмотрим способ перехода с частоты $f_1 = 50$ Гц на частоту $f_2 = 400$ Гц. Осуществить такой переход в одном генераторе чисто электромагнитным путем представляется нерациональным из-за низкой частоты вращения. Поэтому предлагается переход на частоту $f_2 = 400$ Гц производить при помощи электронного преобразователя со звеном постоянного тока. В качестве преобразователя может быть применен полумостовой инвертор или инвертор типа «Мак-Мори».

По мнению разработчиков, предпочтительно использовать инвертор Мак-Мори, имеющий устойчивую коммутацию при инвертировании и допускающий возможность регулирования напряжения на выходе.

В качестве звена постоянного тока возможно использовать трехфазную схему выпрямления, известную под названием «схема Ларионова». Критическим моментом для возможности применения инвертора Мак-Мори является форма напряжения на выходе инвертора, которая будет практически прямоугольной. Приведение напряжения преобразователя к форме, близкой к синусоидальной, существенно усложнит устройство и понизит его надежность.

В случае допустимости прямоугольной формы выходного напряжения на обеих частотах (50 и 400 Гц) возможен вариант с применением преобразователя и на частоте 50 Гц, что дает возможность применения основного генератора в трехфазном исполнении.

Трехфазное исполнение генератора представляется более выгодным ввиду уменьшения расчетной мощности, габаритов и потерь от обратного вращающегося поля.

Принципиальная схема установки с преобразователем показана на рис. 5.1.

Возможны и другие варианты построения инвертора Мак-Мори с применением транзисторов и полностью управляемых тиристоров (тринисторов). К этим вариантам можно обратиться после принципиального решения вопроса.

Идея работы инвертора Мак-Мори следующая. Постоянное напряжение с выпрямительного моста подается на среднюю точку 1; два трансформатора инвертора, тиристоры VS1 и VS2 попеременно открываются импульсами со схемы управления. При открытии, например, тиристора VS1 конденсатор C2 разряжается и запирает тиристор VS2, и наоборот. При этом во вторичной обмотке трансформатора Тр индуцируется переменное напряжение. Графически работа инвертора показана на рис. 5.2.

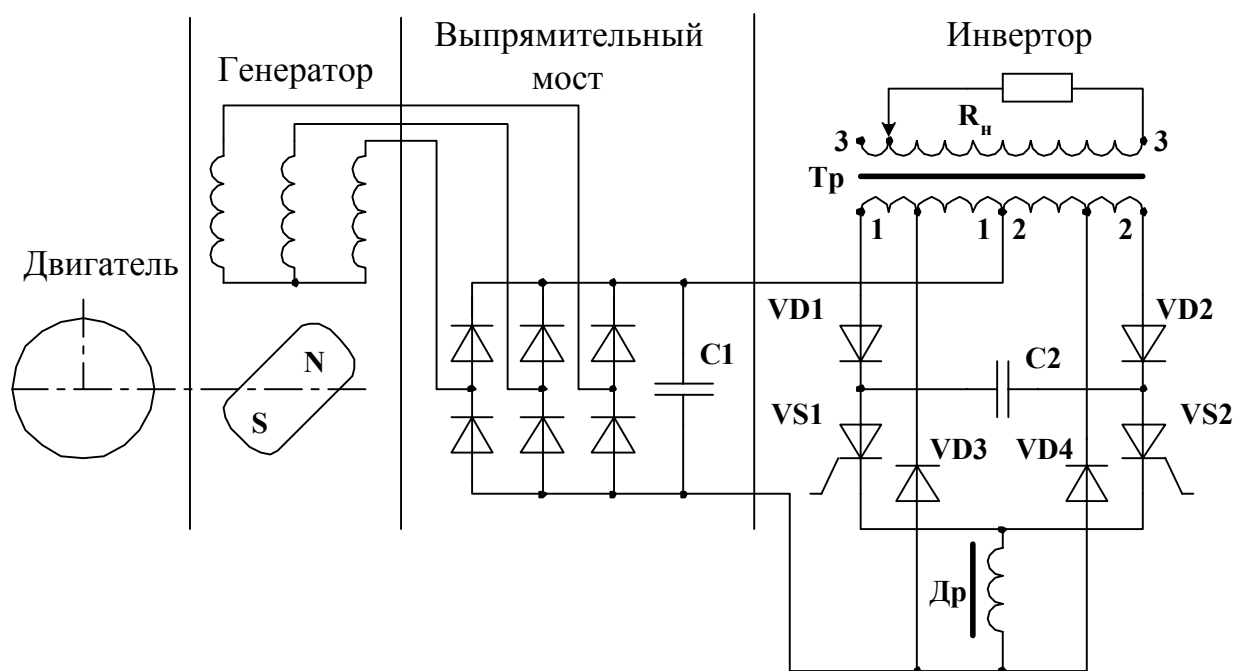


Рис. 5.1. Принципиальная схема генераторной установки с инвертором

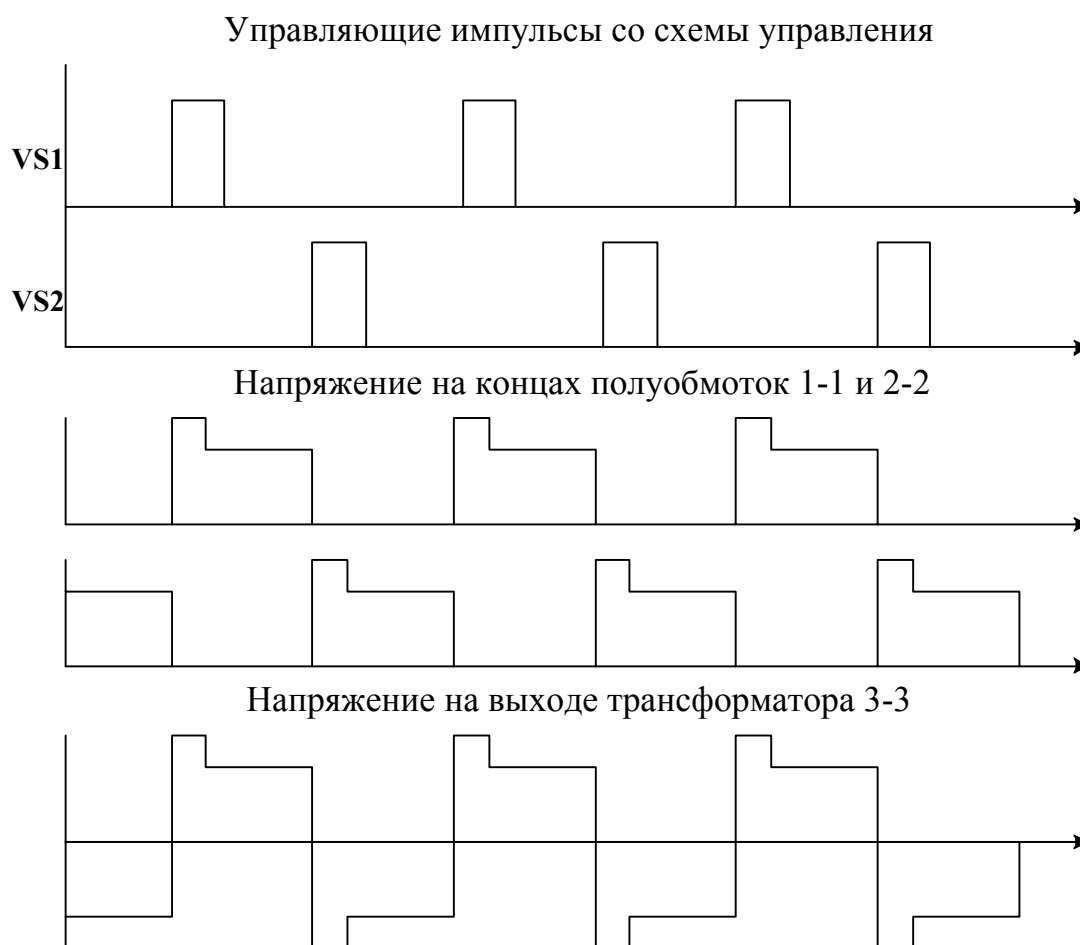


Рис. 5.2. Пояснения к работе инвертора Мак-Мори

Второй вопрос возникает о выборе материала постоянного магнита. Наиболее перспективным представляется применение современных материалов на основе самария и кобальта, а также неодима, железа и бора. Теоретически возможно применение и более дешевых магнитов на основе ферритов, но при этом существенно возрастает размер генератора ввиду необходимости применения концентраторов магнитного потока из-за маленькой остаточной индукции ферритов.

Ввиду сказанного основной вариант генератора принимается однофазным на базе трехфазного, что в перспективе обеспечивает возможность перехода на трехфазную систему.

После изготовления опытного образца необходимо провести специальные испытания в различных условиях и режимах для определения надежности системы возбуждения от постоянных магнитов на основе неодим-железобора.

Имеется также информация о залипании неподвижного ротора синхронных генераторов с постоянными магнитами. Несмотря на принятую в расчете обмотку статора с дробным числом пазов на полюс и фазу, в случае недостаточности этой меры придется сделать скос пазов на статоре на одно зубцовое деление статора и, возможно, увеличить воздушный зазор.

5.1. Исходные данные для проектирования синхронного генератора с постоянными магнитами

Исходными данными для расчета являются:

- номинальная мощность $P = 5000$ Вт;
- номинальное напряжение $U = 220$ В;
- номинальная частота вращения $n = 250$ об/мин;
- номинальная частота тока $f_1 = 50$ Гц;
- число фаз $m = 1$ (с резервом перехода на $m = 3$).

5.2. Определение главных размеров

Главными размерами синхронной машины являются внутренний диаметр статора D и расчетная длина l_δ . Их определяют из основного расчетного уравнения электрической машины. Машинная постоянная Арнольда

$$C_a = \frac{D^2 l_\delta n}{P'} = \frac{6,1}{\alpha_\delta k_\Phi k_0 B_\delta A}, \quad (5.1)$$

где P' — расчетная мощность; α_δ — расчетный коэффициент полюсного перекрытия; k_Φ — коэффициент формы поля; k_0 — обмоточный коэффициент

обмотки статора; A — линейная нагрузка статора; B_δ — максимальное значение индукции в воздушном зазоре при номинальной нагрузке.

Расчетную мощность определяем по формуле

$$P' = \frac{k_e P_n}{\cos \varphi}, \quad (5.2)$$

где $k_e = \frac{E_i}{U_n}$ — коэффициент, характеризующий внутреннюю ЭДС якорной обмотки.

Согласно данным расчетной практики для синхронных генераторов с постоянными магнитами величину коэффициента k_e выбираем в пределах 1,2 ... 1,4. Примем $k_e = 1,2$ [9].

Главные размеры рассчитываем исходя из мощности при трехфазном питании. Соотношения мощностей при однофазном и трехфазном питании следующие:

$$P_{1\phi} = 0,7 P_{3\phi}; \quad (5.3)$$

$$P_{3\phi} = \frac{P_{1\phi}}{0,7} = \frac{5000}{0,7} = 7142,8 \text{ Вт.}$$

Обычно при отстающем токе для генераторов принимают $\cos \varphi = 0,8$:

$$P_w = P' = \frac{1,2 \cdot 7142,8}{0,8} = 10714,2 \text{ Вт.}$$

Значение расчетного коэффициента полюсного перекрытия зависит от числа пар полюсов p , которое определяют из соотношения

$$p = \frac{60f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{250} = 12. \quad (5.4)$$

Примем $\alpha_\delta = 0,8$.

Коэффициент формы поля k_Φ возьмем равным 1,11.

Обмоточный коэффициент k_0 в случае применения двухслойной обмотки с относительным шагом укорочения в пределах 0,8 ... 0,87 предварительно выбираем в пределах 0,9 ... 0,92.

Примем $k_0 = 0,92$.

Значения линейной нагрузки A задаем исходя из режимов работы, условий охлаждения и номинальной мощности синхронного генератора. Для продолжительного режима работы при охлаждении продувом выбираем $A = 220 \cdot 10^2$ А/м.

Значение магнитной индукции в воздушном зазоре ограничивается, главным образом, насыщением магнитной цепи. Примем $B_\delta = 0,8$ Тл.

Между главными размерами синхронного генератора существует соотношение

$$\lambda = l_\delta / \tau, \quad (5.5)$$

где

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} — \quad (5.6)$$

полюсное деление.

Подставляя (5.6) в (5.5), получим

$$\lambda = \frac{2l_\delta p}{\pi D}. \quad (5.7)$$

Соотношение λ зависит от числа пар полюсов. Для выпускаемых в настоящее время синхронных машин это соотношение обычно лежит в пределах 1,2 ... 2,3. Примем $\lambda = 1,5$, тогда расчетная длина, выраженная из (5.7), будет

$$l_\delta = \frac{\lambda \pi D}{2p}. \quad (5.8)$$

Подставляя выражение (5.8) в уравнение машинной постоянной Арнольда (5.1), получаем формулу для вычисления диаметра расточки статора:

$$D = \sqrt[3]{\frac{6,1 \cdot 2 p P'}{\lambda \pi \alpha_\delta k_\phi k_0 A B_\delta n}}. \quad (5.9)$$

Для заданных исходных данных

$$D = \sqrt[3]{\frac{6,1 \cdot 24 \cdot 10714,2}{1,5 \cdot 3,14 \cdot 0,8 \cdot 1,11 \cdot 0,92 \cdot 220 \cdot 10^2 \cdot 0,8 \cdot 250}} = 0,4525 \text{ м.}$$

Принимаем $D = 0,45$ м.

Определяем по формуле (5.6) полюсное деление:

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} = \frac{3,14 \cdot 0,45}{24} = 0,0589 \text{ м.}$$

Находим расчетную длину статора, выражая ее из (5.5):

$$l_\delta = \lambda \tau = 1,5 \cdot 0,0589 = 0,0883 \text{ м.}$$

Принимаем $l_\delta = 0,08 \text{ м.}$

Для контроля выбора главных размеров воспользуемся методом на основе универсальной машинной постоянной И. М. Постникова:

$$C_s = (K_w K_\phi \rho B_z)^{-\frac{1}{4}}, \quad (5.10)$$

где C_s — универсальная машинная постоянная И. М. Постникова для статора; K_w — обмоточный коэффициент; K_ϕ — полный коэффициент заполнения; ρ — плотность тока в обмотке статора; B_z — средняя магнитная индукция в зубцах статора.

Принимаем обмоточный коэффициент $K_w = 0,92$, полный коэффициент заполнения берем из работы [10]: $K_\phi = 0,1$.

Среднюю рекомендуемую плотность тока для малых синхронных генераторов [10] принимаем $6 \text{ А/мм}^2 = 6 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$.

Среднюю магнитную индукцию в зубцах статора принимаем на основании опыта проектирования маломощных синхронных генераторов $B_z = 1,4 \text{ Тл.}$

Используя принятые величины, входящие в (5.10), получим

$$C_s = (0,92 \cdot 0,1 \cdot 6 \cdot 10^6 \cdot 1,4)^{-\frac{1}{4}} = 0,0337,$$

что соответствует данным работы [10].

Определяем величину полюсного деления:

$$\tau = C_s^4 \sqrt[4]{\frac{P_w \beta}{2 p f \sqrt{2} \lambda_1}}, \quad (5.11)$$

где P_w — расчетная мощность; $\beta = \tau / l_1 = 1/1,5 \approx 0,67$; $f = 50 \text{ Гц}$; $\lambda_1 = \pi \tau / \tau$ — относительная глубина паза, $\lambda_1 \approx 0,4$ [10].

Для наших исходных данных

$$\tau = 0,0337 \cdot \sqrt[4]{\frac{10714,2 \cdot 0,67}{24 \cdot 50 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,4}} = 0,06 \text{ м.}$$

Диаметр расточки статора, м,

$$D_i = \frac{2p\tau}{\pi} = \frac{24 \cdot 0,06}{\pi} = 0,45,$$

что вполне согласуется с диаметром, полученным на основе метода машинной постоянной Арнольда.

5.3. Расчет обмотки и магнитопровода статора

В статоре применяем двухслойную петлевую обмотку. Использование таких обмоток позволяет уменьшить расход меди и изоляционных материалов, а также улучшить форму кривой ЭДС.

1. Расчетная величина магнитного потока полюса в режиме холостого хода

$$\Phi_{\delta 0} = B_{\delta 0} l \tau \alpha_i, \quad (5.12)$$

$$\Phi_{\delta 0} = 1,07 \cdot 0,08 \cdot 0,0589 \cdot 0,716 = 0,0036 \text{ Вб.}$$

2. ЭДС холостого хода, вычисляемая при естественной стабилизации напряжения и подмагничивании спинки якоря:

$$E_0 = k_e U_\phi, \quad (5.13)$$

$$E_0 = 1,14 \cdot 127 = 145 \text{ В,}$$

где

$$U_\phi = U / \sqrt{3} = 220 / \sqrt{3} = 127 \text{ В.}$$

3. Предварительное число витков в фазе обмотки якоря

$$w_\phi = \frac{E_0}{4k_b k_0 f \Phi_{\delta 0}}, \quad (5.14)$$

$$w_\phi = \frac{145}{4 \cdot 1,11 \cdot 0,906 \cdot 50 \cdot 0,0036} = 200,26.$$

Принимаем $w_\phi = 200$.

4. Номинальный ток фазы, А,

$$I_{нф} = \frac{P_n}{m U_\phi \cos \varphi}, \quad (5.15)$$

$$I_{нф} = \frac{7142,8}{3 \cdot 127 \cdot 0,8} = 23,4.$$

5. Число пазов статора

$$Z = 2ptq, \quad (5.16)$$

где q — число пазов на полюс и фазу.

При числе полюсов $2p > 8$ и малом полюсном делении q выбираем дробным. При дробном q уменьшается отрицательное влияние высших гармоник ЭДС.

Принимаем $q = 1\frac{1}{4}$, тогда

$$Z = 24 \cdot 3 \cdot 1\frac{1}{4} = 90.$$

6. Число эффективных проводников в пазу

$$N_n = \frac{w_\phi a}{qp}, \quad (5.17)$$

где a — число параллельных ветвей обмотки фазы.

При выборе числа параллельных ветвей ток в параллельной ветви должен быть в пределах 50 ... 150 А.

В данном случае $a = 1$, тогда

$$N_n = \frac{200 \cdot 1}{1\frac{1}{4} \cdot 12} = 13,3.$$

Принимаем $N_n = 12$. Уточняем число витков в фазе:

$$w_\phi = \frac{N_n qp}{a}, \quad (5.18)$$

$$w_\phi = \frac{12 \cdot 1\frac{1}{4} \cdot 12}{1} = 180.$$

7. Проверяем условия симметрии двухслойной якорной обмотки.

Для этого должны соблюдаться следующие условия:

$$\begin{cases} \frac{Z}{mt'} - \text{целое число;} \\ \frac{2p}{d'} - \text{целое число,} \end{cases} \quad (5.19)$$

где t' — наибольший общий делитель Z и p ; d' — знаменатель простой дроби числа q .

Проверяем соблюдение условий (5.19) для наших параметров:

$$\begin{cases} \frac{90}{3 \cdot 3} = 10 - \text{целое число;} \\ \frac{24}{4} = 6 - \text{целое число.} \end{cases}$$

Таким образом, условия симметрии двухслойной якорной обмотки соблюдены.

8. Зубцовое деление

$$t = \frac{\pi D}{Z}, \quad (5.20)$$

$$t = \frac{3,14 \cdot 0,45}{90} = 0,0157.$$

9. Уточняем линейную нагрузку, А/м:

$$A = \frac{ZN_n I_{нф}}{\pi D a}, \quad (5.21)$$

$$A = \frac{90 \cdot 12 \cdot 23,4}{3,14 \cdot 0,45 \cdot 1} = 17885,4.$$

10. Уточняем величину магнитного потока в режиме холостого хода:

$$\Phi_{\delta 0} = \frac{E_0}{4k_b k_0 f w_\phi}, \quad (5.22)$$

$$\Phi_{\delta 0} = \frac{145}{4 \cdot 1,11 \cdot 0,91 \cdot 50 \cdot 180} = 0,00399 \text{ Вб.}$$

11. Минимальная ширина зубца

$$b_{Z\min} = \frac{B_{\delta 0} t Z}{B_{Z\max} k_c}, \quad (5.23)$$

где

$$B_{\delta 0} = \frac{\Phi_{\delta 0}}{l \tau \alpha_i}, \quad (5.24)$$

$$B_{\delta 0} = \frac{0,00399}{0,08 \cdot 0,0589 \cdot 0,716} = 1,18 \text{ Тл};$$

$B_{Z\max}$ — допустимое значение индукции в зубце $B_{Z\max} = 1,6 \dots 1,9$ Тл (для стали 1411); k_c — коэффициент заполнения магнитопровода сталью, $k_c = 0,95$ при толщине листа $\Delta_l = 3,5 \cdot 10^{-4}$ м.

Для полученных результатов

$$b_{Z\min} = \frac{1,18 \cdot 0,0157}{1,9 \cdot 0,95} = 0,0102 \text{ м.}$$

Для уменьшения сопротивления воздушного зазора и снижения зубцовых пульсаций пазы статора выполняют полуоткрытыми. При изготовлении обмотки якоря из провода прямоугольного сечения пазы оказываются прямоугольными, а зубцы — трапецеидальными.

12. Предварительное значение ширины паза

$$b_n = \frac{\pi (D + 2h_k)}{Z} - b_{Z\min}, \quad (5.25)$$

где h_k — высота коронки зубца, $h_k = (1,3 \dots 1,5) \cdot 10^{-3}$ м.

Итак, имеем

$$b_n = \frac{3,14(0,45 + 2 \cdot 0,0015)}{90} - 0,0102 = 0,0056 \text{ м.}$$

13. Сечение эффективного проводника обмотки статора

$$q_{\text{эф}} = \frac{I_n}{a j_1}, \quad (5.26)$$

где j_1 — допустимая плотность тока.

Плотность тока в проводниках обмотки якоря при продолжительном режиме работы зависит от условий охлаждения. При самовентиляции $j_1 = (5 \dots 12) \cdot 10^6$ А/м². Принимаем $j_1 = 5$ А/мм², тогда

$$q_{эф} = \frac{23,4}{1,5} = 4,68 \text{ мм}^2.$$

14. Расчетная ширина изолированного проводника, м,

$$a_{из} = \frac{b_n - 2\Delta n}{n_{из}}, \quad (5.27)$$

где $n_{из}$ — число эффективных проводников по ширине паза; Δn — толщина пазовой изоляции.

В качестве пазовой изоляции используют стеклослюдиниты и полиамидную пленку. В этом случае суммарная толщина изоляции на сторону $\Delta n = (0,18 \dots 0,22)10^{-3}$ м.

Итак, для данного случая

$$a_{из} = \frac{0,0056 - 2 \cdot 0,0002}{4} = 0,0017 \text{ м.}$$

15. Расчетная ширина неизолированного провода

$$a_{неиз} = a_{из} - \Delta_{из}, \quad (5.28)$$

где $\Delta_{из}$ — толщина изоляции провода на обе стороны.

Для обмотки статора применяют провода ПНСДК и ПНСДКТ ($t_p = 250 \dots 400$ °С) с двухсторонней толщиной изоляции $\Delta_{из} = (0,2 \dots 0,3)10^{-3}$ м.

В данном случае

$$a_{неиз} = 0,0017 - 0,0003 = 0,0014 \text{ м.}$$

16. Стандартные размеры серийно выпускаемых неизолированных проводов следующие:

$$a = 1,32 \text{ мм}; \quad b = 3,55 \text{ мм}; \quad q_a = 4,471 \text{ мм}^2.$$

17. Уточненная ширина паза

$$b_n = n_{из}(a + \Delta_{из}) + 2\Delta n, \quad (5.29)$$

$$b_n = 3 \cdot (1,32 + 0,3) + 2 \cdot 0,2 = 5,26 \text{ мм.}$$

Принимаем $b_n = 5,3$ мм.

18. Высота паза

$$h_n = n_b(b + \Delta_{uz}) + 3\Delta_n + h_k + h_{кл}, \quad (5.30)$$

где n_b — число проводников по высоте паза; $h_{кл}$ — высота клина, $h_{кл} = (5 \dots 8)10^{-4}$ м.

$$h_n = 4(3,55 + 0,3) + 3 \cdot 0,2 + 1,5 + 0,6 = 18,1 \text{ мм},$$

19. Ширина щели полуоткрытого паза

$$b_{щ} = a + \Delta_{uz} + \Delta_{щ}, \quad (5.31)$$

$$b_{щ} = 1,32 + 0,3 + 0,8 = 2,22 \text{ мм},$$

где $\Delta_{щ}$ — припуск по ширине щели, $\Delta_{щ} = (7 \dots 8)10^{-4}$ м.

Эскиз паза приведен на рис. 5.3.

20. Уточненная плотность тока

$$j_a = I_{нф} / q_a, \quad (5.32)$$

$$j_a = 23,4 / 4,471 = 5,23 \text{ А/мм}^2.$$

21. Уточненная минимальная ширина зубца

$$b_{Z \min} = \frac{\pi(D + 2h_k)}{Z} - b_n, \quad (5.33)$$

$$b_{Z \min} = \frac{3,14(0,45 + 2 \cdot 0,0015)}{90} - 0,0053 = 0,0105 \text{ м}.$$

22. Уточненная индукция в узком сечении зубца

$$B_{Z \max} = \frac{B_{\delta 0} t_z}{b_{Z \min} k_c}, \quad (5.34)$$

$$B_{Z \max} = \frac{1,18 \cdot 0,0157}{0,0105 \cdot 0,95} = 1,86 \text{ Тл}.$$

23. Высота спинки статора

$$h_a = \frac{\Phi_{\delta 0}}{2lk_c B_d}, \quad (5.35)$$

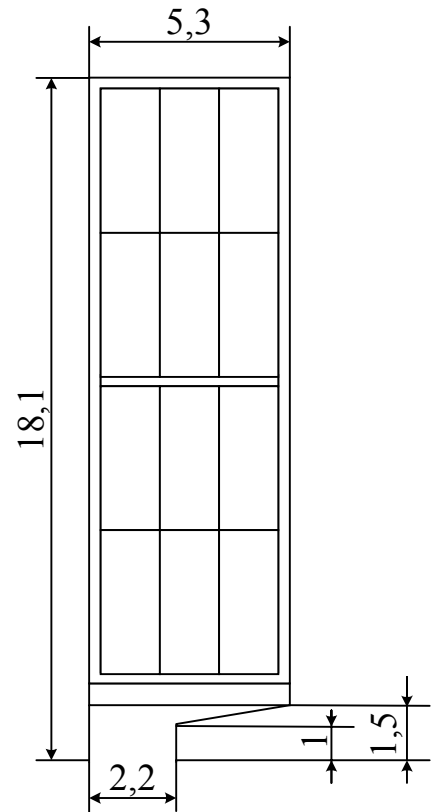


Рис. 5.3. Паз статора: М 5:1,
 $a \times b = 13,2 \times 3,55$,
 $q_a = 4,471 \text{ мм}^2$

$$h_a = \frac{0,00399}{2 \cdot 0,08 \cdot 0,95 \cdot 1,5} = 0,0175 \text{ м},$$

где B_d — допустимая индукция в спинке якоря. Для стали 1411 $B_d \leq 1,5$ Тл.

24. Внешний диаметр статора

$$D_d = D + 2h_n + 2h_a, \quad (5.36)$$

$$D_d = 0,45 + 2 \cdot 0,0181 + 2 \cdot 0,0175 = 0,521 \text{ м}.$$

Полученное значение округляем до ближайшего нормализованного диаметра: $D_{dcm} = 0,52$ м.

25. Уточняем высоту спинки статора:

$$h_a = \frac{D_a - D - 2h_n}{2}, \quad (5.37)$$

$$h_a = \frac{0,52 - 0,45 - 2 \cdot 0,0181}{2} = 0,0169 \text{ м}.$$

26. Уточняем индукцию в спинке статора:

$$B_d = \frac{\Phi_{\delta 0}}{2lk_c h_a}, \quad (5.38)$$

$$B_d = \frac{0,00399}{2 \cdot 0,08 \cdot 0,95 \cdot 0,0169} = 1,55 \text{ Тл}.$$

27. Шаг обмотки статора.

Двухслойные обмотки статора, как правило, выполняют с укороченным шагом:

$$y_1 = (0,8 \dots 0,86)\tau_n,$$

где

$$\tau_n = 3q_1 = 3 \cdot 1 \frac{1}{4} = \frac{15}{4} = 3 \frac{3}{4} = 3,75,$$

тогда $y_1 = 3,75(0,8 \dots 0,86) = 3 \dots 3,225$,

Приняв $y_1 = 3$, получим

$$\beta = y_1 / \tau_n = 3 / 3,75 = 0,8. \quad (5.39)$$

28. Коэффициент укорочения

$$k_y = \sin \frac{\pi\beta}{2}, \quad (5.40)$$

$$k_y = \sin \frac{3,14 \cdot 0,8}{2} = 0,95.$$

29. Коэффициент распределения

$$k_p = \frac{0,5}{(bd + c) \sin\left(\frac{30^\circ}{bd + c}\right)}. \quad (5.41)$$

Известно, что $q_1 = b + c / d$, где b — целое число, c / d — правильная несократимая дробь, откуда

$$bd + c = 1 \cdot 4 + 1 = 5,$$

тогда

$$k_p = \frac{0,5}{5 \sin(30^\circ/5)} = 0,958.$$

30. Обмоточный коэффициент

$$k_a = k_y \cdot k_p, \quad (5.42)$$

$$k_a = 0,95 \cdot 0,958 = 0,91.$$

31. Коэффициент воздушного зазора

$$k_\delta = \frac{t_z + (5t_z\delta)/b_{\text{ш}}}{t_z + ((5t_z\delta)/b_{\text{ш}}) - b_{\text{ш}}}, \quad (5.43)$$

$$k_\delta = \frac{15,7 + \frac{5 \cdot 15,7 \cdot 0,6}{2,22}}{15,7 + \frac{5 \cdot 15,7 \cdot 0,6}{2,22} - 2,22} = 1,064,$$

где δ — величина воздушного зазора, $\delta = 0,6$ мм.

Схемы трехфазной обмотки показана на рис. 5.4, 5.5, звезда пазовых ЭДС — на рис. 5.6. Порядок соединения катушек обмотки приведен в табл. 5.1.

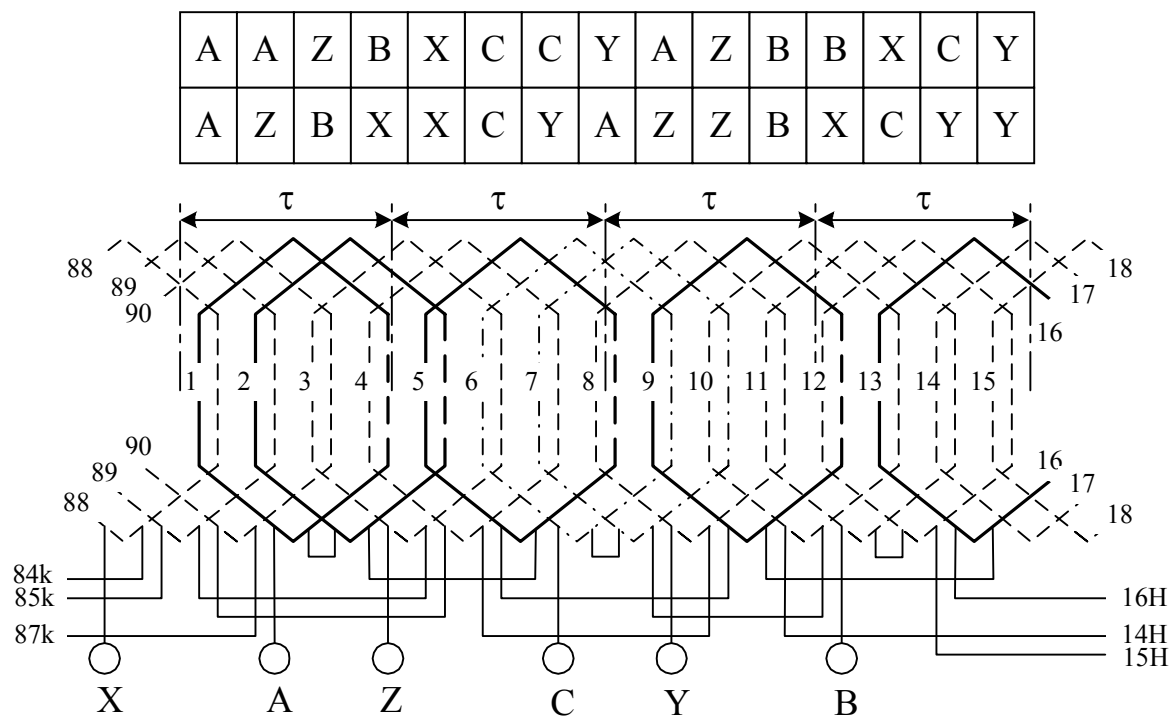


Рис. 5.4. Схема обмотки

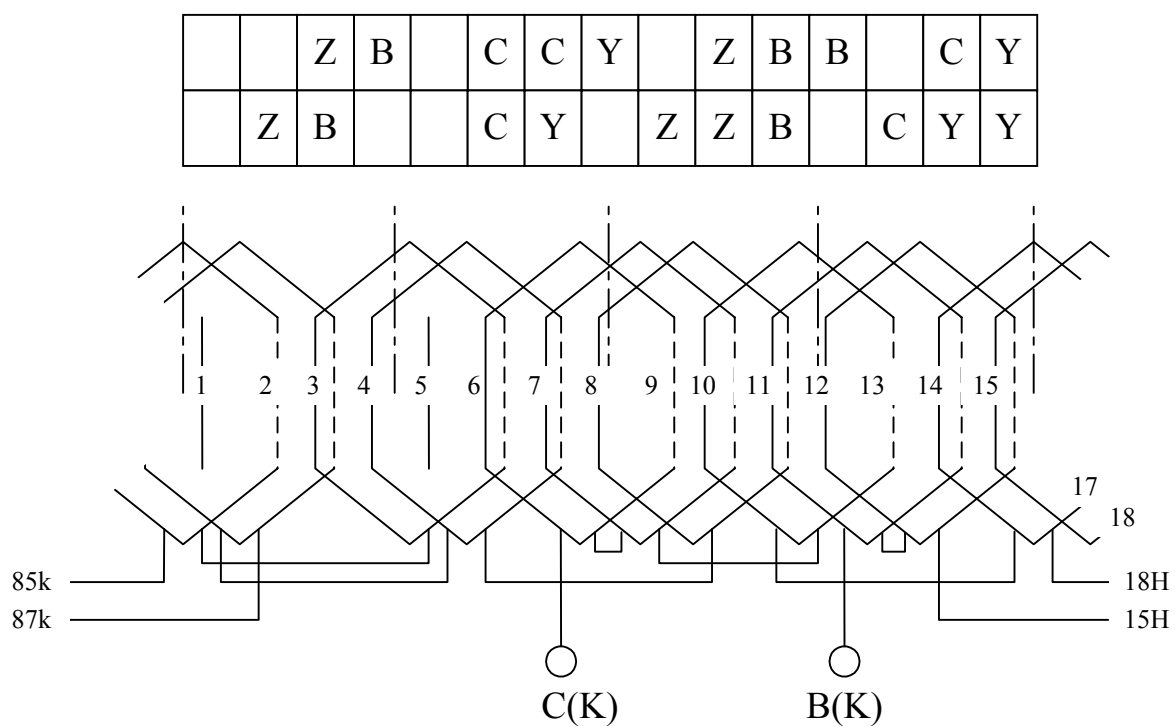


Рис. 5.5. Схема обмотки на одно чередование:

$$m = 1; Z = 90; q = 1\frac{1}{4}; Z' = 16; 2p' = 4$$

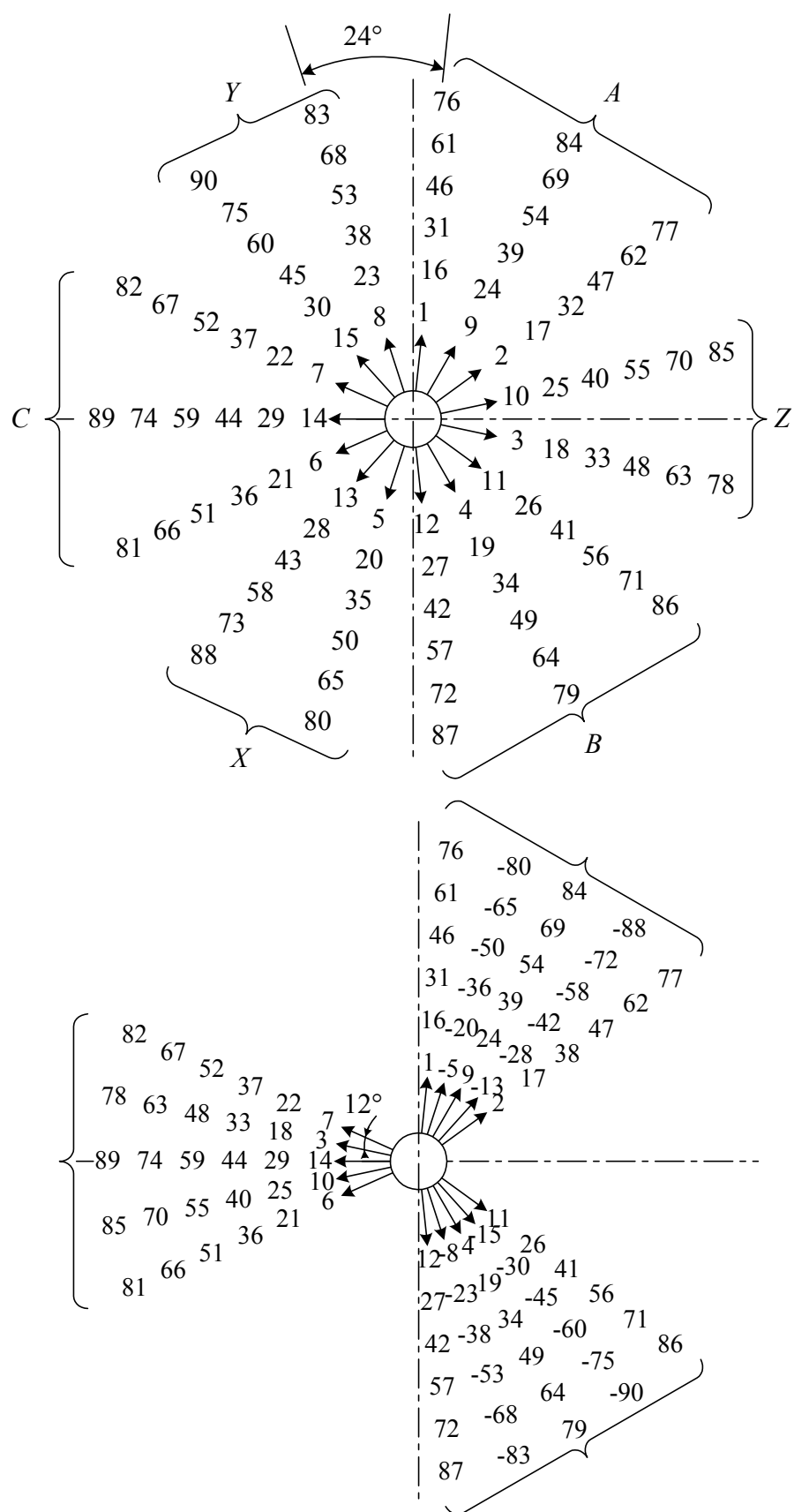


Рис. 5.6. Звезды пазовых ЭДС

Таблица 5.1

Порядок соединения катушек фаз обмотки

A — 1Н	B — 11Н	C — 6 Н
1К — 2Н	11К — 12Н	6К — 7Н
2К — 5Н	12К — 15Н	7К — 10Н
5К — 2Н	15К — 19Н	10К — 14Н
9К — 13Н	19К — 23Н	14К — 18Н
13К — 16Н	23К — 26Н	18К — 21Н
16К — 17Н	26К — 27Н	21К — 22Н
17К — 20Н	27К — 30Н	22К — 25Н
20К — 24Н	30К — 34Н	25К — 29Н
24К — 28Н	34К — 38Н	29К — 33Н
28К — 31Н	38К — 41Н	33К — 36Н
31К — 32Н	41К — 42Н	36К — 37Н
32К — 35Н	42К — 45Н	37К — 40Н
35К — 39Н	45К — 49Н	40К — 44Н
39К — 43Н	49К — 53Н	44К — 48Н
43К — 46Н	53К — 56Н	48К — 51Н
46К — 47Н	56К — 57Н	51К — 52Н
47К — 50Н	57К — 60Н	52К — 55Н
50К — 54Н	60К — 64Н	55К — 59Н
54К — 58Н	64К — 68Н	59К — 63Н
58К — 61Н	68К — 71Н	63К — 66Н
61К — 62Н	71К — 72Н	66К — 67Н
62К — 65Н	72К — 75Н	67К — 70Н
65К — 69Н	75К — 79Н	70К — 74Н
69К — 73Н	79К — 83Н	74К — 78Н
73К — 76Н	83К — 86Н	78К — 81Н
76К — 77Н	86К — 87Н	81К — 82Н
77К — 80Н	87К — 90Н	82К — 85Н
80К — 84Н	90К — 4Н	85К — 89Н
84К — 88Н	4К — 8Н	89К — 3Н
88К — X	8К — Y	3К — Z

32. Активное сопротивление фазы обмотки якоря

$$R_d = \rho_0 \frac{l_{cp} \omega_\phi}{q_d a} k_t, \quad (5.44)$$

где ρ_0 — удельное сопротивление при $t = 20$ °C, $\rho_0 = 1,75 \cdot 10^{-8}$ Ом·м; l_{cp} — средняя длина витка; k_t — температурный коэффициент сопротивления, $k_t = 1,22$.

Средняя длина витка

$$l_{cp} = 2(l + l_l), \quad (5.45)$$

где l_l — длина лобовой части витка,

$$l_l = 1,4\tau, \quad (5.46)$$

$$l_l = 1,4 \cdot 0,0589 = 0,08246 \text{ м},$$

тогда

$$l_{cp} = 2(0,08 + 0,08246) = 0,325 \text{ м}.$$

Теперь рассчитываем величину активного сопротивления фазы обмотки якоря:

$$R_d = 1,22 \cdot 1,75 \cdot 10^{-8} \frac{0,325 \cdot 180}{4,471 \cdot 10^{-6}} = 0,28 \text{ Ом}.$$

33. Индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки якоря

$$x_\sigma = 4\pi\mu_0 f \frac{\omega_\phi^2}{pq} [(\lambda_n + \lambda_\sigma)l + \lambda_l l_l], \quad (5.47)$$

где λ_n , λ_σ , λ_l — удельные проводимости пазового, дифференциального и лобового рассеяния соответственно.

Удельную проводимость пазового рассеяния для прямоугольного паза определяем по формуле

$$\lambda_n = \frac{k_{y1}(h_n - h_k)}{3b_n} + \frac{k_{y2}h_k}{b_{\text{ш}}}, \quad (5.48)$$

где k_{y1} , k_{y2} — коэффициенты, учитывающие укорочение обмотки,

$$k_{y1} = \frac{1 + 3\beta}{4} = \frac{1 + 3 \cdot 0,8}{4} = 0,85,$$

$$k_{y2} = \frac{1 + 3k_{y1}}{4} = \frac{1 + 3 \cdot 0,85}{4} = 0,8875.$$

Определяем удельную проводимость пазового рассеяния:

$$\lambda_n = \frac{0,85(18,1-1,5)}{3 \cdot 5,3} + \frac{0,8875 \cdot 1,5}{2,22} = 1,487.$$

Рассчитываем удельную проводимость дифференциального рассеяния:

$$\lambda_\delta = \frac{\delta_p \alpha_i}{b_{\text{ш}} + 0,8\delta_p} (0,25 + 0,75\beta), \quad (5.49)$$

где

$$\alpha_i = \alpha_p + \frac{4}{\frac{\tau}{\delta_p} + \frac{6}{1-\alpha_p}} \quad (5.50)$$

расчетный коэффициент полюсного перекрытия.

Коэффициент

$$\delta_p = k_\delta \delta. \quad (5.51)$$

Для данного случая

$$\delta_p = 1,064 \cdot 0,6 = 0,6384 \text{ мм},$$

$$\alpha_i = 0,68 + \frac{4}{\frac{0,05899}{0,6384 \cdot 10^{-3}} + \frac{6}{1-0,68}} = 0,716.$$

Таким образом,

$$\lambda_\delta = \frac{0,6384 \cdot 0,716}{2,22 + 0,8 \cdot 0,6384} (0,25 + 0,75 \cdot 0,8) = 0,142.$$

Удельная проводимость лобового рассеяния

$$\lambda_l = \frac{0,34q(l_l - 0,64\beta\tau)}{l}, \quad (5.52)$$

$$\lambda_l = \frac{0,34 \cdot \frac{5}{4} (0,08246 - 0,64 \cdot 0,8 \cdot 0,0589)}{0,08} = 0,278.$$

Таким образом,

$$x_{\sigma} = 4 \cdot 3,14 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 50 \frac{180^2}{12 \cdot \frac{5}{4}} \times \\ \times [(1,487 + 0,142)0,08 + 0,287 \cdot 0,08246] = 0,261 \text{ Ом.}$$

34. Индуктивные сопротивления якоря по продольной x_{ad} и поперечной x_{aq} осям рассчитываем по следующим формулам:

$$x_{ad} = \frac{4\mu_0}{\pi r} mf(\omega_{\phi} k_0)^2 \Lambda_{ad}; \quad (5.53)$$

$$x_{aq} = \frac{4\mu_0}{\pi r} mf(\omega_{\phi} k_0)^2 \Lambda_{aq}, \quad (5.54)$$

где Λ_{ad} , Λ_{aq} — коэффициенты проводимости машины по продольной и поперечной осям соответственно.

Коэффициент проводимости машины по продольной оси

$$\Lambda_{ad} = k_b k_{ad} \frac{\Lambda_{\delta d} \Lambda_{nd}}{\Lambda_{\delta d} + \Lambda_{nd}}, \quad (5.55)$$

где k_b — коэффициент формы поля возбуждения (при типичном соотношении размеров индуктора и равномерном воздушном зазоре $k_b = 1,05 \dots 1,1$); k_{ad} — коэффициент реакции якоря по продольной оси; $\Lambda_{\delta d}$ — коэффициент магнитной проводимости воздушного зазора по продольной оси; Λ_{nd} — коэффициент магнитной проводимости полюса в продольном направлении.

Рассчитываем коэффициент реакции якоря по продольной оси:

$$k_{ad} = \frac{\alpha_p \pi + \sin(\alpha_p \pi)}{4 \sin(\alpha_p \pi / 2)}, \quad (5.56)$$

$$k_{ad} = \frac{0,68 \cdot 3,14 + \sin(0,68 \cdot 3,14)}{4 \cdot \sin(0,68 \cdot 3,14 / 2)} = 0,85.$$

Коэффициент магнитной проводимости воздушного зазора по продольной оси

$$\Lambda_{\delta d} = \frac{\tau l}{k_{\mu d} \delta_p}, \quad (5.57)$$

где $k_{\mu d}$ — коэффициент, учитывающий насыщение магнитной цепи машины по продольной оси ($k_{\mu d} = 1,1 \dots 1,3$).

Таким образом, коэффициент магнитной проводимости воздушного зазора по продольной оси

$$\Lambda_{\delta d} = \frac{0,0589 \cdot 0,08}{1,2 \cdot 0,6384 \cdot 10^{-3}} = 6,15.$$

Коэффициент магнитной проводимости полюса в продольном направлении

$$\Lambda_{nd} = \frac{\mu_{b_{nM}} h_M l_M}{h_M}, \quad (5.58)$$

где $\mu_{b_{nM}}$ — магнитная проницаемость возврата материала постоянного магнита, для магнита из материала $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ $\mu_{b_{nM}} = 1,23$; b_M , l_M , h_M — соответственно ширина, длина и высота магнита.

В данном случае $b_M = 0,04$ м; $h_M = 0,038$ м; $l_M = 0,08$ м.

Таким образом, коэффициент магнитной проводимости полюса в продольном направлении

$$\Lambda_{nd} = \frac{1,26 \cdot 0,04 \cdot 0,08}{0,038}.$$

Рассчитываем коэффициент проводимости машины по продольной оси:

$$\Lambda_{ad} = 1,11 \cdot 0,85 \frac{6,15 \cdot 0,106}{6,15 + 0,106} = 0,0983.$$

Проводимость машины по поперечной оси

$$\Lambda_{aq} = k_b k_{aq} \frac{\Lambda_{\delta q} \Lambda_{nq}}{\Lambda_{\delta q} + \Lambda_{nq}}, \quad (5.59)$$

где k_{aq} — коэффициент реакции якоря по поперечной оси; $\Lambda_{\delta q}$ — коэффициент магнитной проводимости воздушного зазора по поперечной оси; Λ_{nq} — коэффициент магнитной проводимости полюса в поперечном направлении.

Определяем коэффициент реакции якоря по продольной оси:

$$k_{aq} = \frac{\alpha_p \pi + \sin(\alpha_p \pi) + \frac{2}{3} \cos(\alpha_p \frac{\pi}{2})}{4 \sin(\alpha_p \pi / 2)}, \quad (5.60)$$

$$k_{aq} = \frac{0,68 \cdot 3,14 + \sin(0,68 \cdot 3,14) + \frac{2}{3} \cos(0,68 \cdot \frac{3,14}{2})}{4 \sin(0,68 \cdot 3,14 / 2)} = 0,46.$$

Коэффициент магнитной проводимости воздушного зазора по поперечной оси

$$\Lambda_{\delta q} = \frac{\tau l}{k_{\mu q} \delta_p}, \quad (5.61)$$

где $k_{\mu q}$ — коэффициент, учитывающий насыщение магнитной цепи машины по поперечной оси ($k_{\mu q} = 1,2 \dots 1,4$).

Таким образом, коэффициент магнитной проводимости воздушного зазора по поперечной оси

$$\Lambda_{\delta q} = \frac{0,0589 \cdot 0,08}{1,3 \cdot 0,6384 \cdot 10^{-3}} = 5,86.$$

Рассчитываем коэффициент магнитной проводимости полюса в продольном направлении:

$$\Lambda_{nq} = \frac{2\mu_{b_{nM}} h_M l_M}{h_M}, \quad (5.62)$$

$$\Lambda_{nq} = \frac{2 \cdot 1,26 \cdot 0,038 \cdot 0,08}{0,04} = 0,194.$$

Итак, коэффициент магнитной проводимости полюса в продольном направлении

$$\Lambda_{aq} = 1,11 \cdot 0,46 \frac{5,86 \cdot 0,194}{5,86 + 0,194} = 0,0958.$$

Находим индуктивные сопротивления якоря по продольной \mathcal{X}_{ad} и поперечной \mathcal{X}_{aq} осям:

$$x_{ad} = \frac{4 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7}}{3,14 \cdot 12} 3 \cdot 50 (180 \cdot 0,91)^2 0,0983 = 0,0527 \text{ Ом.}$$

$$x_{aq} = \frac{4 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7}}{3,14 \cdot 12} 3 \cdot 50 (180 \cdot 0,91)^2 0,0958 = 0,014 \text{ Ом.}$$

35. Определяем соответственно полные индуктивные сопротивления обмотки якоря по продольной и поперечной осям:

$$x_d = x_{ad} + x_{\sigma}, \quad (5.63)$$

$$x_d = 0,0527 + 0,261 = 0,313 \text{ Ом;}$$

$$x_q = x_{aq} + x_{\sigma}, \quad (5.64)$$

$$x_q = 0,0514 + 0,261 = 0,3124 \text{ Ом.}$$

5.4. Определение размеров ротора

В соответствии с действующим стандартом постоянные магниты на основе редкоземельных материалов выпускаются призматической формы. В связи с этим на практике и при проектировании широкое применение нашли сборные конструкции роторов (индукторов) синхронных генераторов с возбуждением от постоянных магнитов. В проектируемом синхронном генераторе применен ротор с призматическими магнитами типа «звездочка». В этом случае применяют магниты с радиальным намагничиванием.

Конструкция сборного ротора типа «звездочка» содержит намагниченные в радиальном направлении постоянные магниты, которые своими внутренними торцами примыкают к магнитомягкой втулке, закрепленной на валу генератора.

1. Воздушный зазор между статором и ротором δ принимаем равным 0,6 мм, т. е. $\delta = 0,6 \text{ мм}$.

2. Рассчитываем наружный диаметр ротора:

$$D_p = D - 2\delta, \quad (5.65)$$

$$D_p = 0,45 - 2 \cdot 0,0006 = 0,4488 \text{ м.}$$

3. Принимаем конструктивный коэффициент полюсного перекрытия $\alpha_p = 0,68$.

4. Определяем расчетный коэффициент полюсного перекрытия:

$$\alpha_i = \alpha_p + \frac{4}{\frac{\tau}{\delta_p} + \frac{6}{1 - \alpha_p}}, \quad (5.66)$$

$$\alpha_i = 0,68 + \frac{4}{\frac{0,0589}{0,6384 \cdot 10^{-3}} + \frac{6}{1 - 0,68}} = 0,716.$$

5. Рассчитываем ширину полюса:

$$b_M = \alpha_p \tau, \quad (5.67)$$

$$b_M = 0,68 \cdot 0,0589 = 0,04 \text{ м.}$$

6. Принимаем высоту полюса $h_M = 0,038$ м.

7. Определяем длину полюса равной длине статора, т. е.

$$l_M = l = 0,08 \text{ м.}$$

Эскиз магнитной системы генератора приведен на рис. 5.7.

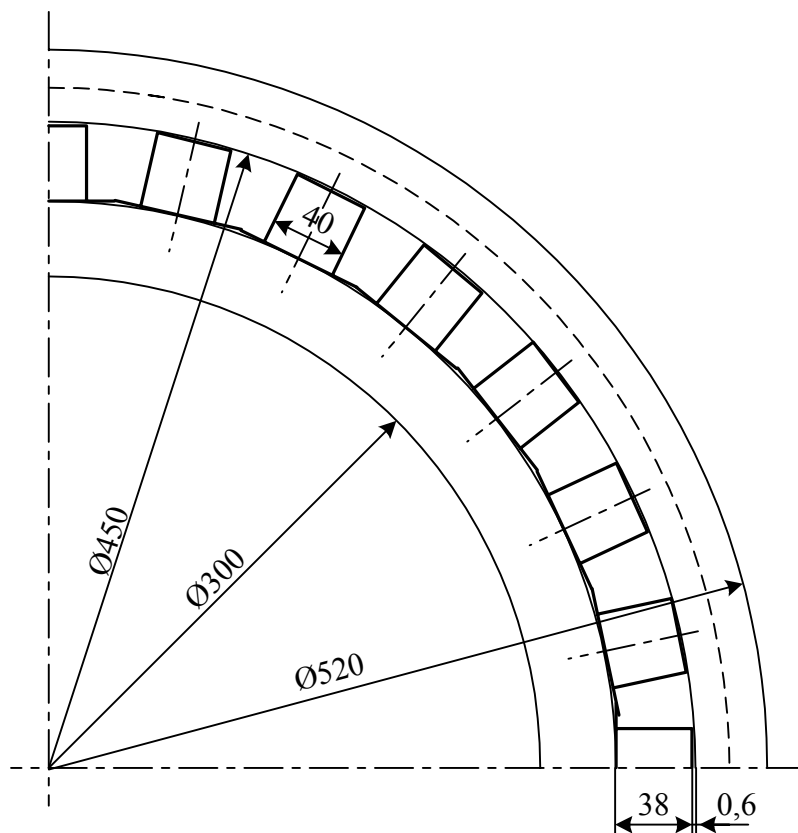


Рис. 5.7. Магнитная схема синхронного генератора

5.5. Расчет проводимостей рассеяния индуктора

Используемые в расчетах дополнительные геометрические размеры индуктора показаны на рис. 5.8.

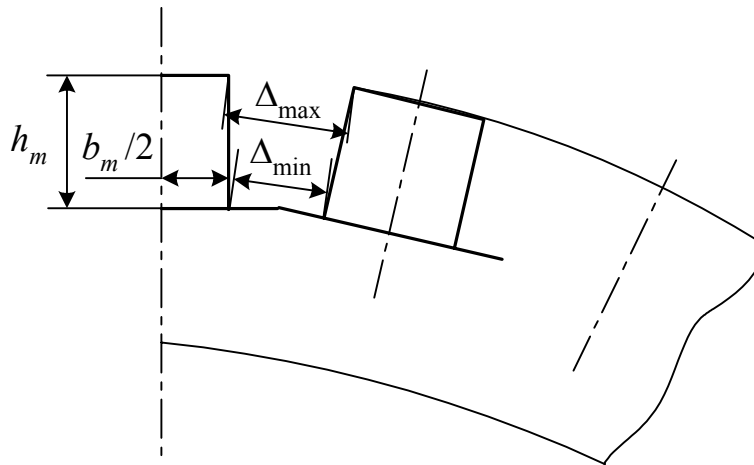


Рис. 5.8. К определению проводимостей рассеяния индуктора типа «сборная звездочка»

Проводимость рассеяния магнита рассчитывается по формуле

$$A_{SM} = K_{\lambda} A_{\Sigma M}, \quad (5.68)$$

где K_{λ} — коэффициент ослабления потока рассеяния; $A_{\Sigma M}$ — проводимость рассеяния.

Проводимость рассеяния

$$A_{\Sigma M} = \left(5 \ell_m \frac{h_m}{\Delta_{\max}} \varphi_{\alpha} + 1,6 h_v \varphi_{\beta} \right) 10^{-6}, \quad (5.69)$$

где

$$\varphi_{\alpha} = \frac{\Delta_{\max}}{\Delta_{\max} - \Delta_{\min}} \left[1 - \frac{\Delta_{\min}}{\Delta_{\max} - \Delta_{\min}} \ln \left(\frac{\Delta_{\max}}{\Delta_{\min}} \right) \right], \quad (5.70)$$

$$\varphi_{\alpha} = \frac{0,021}{0,021 - 0,009} \left[1 - \frac{0,009}{0,021 - 0,009} \ln \left(\frac{0,021}{0,009} \right) \right] = 0,634,$$

Δ_{\max} и Δ_{\min} принимаем соответственно равными 21 мм и 9 мм, т. е. $\Delta_{\max} = 21$ мм, $\Delta_{\min} = 9$ мм (см. рис. 5.8);

$$\varphi_{\beta} = \frac{\pi b_m}{2\Delta_{\max}} + \ln\left(1 + \frac{\pi b_m}{2\Delta_{\max}}\right) - \left(\frac{\pi b_m}{2\Delta_{\max}}\right)^2 \ln\left(1 + \frac{2\Delta_{\max}}{\pi b_m}\right), \quad (5.71)$$

$$\begin{aligned} \varphi_{\beta} &= \frac{3,14 \cdot 0,04}{2 \cdot 0,021} + \ln\left(1 - \frac{3,14 \cdot 0,04}{2 \cdot 0,021}\right) - \\ &- \left(\frac{3,14 \cdot 0,04}{2 \cdot 0,021}\right)^2 \ln\left(1 - \frac{2 \cdot 0,021}{3,14 \cdot 0,04}\right) = 1,78. \end{aligned}$$

Таким образом,

$$\begin{aligned} \Lambda_{\varepsilon M} &= \left(5 \cdot 0,08 \frac{0,08}{0,021} 0,634 + 1,6 \cdot 0,038 \cdot 1,78\right) 10^{-6} = \\ &= 0,5671 \cdot 10^{-7}. \end{aligned}$$

Значение коэффициента k_{λ} зависит от конфигурации межполюсного пространства, коэффициента магнитной проницаемости магнита и определяется по графикам, приведенным в работе [9], в зависимости от отношения $\Delta_{\min} / \Delta_{\max}$ и величины ξ ,

$$\Delta_{\min} / \Delta_{\max} = 9 / 21 = 0,428;$$

$$\xi = \sqrt{\frac{h_m \Lambda_{\varepsilon M}}{\rho_b \ell_m b_m}}, \quad (5.72)$$

$$\xi = \sqrt{\frac{0,038 \cdot 5,671 \cdot 10^{-6}}{1,586 \cdot 10^{-6} \cdot 0,08 \cdot 0,04}} = 6,92;$$

$$S_b \cong \frac{B_R}{H_C} = \frac{1,23}{880 \cdot 10^3} = 1,4 \cdot 10^{-3} \quad (\text{для Nd}_{15}\text{Fe}_{11}\text{B}_8);$$

$$k_{\lambda} = 0,15;$$

$$\Lambda_{SM} = 0,15 \cdot 0,5671 \cdot 10^{-6}.$$

5.6. Расчет магнитной цепи и построение рабочей диаграммы магнитов

1. Рассчитываем МДС воздушного зазора:

$$F_{\delta 0} = 0,8 B_{\delta 0} \delta_p 10^6, \quad (5.73)$$

$$F_{\delta 0} = 0,8 \cdot 1,18 \cdot 0,6384 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6 = 603 \text{ А};$$

$$B_{\delta 0} = \frac{\Phi_{\delta 0}}{\ell \tau \alpha_i}, \quad (5.74)$$

$$B_{\delta 0} = \frac{0,00399}{0,08 \cdot 0,0589 \cdot 0,716} = 1,18 \text{ Тл};$$

$$\Phi_{\delta 0} = \frac{E_0}{4k_b k_0 f \omega_\phi}, \quad (5.75)$$

$$\Phi_{\delta 0} = \frac{150}{4 \cdot 1,11 \cdot 0,91 \cdot 240 \cdot 50} = 0,00309 \text{ Вб}.$$

2. Расчетная индукция в зубцах

$$B_{z0} = \frac{B_{\delta 0} t_z}{b_z k_{zc}}. \quad (5.76)$$

Здесь b_z — расчетная ширина зубца, определяемая при трапецеидальной его форме,

$$b_z = \frac{\pi(D + 2h_n)/Z - b_n + 2b_{z \min}}{3}, \quad (5.77)$$

где $b_{z \min}$ — минимальная ширина зубьев,

$$b_{z \min} = \frac{\pi(D + 2h_k)}{Z} - b_n, \quad (5.78)$$

$$b_{z \min} = \frac{3,14(0,45 + 2 \cdot 0,0015)}{90} - 5,3 \cdot 10^{-3} = 0,0105 \text{ м}.$$

Таким образом,

$$b_z = \frac{\frac{3,14(0,45 + 2 \cdot 0,0181)}{90} - 0,0053 + 2 \cdot 0,0105}{3} = 0,0109 \text{ м};$$

$$b_{za} = \frac{1,18 \cdot 0,0157}{0,0109 \cdot 0,95} = 1,79 \text{ Тл.}$$

3. Напряженность поля в зубце определяем по кривой намагничивания стали 1411: $H_z = 17100 \text{ А/м.}$

4. Рассчитываем МДС, необходимую для проведения потока через зубцовую зону:

$$H_{z0} = h_n H_z, \quad (5.79)$$

$$H_{z0} = 0,0101 \cdot 17100 = 309,5 \text{ А.}$$

5. Находим расчетную индукцию в спинке якоря:

$$B_{d0} = \frac{\Phi_{\delta 0}}{2\ell h_d k_{zc}}, \quad (5.80)$$

$$B_{d0} = \frac{0,00399}{2 \cdot 0,08 \cdot 0,0169 \cdot 0,95} = 1,55 \text{ Тл.}$$

6. Напряженность поля в спинке якоря определяем по кривой намагничивания стали 1411: $H_d = 4420 \text{ А/м.}$

7. МДС, затрачиваемая на проведение потока через стенку якоря:

$$F_{da} = L_a H_a, \quad (5.81)$$

где L_a — средняя длина силовой линии в спинке якоря,

$$L_a = \frac{\pi(D + 2h_n + 2h_a)}{2p}, \quad (5.82)$$

$$L_a = \frac{3,14(0,45 + 2 \cdot 0,0181 + 0,0169)}{24} = 0,0658 \text{ м.}$$

Таким образом,

$$F_{da} = 0,0853 \cdot 4420 = 290,8 \text{ А.}$$

8. Рассчитываем суммарную МДС на пару полюсов, необходимую для проведения потока через магнитную цепь якоря:

$$F_{ha} = 2F_{\delta a} + 2F_{za} + F_{da}, \quad (5.83)$$

$$F_{ha} = 2 \cdot 603 + 2 \cdot 309,5 \cdot 290,8 = 2115,8 \text{ А.}$$

9. Индукция в теле ротора

$$B_{dp} = \frac{\Phi_{\sigma 0} \sigma}{2S_{ap}}, \quad (5.84)$$

где S_{ap} — сечение спинки ротора; σ — коэффициент рассеяния магнита.

Сечение спинки ротора

$$S_{ap} = h_{ap} l_{ap}, \quad (5.85)$$

где l_{ap} — длина спинки ротора, $l_{ap} = l = 0,08$ м; h_{ap} — высота спинки ротора.

Высота спинки ротора

$$h_{ap} = (D_p - 2h_m - d_b)/2, \quad (5.86)$$

где d_b — внутренний диаметр расточки спинки ротора, $d_b = 0,3$ м.

Производим расчет высоты и сечения спинки ротора:

$$h_{ap} = (0,4488 - 2 \cdot 0,38 - 0,31)/2 = 0,0314 \text{ м;}$$

$$S_{ap} = 0,0314 \cdot 0,08 = 0,002512 \text{ м}^2.$$

Коэффициент рассеяния магнита

$$\sigma = 1 + \frac{\Phi_{sm}}{\Phi_{\delta 0}}, \quad (5.87)$$

где Φ_{sm} — порядок рассеяния магнита,

$$\Phi_{sm} = 0,5 F_{10} A_{sm}. \quad (5.88)$$

Итак,

$$\Phi_{sm} = 0,5 \cdot 2115,8 \cdot 0,85 \cdot 10^{-6} = 0,0000399 \text{ Вб;}$$

$$\sigma = 1 + \frac{0,0000899}{0,00399} = 1,03;$$

$$B_{dp} = \frac{0,00399 \cdot 1,03}{2 \cdot 0,002512} = 0,818 \text{ Тл.}$$

10. Напряженность магнитного поля в спинке ротора определяем по кривой намагничивания стали 1411: $H_{ap} = 137$ А/м.

11. МДС, затрачиваемая на проведение потока через спинку ротора:

$$F_{ap} = H_{ap} L_{ap}, \quad (5.89)$$

где L_{ap} — средняя длина силовой линии в спинке ротора.

Рассчитываем среднюю длину силовой линии в спинке ротора:

$$L_{ap} = \frac{\pi (D_p - 2h_m - h_{ap})}{2p}, \quad (5.90)$$

$$L_{ap} = \frac{3,14(0,4488 - 2 \cdot 0,038 - 0,0314)}{24} = 0,0448 \text{ м.}$$

Таким образом,

$$F_{ap} = 137 \cdot 0,0448 = 6,14 \text{ А.}$$

12. Рассчитываем индукцию в стыке магнита:

$$B_{ст.м} = \frac{\Phi_{\sigma a} \sigma}{b_m l_m}, \quad (5.91)$$

$$B_{ст.м} = \frac{1,03 \cdot 0,00399}{0,041 \cdot 0,08} = 1,284 \text{ Тл.}$$

13. Падение МДС в стыках магнита на один полюс

$$F_{ст.м} = 1,6 \cdot B_{ст.м} \cdot \delta_{ст.м} \cdot 10^6, \quad (5.92)$$

где $\delta_{ст.м}$ — расчетный размер стыков магнитов с магнитопроводящей втулкой, $\delta_{ст.м} = 5 \cdot 10^{-5}$ м.

Тогда

$$F_{ст.м} = 1,6 \cdot 1,284 \cdot 10^{-5} \cdot 5 \cdot 10^6 = 102,7 \text{ А.}$$

14. Находим МДС магнита на пару полюсов:

$$F_{ма} = F_{10} + 2F_{ст.м} + F_{ap}, \quad (5.93)$$

$$F_{ма} = 2115,8 + 2 \cdot 102,7 + 6,14 = 2327,34 \text{ А.}$$

На основании данных, полученных при расчете магнитной цепи машины, строим рабочую диаграмму магнита (рис. 5.9).

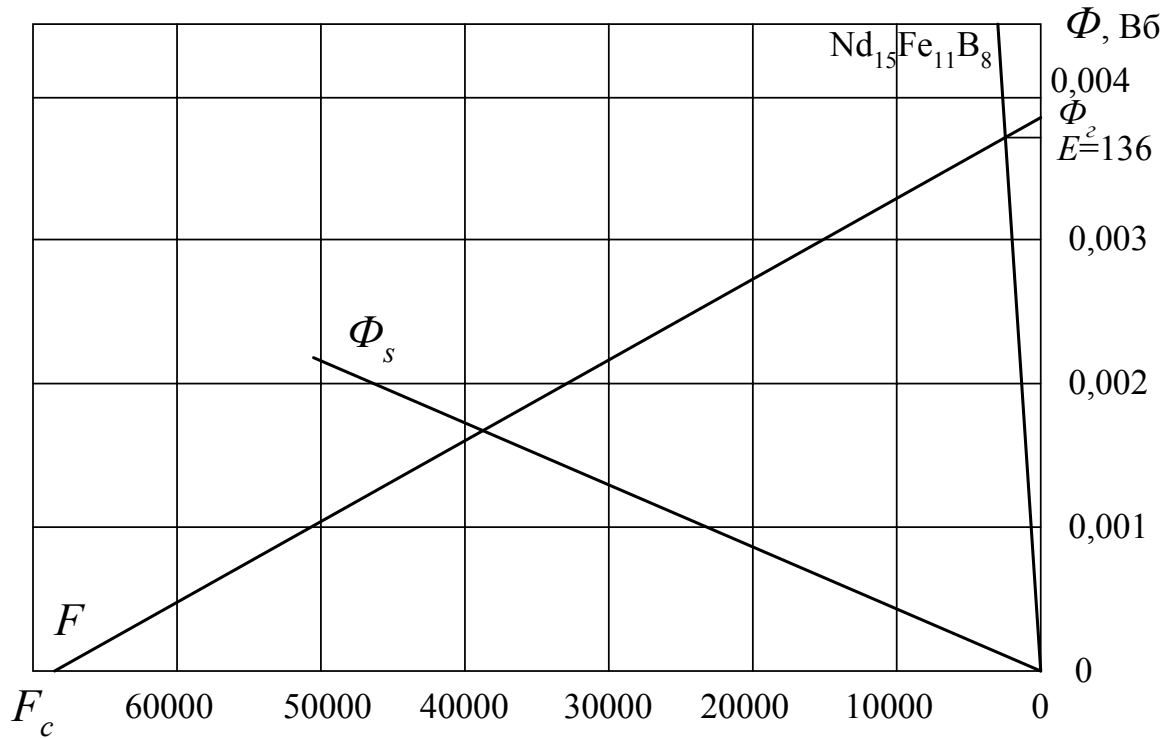


Рис. 5.9. Рабочая диаграмма магнита

В случае применения магнитов из редкоземельных материалов и кобальта кривая размагничивания совпадает с прямой возврата. Её получают по двум точкам: остаточному потоку Φ_r и коэрцитивной МДС F_c .

Для конструкции индуктора типа «сборная звёздочка»

$$\Phi_r = B_r S_M = B_r b_M l_M, \quad (5.94)$$

где B_r — остаточная индукция в материале магнита.

Для сплава $\text{Nd}_{15}\text{Fe}_{11}\text{B}_8$ $B_r = 1,23$ Тл, тогда

$$\Phi_r = 1,23 \cdot 0,08 \cdot 0,04 = 0,003936 \text{ Вб},$$

Коэрцитивная МДС

$$F_c = 2h_M H_c, \quad (5.95)$$

где H_c — коэрцитивная сила, для сплава $\text{Nd}_{15}\text{Fe}_{11}\text{B}_8$ $H_c = 880$ кА/м.

Таким образом,

$$F_c = 2 \cdot 0,038 \cdot 880 \cdot 10^3 = 66880 \text{ А}.$$

Кривая размагничивания $\Phi_r - F_c$ повторяет в определенных масштабах кривую размагничивания материала магнита $B_r - H_c$.

Далее на диаграмме строим прямую суммарного рассеяния $\Phi_s = 0,5 F \Lambda_{SM}$. Вычитая графически эту характеристику из прямой раз-

магничивания, получаем линию $\Phi_r - M$ продольного (полезного) потока Φ_d .

Магнитная характеристика при холостом ходе $\Phi_{ma} = f(F_{ma})$ определяется характеристикой внешней магнитной цепи и при отсутствии насыщения в стальных участках магнитопровода имеет вид прямой линии.

Поток магнита

$$\Phi_{ma} = \Phi_{\delta a} + \Phi_{sm}, \quad (5.96)$$

где Φ_{sm} — поток рассеяния магнита,

$$\Phi_{sm} = 0,5 F_{10} A_{sm}, \quad (5.97)$$

Таким образом,

$$\Phi_{sm} = 0,5 \cdot 2115,8 \cdot 0,085 \cdot 10^{-6} = 0,0000899 \text{ Вб};$$

$$\Phi_{ma} = 0,00399 + 0,0000899 = 0,00408 \text{ Вб}.$$

Рабочая диаграмма магнита из редкоземельных материалов приведена на рис. 5.9.

5.7. Определение массы активных материалов, потерь и КПД генератора

1. Рассчитываем массу меди обмотки якоря:

$$M_{0d} = m \omega_{\phi} \ell_{cp} q_a \gamma_M, \quad (5.98)$$

$$M_{0d} = 3 \cdot 380 \cdot 0,325 \cdot 4,471 \cdot 7,8 \cdot 10^3 \cdot 10^{-6} = 6,12 \text{ кг}.$$

2. Определяем массу зубцов якоря:

$$M_z = \left\{ \frac{\pi}{4} [(D + 2h_n)^2 - D^2] - Z b_n h_n \right\} \ell k_{zc} \gamma_{cm}, \quad (5.99)$$

$$M_z = \left\{ \frac{3,14}{4} [(0,45 + 2 \cdot 0,0181)^2 - 0,45^2] - 90 \cdot 5,3 \cdot 18,1 \cdot 10^{-6} \right\} \times \\ \times 0,08 \cdot 0,95 \cdot 8 \cdot 10^3 = 10,9 \text{ кг}.$$

3. Находим массу спинки якоря:

$$M_{a_1} = \pi (D + 2h_n + h_a) h_a \ell k_{zc} \gamma_{cm}, \quad (5.100)$$

$$M_{a_1} = 3,14(0,45 + 2 \cdot 0,0181 + 0,0169) \times \\ \times 0,0169 \cdot 0,08 \cdot 0,95 \cdot 8 \cdot 10^3 = 16,2 \text{ кг.}$$

4. Рассчитываем массу активных материалов статора:

$$M_1 = M_{0d} + M_z + M_{a_1}, \quad (5.101)$$

$$M_1 = 6,12 + 10,9 + 16,2 = 33,22 \text{ кг.}$$

5. Определяем массу постоянных магнитов:

$$M_{nM} = 2\rho b_M h_M \ell_M \gamma_{nM}, \quad (5.102)$$

$$M_{nM} = 24 \cdot 0,04 \cdot 0,038 \cdot 0,08 \cdot 8,4 \cdot 10^3 = 24,5 \text{ кг.}$$

6. Находим массу ярма индуктора:

$$M_{a_2} = \frac{\pi}{4} [(D_{a_2} + 2h_{ap})^2 - D_{a_2}^2] \ell k_{am} \gamma_{cm}, \quad (5.103)$$

$$M_{a_2} = \frac{3,14}{4} [(0,31 + 2 \cdot 0,0314)^2 - 0,31^2] 0,08 \cdot 1,2 \cdot 8 \cdot 10^3 = 25,9 \text{ кг.}$$

7. Рассчитываем массу активных материалов ротора:

$$M_2 = M_{nm} + M_{a_2}, \quad (5.104)$$

$$M_2 = 24,5 + 25,9 = 50,4 \text{ кг.}$$

8. Находим массу активных материалов генератора:

$$M_{am} = M_1 + M_2, \quad (5.105)$$

$$M_{am} = 33,2 + 50,4 = 83,6 \text{ кг.}$$

9. Вычисляем полную массу генератора:

$$M_\Gamma = K_{КОП} \cdot M_{am}, \quad (5.106)$$

где $K_{КОП} = 1,5 \dots 1,7$.

$$M_\Gamma = K_{КОП} \cdot M_{am} = 1,7 \cdot 83,6 = 142,2 \text{ кг.}$$

10. Рассчитываем потери в меди якоря:

$$P_M = m \cdot I_{нф}^2 \cdot K_a, \quad (5.107)$$

$$P_M = 3 \cdot 23,4^2 \cdot 0,28 = 460 \text{ Вт.}$$

11. Определяем потери в стали зубцов якоря:

$$P_z = p_0 k_{Tz} B_z^2 (f/50)^{1,5} M_z, \quad (5.108)$$

где $k_{Tz} = 2 \dots 2,2$.

$$P_z = 2 \cdot 2,1 \cdot 1,79^2 (50/50)^{1,5} 10,9 = 146,7 \text{ Вт.}$$

12. Находим потери в стали ярма якоря:

$$P_d = p_0 k_{Td} B_d^2 (f/50)^{1,5} M_{a1}, \quad (5.109)$$

где $k_{Td} = 1,4 \dots 1,6$.

$$P_d = 2 \cdot 1,5 \cdot 1,55^2 (50/50)^{1,5} 16,2 = 116,8 \text{ Вт.}$$

13. Рассчитываем механические потери:

$$\begin{aligned} P_{\text{мех}} &= 0,02 S_N \cos \varphi = 0,02 P_h, \\ P_{\text{мех}} &= 0,02 \cdot 5000 \cdot 0,8 = 80 \text{ Вт.} \end{aligned} \quad (5.110)$$

14. Определяем добавочные потери:

$$\begin{aligned} P_{\text{доб}} &= 0,01 S_N \cos \varphi = 0,01 P_h, \\ P_{\text{доб}} &= 0,02 \cdot 5000 \cdot 0,8 = 40 \text{ Вт.} \end{aligned} \quad (5.111)$$

15. Находим суммарные потери:

$$\begin{aligned} \Sigma P &= P_m + P_z + P_d + P_{\text{мех}} + P_{\text{доб}}, \\ \Sigma P &= 460 + 146,7 + 116,8 + 80 + 40 = 843,5 \text{ Вт.} \end{aligned} \quad (5.112)$$

16. Вычисляем КПД генератора:

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{S_N \cos \varphi}{S_N \cos \varphi + \Sigma P}, \\ \eta &= \frac{5000}{5000 + 843,5} = 0,856. \end{aligned} \quad (5.113)$$

5.8. Расчет характеристик трехфазного генератора

1. Исходными данными для расчета характеристик генератора являются:

- кривая размагничивания материала магнита или магнитная характеристика магнита;
- E — ЭДС холостого хода;
- x_d — синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси;

- x_q — синхронное индуктивное сопротивление по поперечной оси;
- R_d — активное сопротивление обмоток статора;
- $R_d = R_n + jx_n$ — комплекс сопротивления нагрузки.

2. В результате расчета требуется определить:

$$\begin{aligned} U &= f(I_n); & E &= f(I_n); & I_d &= f(I_n); \\ I_q &= f(I_n); & I_n &= f(Z_n); & M &= f(P_2); \\ P_1 &= f(P_2); & \eta &= f(P_2). \end{aligned}$$

3. Исходя из векторной диаграммы (рис. 5.10) напомним следующие соотношения:

$$U_d = x_q I_q - R_a I_d; \quad (5.114)$$

$$U_d = E_0 - x_d I_d - R_a I_q; \quad (5.115)$$

$$I_d = I_n \sin \psi; \quad (5.116)$$

$$I_q = I_n \cos \psi. \quad (5.117)$$

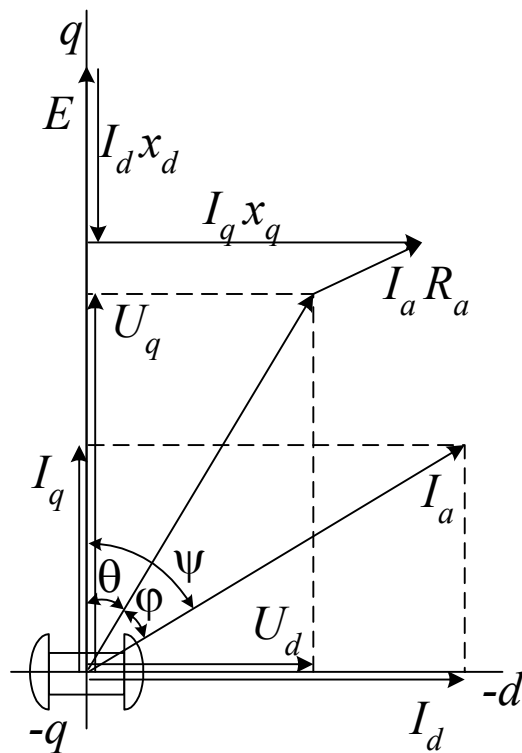


Рис. 5.10. Векторная диаграмма синхронного генератора

Фазная ЭДС при трехфазном включении

$$E_{03\phi} = 4,44 \Phi W_{3\phi} f K_{обм}. \quad (5.118)$$

Фазная ЭДС при однофазном включении

$$E_{01\phi} = \sqrt{3} (4,44 \Phi W_{3\phi} f K_{обм}), \quad (5.119)$$

где $W_{3\phi}$ — число витков в фазной обмотке при трехфазном включении; $W_{1\phi}$ — число витков в фазной обмотке при однофазном включении,

$$W_{1\phi} = 2 W_{3\phi}.$$

Отсюда

$$E_{01\phi} = (4,44 \Phi W_{1\phi} f K_{обм}) \frac{\sqrt{3}}{2}.$$

Составляем уравнения для определения токов I_d и I_q :

$$\dot{U} = U_q - jU_d; \quad (5.120)$$

$$\dot{I}_n = I_q - jI_d; \quad (5.121)$$

$$Z_n = R_n + jx_n; \quad x_n = \omega L_n; \quad (5.122)$$

$$\dot{I}_n = \dot{U} / Z_n. \quad (5.123)$$

Подставляя в (5.123) выражения (5.121) и (5.122) с учетом (5.120), получаем

$$\dot{U} = U_q - jU_d = (I_q - jI_d)(R_n - jx_n). \quad (5.124)$$

Из (5.124) имеем

$$U_q = (R_n I_q + x_n I_d) + j(x_n I_q - R_n I_d),$$

или

$$\begin{cases} U_q = R_n I_q + x_n I_d \\ U_d = -x_n I_q + R_n I_d \end{cases}. \quad (5.125)$$

Приравнявая систему (5.125) к (5.114), (5.115), получаем систему уравнений для определения I_d и I_q :

$$E = (R_n + R_a)I_q + (x_d + x_n)I_d; \quad (5.126)$$

$$0 = -(x_n + x_q)I_q + (R_n + R_a)I_d. \quad (5.127)$$

Запишем главный определитель системы, полученной из уравнений (5.126), (5.127):

$$\Delta = (R_n + R_a)^2 + (x_n + x_q)(x_n + x_d). \quad (5.128)$$

Находим переменные системы:

$$I_q = \frac{E(R_n + R_a)}{\Delta}; \quad (5.129)$$

$$I_d = \frac{E(x_n + x_q)}{\Delta}; \quad (5.130)$$

$$|I_n| = \sqrt{I_d^2 + I_q^2}; \quad (5.131)$$

$$|U| = \sqrt{U_d^2 + U_q^2}. \quad (5.132)$$

Величина ЭДС E не является постоянной и варьирует с изменением МДС продольной реакции якоря. При учете изменения ЭДС E_0 от действия продольной реакции якоря выражение (5.130) может быть записано в виде

$$I_d = \frac{E(I_d) \cdot (x_n + x_q)}{\Delta}. \quad (5.133)$$

После определения I_d находим I_q по полученной величине E .
Для однофазных генераторов [11]

$$F_d = F(K_F, I_d) = F\left(\frac{\sqrt{3}\sqrt{2}I_d W_{3\phi} K_{обм}}{\pi P}\right). \quad (5.134)$$

Для трехфазных генераторов и для контроля

$$F_d(I_d) = F\left(3 \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{I_d W_{3\phi}}{P} K_{обм}\right). \quad (5.135)$$

Влиянием поперечной реакции якоря на постоянные магниты пренебрегаем ввиду недостаточной изученности данного вопроса.

Для расчетов по уравнению (5.133) необходимо иметь функцию $E = E(I_d)$, которая получается из рабочей диаграммы постоянных магнитов (рис. 5.11).

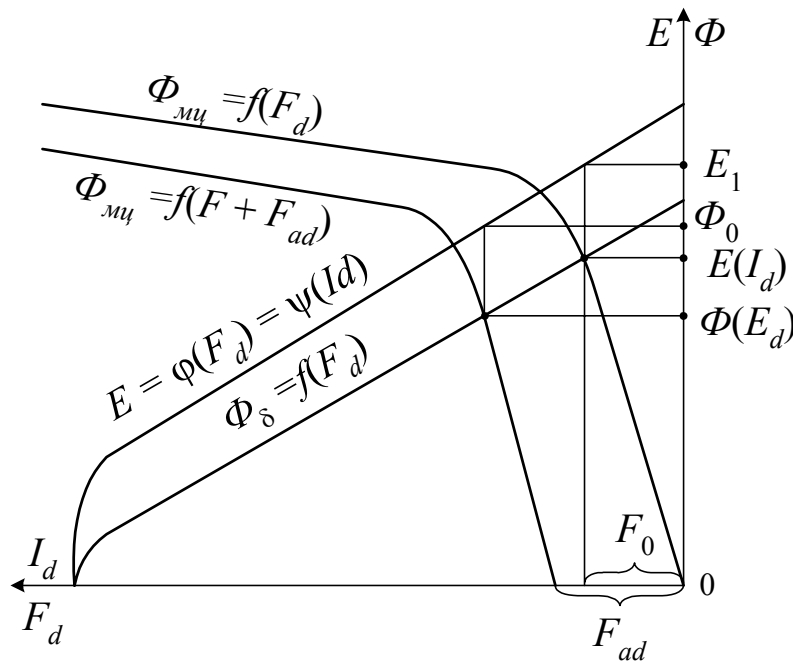


Рис. 5.11. К определению функции $E = f(F_d) = \psi(I_d)$

Из рабочей диаграммы (см. рис. 5.11) определяем функцию $E = f(F_d)$ в следующем порядке. Для каждого значения потока Φ по характеристике магнита определяем величину ЭДС (5.118) и для каждого значения МДС F — значение потока по продольной оси F_d . По полученным точкам строим кривую $E = f(I_d)$, принимая за начало координат точку F_0 .

При построении графика $E = E(I_d)$ удобно строить функцию $E = E(I_d)$ в первом квадранте (рис. 5.12).

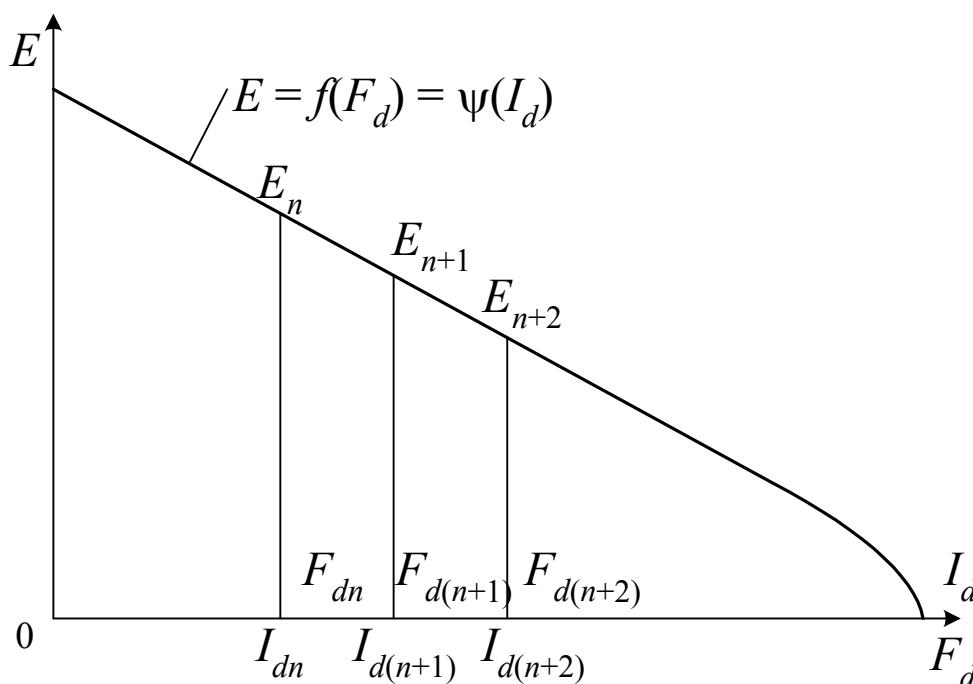


Рис. 5.12. Зависимость $E = \psi(I_d)$ для расчета характеристик генератора

4. Энергетический баланс синхронного генератора описываем следующей системой уравнений:

$$P_1 = P_2 + P_{m2} + P_{мех} + P_{ст} + P_{доб}; \quad (5.136)$$

$$P_{эм} = P_2 + P_{m2}, \quad P_{m2} = 3I^2 R_1, \quad (5.137)$$

где P_1 — подводимая механическая мощность; P_2 — полезная мощность; P_{m2} — потери в обмотке статора; $P_{мех}$ — механические потери; $P_{ст}$ — добавочные потери; $P_{доб}$ — электромагнитная мощность.

Определяем электромагнитную мощность:

- для трехфазного генератора

$$P_{эм3} = 3(U_d I_d + U_q I_q) + P_{m2}; \quad (5.138)$$

- для однофазного генератора

$$P_{эм1} = U_d I_d + U_q I_q + P_{м2}. \quad (5.139)$$

Находим КПД по формуле

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_{эм} - P_{м2}}{P_{эм} + P_{мех} + P_{см} + P_{доб}}. \quad (5.140)$$

5. Расчёт электромагнитного момента производим по формуле

$$M_{эм} = \frac{P_{эм}}{\Omega} = \frac{60 P_{эм}}{2\pi n} = \frac{60}{2\pi n_1} [3(U_d I_d + U_q I_q) + 3I^2 R_a], \quad (5.141)$$

а тангенса угла между проекциями напряжения на оси d и q — по формуле

$$tg\Theta = U_d / U_q. \quad (5.142)$$

6. Формулы для расчёта характеристик генератора.

6.1. Для расчёта задаются следующие величины:

$$x_d; \quad x_q; \quad R_d; \quad E = f(I_d); \quad E = \varphi(F_d); \\ Z_h; \quad P_{мех}; \quad P_{см}; \quad P_{доб}; \quad \Omega_1(n_1).$$

6.2. В процессе расчёта определяем такие характеристики:

$$U_h = f(I_h); \quad M = f(I_h); \quad P_1 = f(P_2); \\ \eta = f(P_2); \quad M = f(P_2).$$

6.3. В процессе расчёта характеристик используем следующие формулы:

$$I_d = \frac{E(I_d) \cdot (x_h + x_q)}{\Delta}; \\ I_d = \frac{E(I_d) \cdot (R_h + R_a)}{\Delta}; \\ \Delta = (R_h + R_a)^2 + (x_h + x_q)(x_h + x_d); \\ I_h = \sqrt{I_d^2 + I_q^2}; \\ \dot{I}_h = I_q - jI_d; \\ U_d = x_q I_q - R_a I_d; \\ U_q = E(I_d) - x_d I_d - R_a I_q; \\ U = \sqrt{U_d^2 + U_q^2}; \\ \dot{U} = U_q - jU_d;$$

$$F_d(I_d) = F_d(K_F I_d) = F\left(\frac{\sqrt{3}\sqrt{2}I_d W_{3\phi} K_{обм}}{\pi p}\right).$$

Выражение (5.134) для однофазного генератора имеет вид

$$F_d(I_d) = F(K_F, I_d) = f\left(3 \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{I_d W_{3\phi}}{P} K_{обм}\right).$$

Слагаемые выражения (5.136) распишем так:

$$\begin{aligned} P_2 &= 3(U_d I_d + U_q I_q) && \text{— для трёхфазного генератора} \\ P_2 &= U_d I_d + U_q I_q && \text{— для однофазного генератора} \\ P_{м2} &= 3I^2 R_a && \text{— для трёхфазного генератора} \\ P_{м2} &= I^2 R_{a1\phi} && \text{— для однофазного генератора} \\ P_{эм} &= 3(U_d I_d + U_q I_q) + P_{м2\ 3\phi} && \text{— для трёхфазного генератора} \\ P_{эм} &= U_d I_d + U_q I_q + P_{м2\ 1\phi} && \text{— для однофазного генератора} \end{aligned}$$

$$P_{мех} = 80 \text{ Вт};$$

$$P_{см} = 263,5 \text{ Вт};$$

$$P_{доб} = 40 \text{ Вт};$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_{эм} - P_{м2}}{P_{эм} + P_{мех} + P_{см} + P_{доб}};$$

$$M = \frac{60 P_{эм}}{2\pi n_1};$$

$$\Theta = \arctg(U_d / U_q).$$

7. Расчёт характеристик генератора при трёхфазном включении.

7.1. Расчёт можно проводить в двух вариантах. Первый вариант, когда функцию $E = f(I_d)$ можно с достаточной степенью точности аппроксимировать прямой линией. Это наиболее подходит к магнитам на основе неодим-железо-бора и несколько меньше подходит для самарий-кобальтовых магнитов.

Второй вариант, когда функцию $E = f(I_d)$ необходимо аппроксимировать кривой линией, что подходит для магнитов из материалов, отличных от указанных выше.

При расчёте по первому варианту уравнение (5.133) можно преобразовать к следующему виду:

$$I_d \frac{\Delta}{x_n + x_q} = E(I_d), \quad (5.143)$$

или

$$I_d \left[\frac{(R_n + R_q)^2}{x_n + x_q} + (x_d + x_n) \right] = E(I_d). \quad (5.144)$$

Функцию $E(I_d)$ можно представить в виде

$$E(I_d) = AI_d + B. \quad (5.145)$$

Вводя обозначение

$$\left[\frac{(R_n + R_q)^2}{x_n + x_q} + (x_d + x_n) \right] = C,$$

уравнение (5.144) приводим к следующему простому виду:

$$F_d = \frac{AI_d + B}{C}, \quad (5.146)$$

откуда

$$I_d C = AI_d + B, \quad (5.147)$$

$$I_d = \frac{B}{C - A}.$$

При расчёте по второму варианту функцию $E = E(I_d)$ можно представить графически или аппроксимировать аналитически. Уравнение (5.144) можно представить в таком виде:

$$I_d C = E(I_d); \quad (5.148)$$

$$I_d C = U';$$

$$E(I_d) = U''. \quad (5.149)$$

Функция (5.148) будет прямой, проходящей через начало координат, а функция (5.149) будет иметь нелинейный вид для проектируемой машины (рис. 5.13).

Уравнение (5.148) можно решать методом перебора или итераций. После определения величины I_d для данного сопротивления Z нагрузок находим величину $E(I_d)$ по формуле аппроксимации или по графику и остальные требуемые величины по выражениям п. 6.3.

В данном случае применяем материал магнита неодим-железо-бор. Поэтому расчётное уравнение (5.143) в развёрнутой форме можно написать как

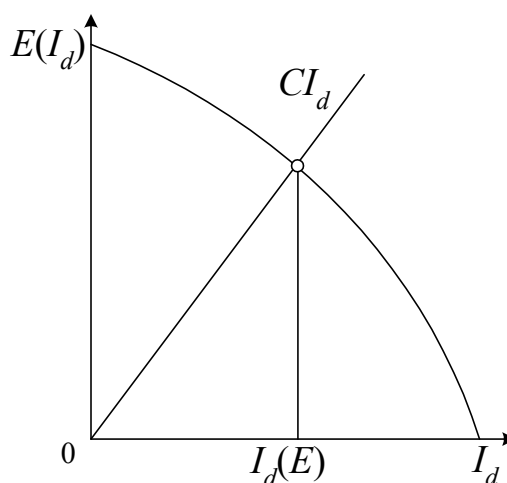


Рис. 5.13. К расчету тока I_d при нелинейной функции $E = E(I_d)$

$$I_d = \frac{B}{\frac{(R_n + R_q)^2}{x_n + x_q} + (x_n + x_q) - A}. \quad (5.150)$$

Ток короткого замыкания по продольной оси определяем из (5.150) при $R_n = x_n = 0$:

$$I_{dk3} = \frac{B}{\frac{R_a^2}{x_q} + x_d - A}. \quad (5.151)$$

Остальные величины характеристик генератора определяются по соотношениям, данным в п. 6.

Для использования формул (5.150), (5.151) необходимо определить коэффициенты B и A , что делается путём перестройки магнитных характеристик генератора по рабочей диаграмме (см. рис. 5.9).

Первоначально по оси абсцисс рабочей диаграммы откладываем величину тока I_d , определяемую по формуле для трёхфазного генератора:

$$I_d = \frac{\pi p}{3\sqrt{2}W_f K_{об}} F_d. \quad (5.152)$$

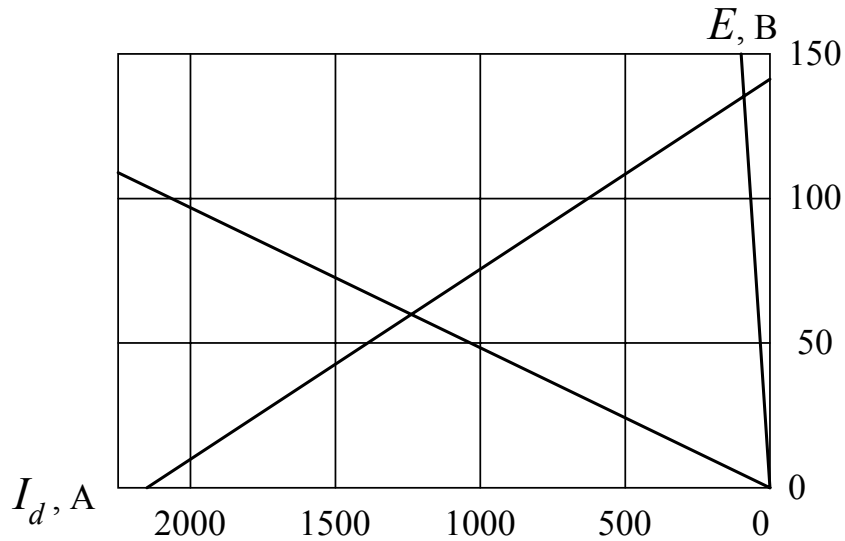


Рис. 5.14. Рабочая диаграмма для определения функции $E = f(I_d)$ для трехфазного генератора

По оси ординат откладываем фазную ЭДС

$$E = 4,44\Phi W_f f K_{об}. \quad (5.153)$$

Принимая абсциссу точки пересечения линий $\Phi_m = f(I_d)$ и $\Phi_\delta = f(I_d)$ за начало отсчёта, строим зависимость $E = f(I_d)$ (рис. 5.14).

Поскольку знак тока I_d уже учтён в расчётных формулах, то удобно этот ток откладывать в положительном направлении оси абсцисс.

Как видно из рис. 5.15, величина

$$A = -O_q / O_b.$$

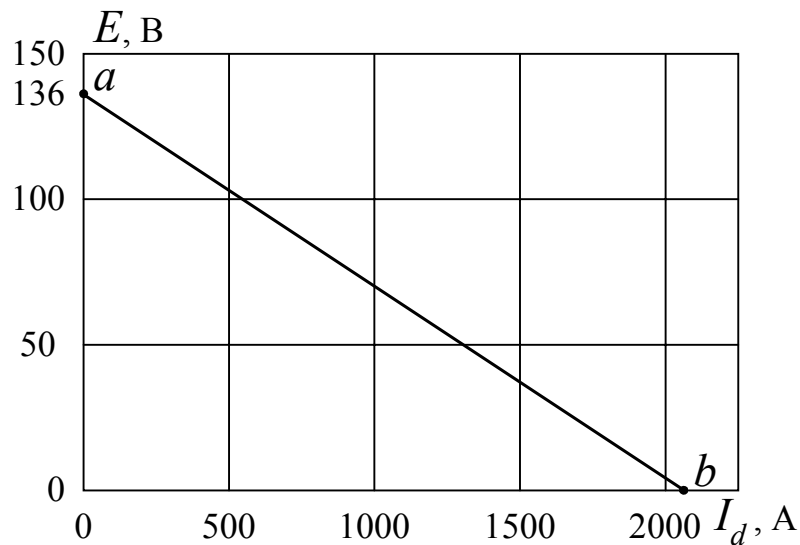


Рис. 5.15. Расчетная функция $E = f(I_d)$ для трехфазного генератора

Величина $B = U_{xx} = 136$ В.

7.2. Результаты расчёта характеристик генератора при трёхфазном питании.

Исходные данные: $W_\phi = 180$; $x_d = 0,313$ Ом; $x_q = 0,3124$ Ом; $R_a = 0,28$ Ом; $P_{мех} = 80$ Вт; $P_{см} = 263,5$ Вт; $P_{доб} = 40$ Вт.

Результаты расчёта характеристик представлены в табл. 5.2, 5.3, 5.4 и на рис. 5.16, 5.17, 5.18.

Таблица 5.2

Внешняя характеристика трехфазного генератора при коэффициенте мощности нагрузки $\cos\varphi_n = 1$

R_n , Ом	x_n , Ом	I_d , А	I_q , А	U_d , В	U_q , В	I_n , А	U , В	E , В
∞	0	0	0	0	136	0	136	136
50	0	0,017	2,7	0,855	135,5	2,7	135,16	135,998
25	0	0,0676	5,37	1,69	134,3	5,37	134,32	135,990
12	0	0,285	11,04	3,42	132,47	11,04	132,5	135,98
8	0	0,626	16,34	5,00	130,69	16,35	130,79	135,96
6	0	1,08	21,49	6,50	128,92	21,5	129,08	135,9
4	0	2,315	31,35	9,26	125,39	31,43	125,73	135,85
3	0	3,0	40,63	11,72	121,9	40,82	122,46	135,74
к,3(0)	0	197,6	192,4	0	0	275,8	0	122,8

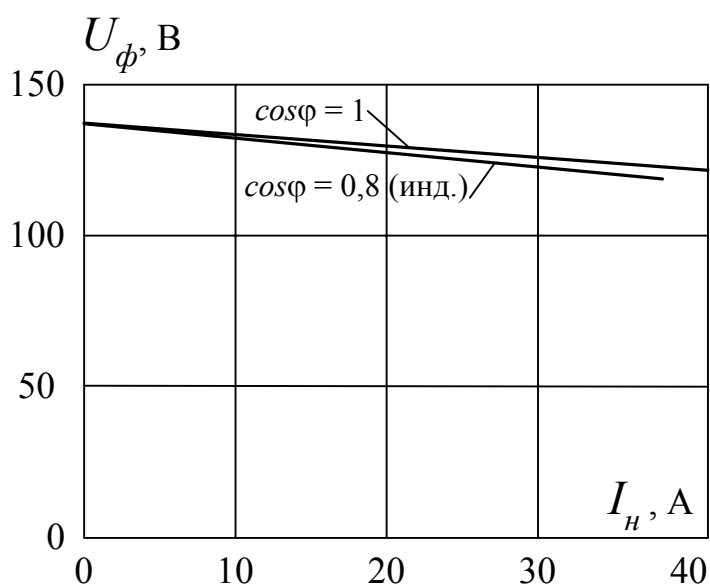
Таблица 5.3

Внешняя характеристика трехфазного генератора при коэффициенте мощности нагрузки $\cos\varphi_n = 0,8$ (инд.)

R_n , Ом	x_n , Ом	I_d , А	I_q , А	U_d , В	U_q , В	I_n , А	U , В	E , В
∞	∞	0	0	0	136	0	136	136
50	37,5	1,297	1,726	0,147	134,96	2,159	134,96	135,91
25	18,75	2,58	3,42	0,290	133,94	4,286	133,94	135,82
12	9	5,30	7,05	0,586	131,78	8,78	131,78	135,65
8	6	7,85	10,33	0,853	129,76	12,98	129,77	135,48
6	4,5	10,34	13,54	1,10	127,8	17,04	127,8	135,3
4	3	15,14	19,66	1,56	124,06	24,81	124,07	135,0
3	2,25	19,7	25,4	1,97	120,52	32,14	120,54	134,699

Рабочие характеристики трехфазного генератора

$R_H, \text{Ом}$	$P_2, \text{Вт}$	$P_1, \text{Вт}$	η	$M, \text{Н}\cdot\text{м}$
$\cos\varphi_H = 1$				
∞	0	383,5	0	14,65
50	1094,7	1485	0,737	56,72
25	2163,9	2574,2	0,84	98,32
12	4390	4887	0,898	186,6
8	6415,8	7047,9	0,91	269,2
6	8332,5	9145,9	0,91	349,3
4	11856	13158	0,9	502,6
3	14995	16928,6	0,886	646,6
$\cos\varphi_H = 0,8 \text{ (инд.)}$				
∞	0	383,5	0	14,6
50	6993	1087,2	0,643	41,5
25	1376,4	1777	0,7745	67,8
12	2796,4	3251,6	0,86	124,2
8	4041,3	4581,5	0,882	175,0
6	5225,3	5878,8	0,889	224,5
4	7387,9	8343,8	0,885	318,7
3	9300,0	10644	0,8737	406,5

Рис. 5.16. Внешние характеристики трехфазного генератора, $U = f(I_H)$

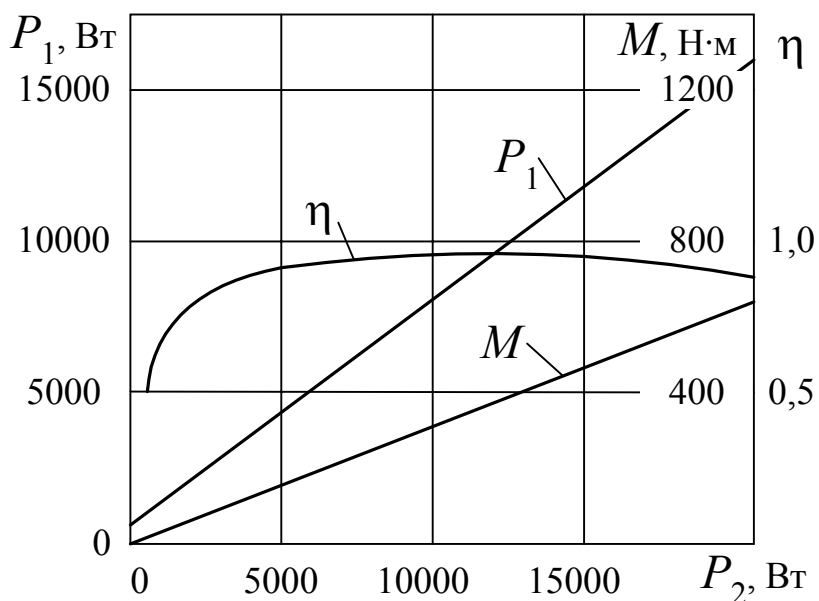


Рис. 5.17. Рабочие характеристики трехфазного генератора при $\cos\varphi = 1$

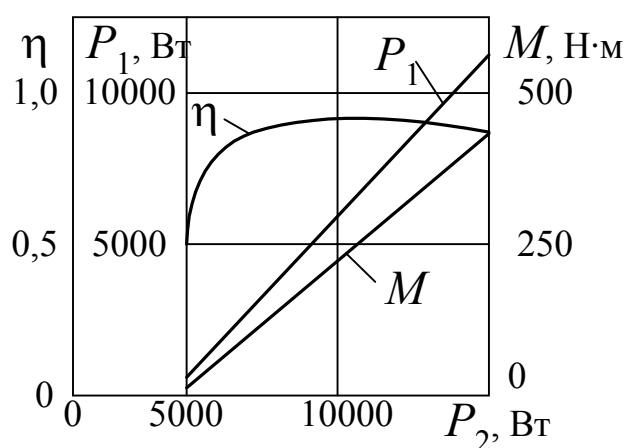


Рис. 5.18. Рабочие характеристики трехфазного генератора при $\cos\varphi = 0,8$ (инд.)

5.8. Расчет характеристик однофазного генератора

1. Ниже приведены величины, которые изменились в ходе электромагнитного расчета при переходе на однофазное питание:

$$U_{\phi} = 220 \text{ В}; \quad W_{\phi} = 2 \cdot 180 = 360;$$

$$I_{н\phi} = 5000 / (220 \cdot 0,8) = 28,4 \text{ А}; \quad Z = 90; \quad q = 1 \frac{1}{4};$$

$$N_n = 12 \text{ (то же, что и при трехфазном);}$$

$$A = \frac{\frac{2}{3} Z N_n I_{нф}}{\pi D_a} = \frac{\frac{2}{3} \cdot 90 \cdot 12 \cdot 23,4}{3,14 \cdot 0,45} = 14471,3 \frac{\text{А}}{\text{м}} = 144,7 \frac{\text{А}}{\text{см}};$$

$$j_1 = I_{нф} / q_{нф} = 28,4 / 4,471 = 6,35 \text{ А/м}; \quad k_o = 0,91 \frac{\sqrt{3}}{2} = 0,788;$$

$$R_\alpha = 1,75 \cdot 10^{-8} \frac{0,325 \cdot 360}{4,471 \cdot 10^{-6}} 1,22 = 0,558 \text{ Ом};$$

$$x_\sigma = 1,044 \text{ Ом}; \quad x_{ad} = 0,0527 \text{ Ом};$$

$$x_{aq} = 0,0514 \text{ Ом}; \quad x_d = 1,0967 \text{ Ом};$$

$$x_q = 1,0954 \text{ Ом}; \quad P_m = 28,4^2 \cdot 0,558 = 450 \text{ Вт};$$

$$F = \sqrt{3} \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{IW_{3\phi}}{P} k_{об3\phi}.$$

2. Исходные данные для расчета характеристик однофазного генератора:

$$x_d = 1,0967 \text{ Ом}; \quad x_q = 1,0954 \text{ Ом}; \quad R_a = 0,558 \text{ Ом};$$

$$x_\sigma = 1,044 \text{ Ом}; \quad P_{мех} = 80 \text{ Вт}; \quad P_{см} = 263,5 \text{ Вт};$$

$$P_{доб} = 40 \text{ Вт}.$$

3. Результаты расчета характеристик однофазного генератора представлены в табл. 5.5, 5.6, 5.7 и на рис. 5.19, 5.20, 5.21, 5.22, 5.23.

Таблица 5.5

Внешняя характеристика однофазного генератора
при коэффициенте мощности нагрузки $\cos \varphi_n = 1$

$R_n, \text{Ом}$	$x_n, \text{Ом}$	$I_d, \text{А}$	$I_q, \text{А}$	$U_d, \text{В}$	$U_q, \text{В}$	$I_n, \text{А}$	$U, \text{В}$	$E, \text{В}$
∞	0	0	0	0	236	0	236	236
50	0	0,1	4,66	5,06	233,3	4,66	233,3	235,99
25	0	0,399	9,21	9,88	230,4	9,22	230,6	235,95
12	0	1,63	18,64	19,52	223,6	18,7	224,5	235,8
8	0	3,47	27,1	27,76	216,7	27,3	218,45	235,6
6	0	5,836	34,9	35,0	209,4	35,39	212,36	235,3
4	0	11,7	48,66	46,82	194,66	50,05	200,2	234,65
3	0	18,5	60,03	55,49	180	62,8	188,4	233,8
K3	0	157,8	80,3	0	0	177	0	217,85

Таблица 5.6

Внешняя характеристика однофазного генератора
при коэффициенте мощности нагрузки $\cos\varphi_n = 0,8$ (инд.)

$R_H, \text{Ом}$	$x_H, \text{Ом}$	$I_d, \text{А}$	$I_q, \text{А}$	$U_d, \text{В}$	$U_q, \text{В}$	$I_n, \text{А}$	$U, \text{В}$	$E, \text{В}$
∞	∞	0	0	0	236	0	236	236
50	37,5	2,249	2,946	1,97	231,6	3,7	231,6	235,74
25	18,75	4,46	5,75	3,81	227,38	7,28	227,4	235,48
12	9	9,14	11,36	7,36	218,59	14,58	218,7	234,9
8	6	13,46	16,23	10,29	210,63	21,09	210,9	234,45
6	4,5	17,6	20,64	12,8	203,14	27,14	203,54	233,97
4	3	25,42	28,29	16,83	189,4	38,03	190,1	233
3	2,25	32,57	34,63	19,8	177,2	47,55	178,3	232,25

Таблица 5.7

Рабочие характеристики однофазного генератора

$R_H, \text{Ом}$	$P_2, \text{Вт}$	$P_1, \text{Вт}$	η	$M, \text{Н·м}$
$\cos\varphi_n = 1$				
∞	0	383,5	0	14,6
50	1087,6	1483,3	0,733	56,66
25	2125,9	2556,8	0,831	91,66
12	4199,7	4778,3	0,879	182,5
8	5968,8	6768,3	0,882	258,5
6	7512,3	8594,47	0,874	328,3
4	10019,9	11801,2	0,849	450,7
3	11849,9	14434,1	0,821	551,3
$\cos\varphi_n = 0,8$ (инд.)				
∞	0	383,5	0	14,6
50	686,7	1077,8	0,637	41,2
25	1324,4	1737,5	0,762	66,37
12	2550,4	3052,6	0,835	106,6
8	3557,0	4188,7	0,849	160
6	4418,0	5212,6	0,847	199,1
4	5785,9	6976,5	0,829	266,5
3	6781,3	8426,5	0,805	321,9

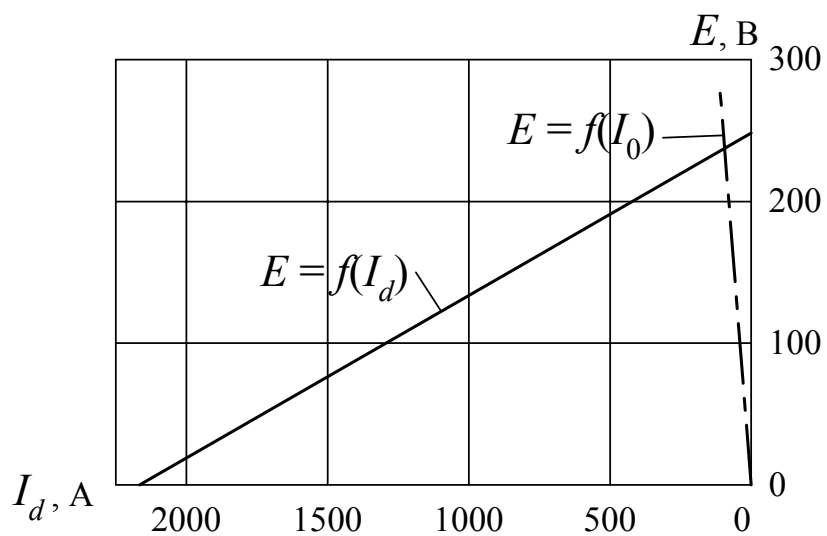


Рис. 5.19. Рабочая диаграмма для определения функции $E = f(I_d)$ для однофазного генератора

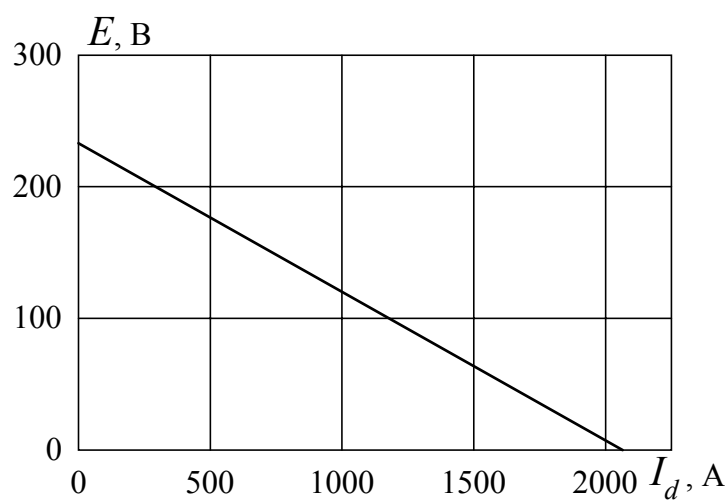


Рис. 5.20. Расчетная функция $E = f(I_{ad})$ для однофазного генератора

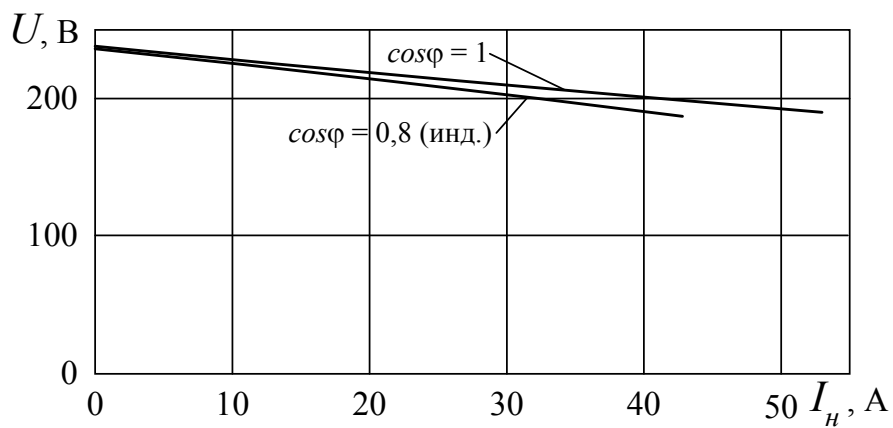


Рис. 5.21. Внешние характеристики однофазного генератора

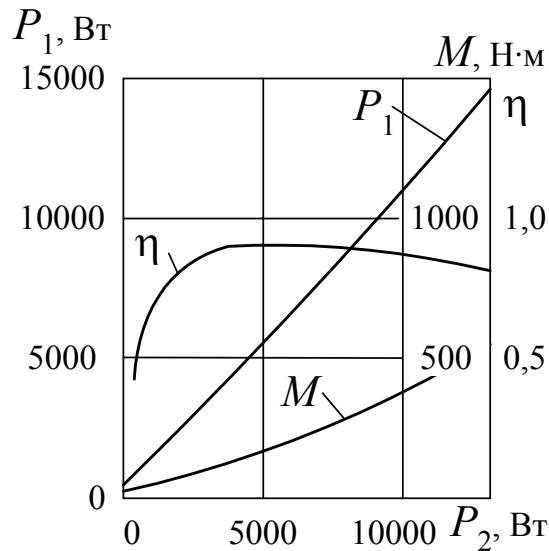


Рис. 5.22. Рабочие характеристики однофазного генератора при $\cos\varphi = 1$

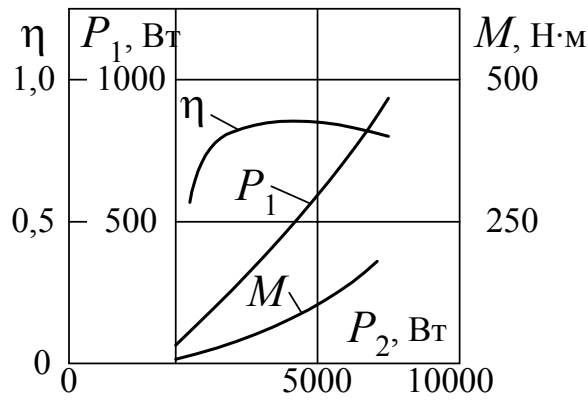


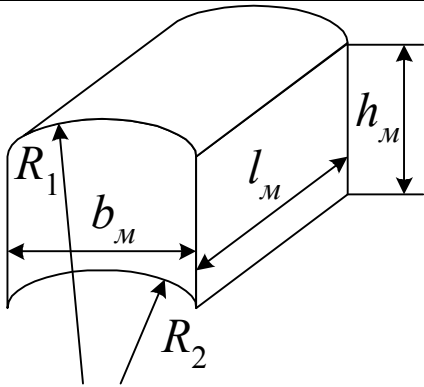
Рис. 5.23. Рабочие характеристики однофазного генератора при $\cos\varphi_n = 0,8$ (инд.)

Таблица 5.8

Сводная таблица исходных данных, геометрических размеров и расчетных данных

Параметры		Тип генератора	
		трёхфазный	однофазный
Номинальная мощность P_2 , Вт		7142,8	5000
Частота f , Гц		50	50
Режим работы		S1	S1
Соединение фаз		▲	▲
Фазовое напряжение U , В		127	220
Номинальный ток I_n , А		23,4	28,4
Частота вращения n , об/мин		250	250
	$D_{н1}$, м	0,52	0,52
	D_1 , м	0,45	0,45
	$D_{н2}$, м	0,4488	0,4488
	$D_{б2}$, м	0,373	0,373
	P_3	0,3	0,3
	δ	$0,6 \cdot 10^{-3}$	$0,6 \cdot 10^{-3}$
	l_i	0,08	0,08
Число пазов		90	60

Параметры		Тип генератора	
		трёхфазный	однофазный
Статор			
	b_{n1} , мм	5,3	5,3
	h_{n1} , мм	18,1	18,1
	b_{yn1} , мм	2,2	2,2
	b_{yn1} , мм	1	1
	h_{yn1} , мм	1,5	1,5
Допуск на размеры пазов в пакете $\Delta b_{n1}, \Delta h_{n1}$, мм		0,1	0,1
Односторонняя толщина пазовой изоляции Δi , мм		0,2	0,2
Схема обмотки		рис. 5.4, 5.5	рис. 5.4, 5.5
Вид обмотки		петлевая	двухслойная
Число пазов на полюс и фазу		1 1/4	2 1/2
Размер провода оголенного/изолированного d/d'		1,32×3,55 1,62×3,85	1,32×3,55 1,62×3,85
Число последовательных проводников в пазу N_n		12	12
Число параллельных проводников в катушке n_l		1	1
Число параллельных ветвей a_1		1	1
Коэффициент заполнения паза K_m'		0,83	0,83
Число витков в фазе W_1		180	360
Длина витков лобовой части $l_{л}$, мм		82,46	82,46
Средняя длина витка l_{cp} , мм		325	325
Сопротивление фазы при 20 °С r_1 , Ом		0,23	0,44
Вес меди $G_{м1}$, кг		6,12	4,1
Индуктивное сопротивление рассеяния x_{01} , Ом		0,261	1,044
Синхронное индуктивное сопротивление продольной оси x_d , Ом		0,313	1,0967
Синхронное индуктивное сопротивление поперечной оси x_q , Ом		0,3124	1,0964
Потери в стали сердечника статора P_{cm} , Вт		263,5	263,5

Параметры		Тип генератора	
		трёхфазный	однофазный
Ротор			
Число магнитов		24	24
	b_m , мм	40	40
	l_m , мм	80	80
	h_m , мм	38	38
	R_1 , м	0,2244	0,2244
	R_2 , м	0,187	0,187
Марка материала магнита		Nd ₁₃ Fe ₇₇ B ₈	
Масса магнитов G_{m2} , кг		24,5	24,5
Потери механические $P_{мех}$, Вт		80	80
Добавочные потери $P_{доб}$, Вт		40	40

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проектирование генератора производилось с учетом запасов на непредвиденные и не предусмотренные современной теорией обстоятельства.

После изготовления и испытания опытного образца, что включает в себя разработку системы и технологии намагничивания магнитов, установление влияния поперечных потоков на состояние магнитов, определение возможной силы залипания ротора, необходимо будет внести коррективы в конструкцию и схемы обмотки статора, устройство скоса пазов статора (для устранения залипания). Возможно уменьшение длины и веса магнитов примерно в два раза за счет усовершенствования технологии намагничивания. Все перечисленное приводит к несущественным изменениям в конструкции генератора и к нормальным условиям запуска.

В прил. 1 приведена картограмма изотак ветра Украины.

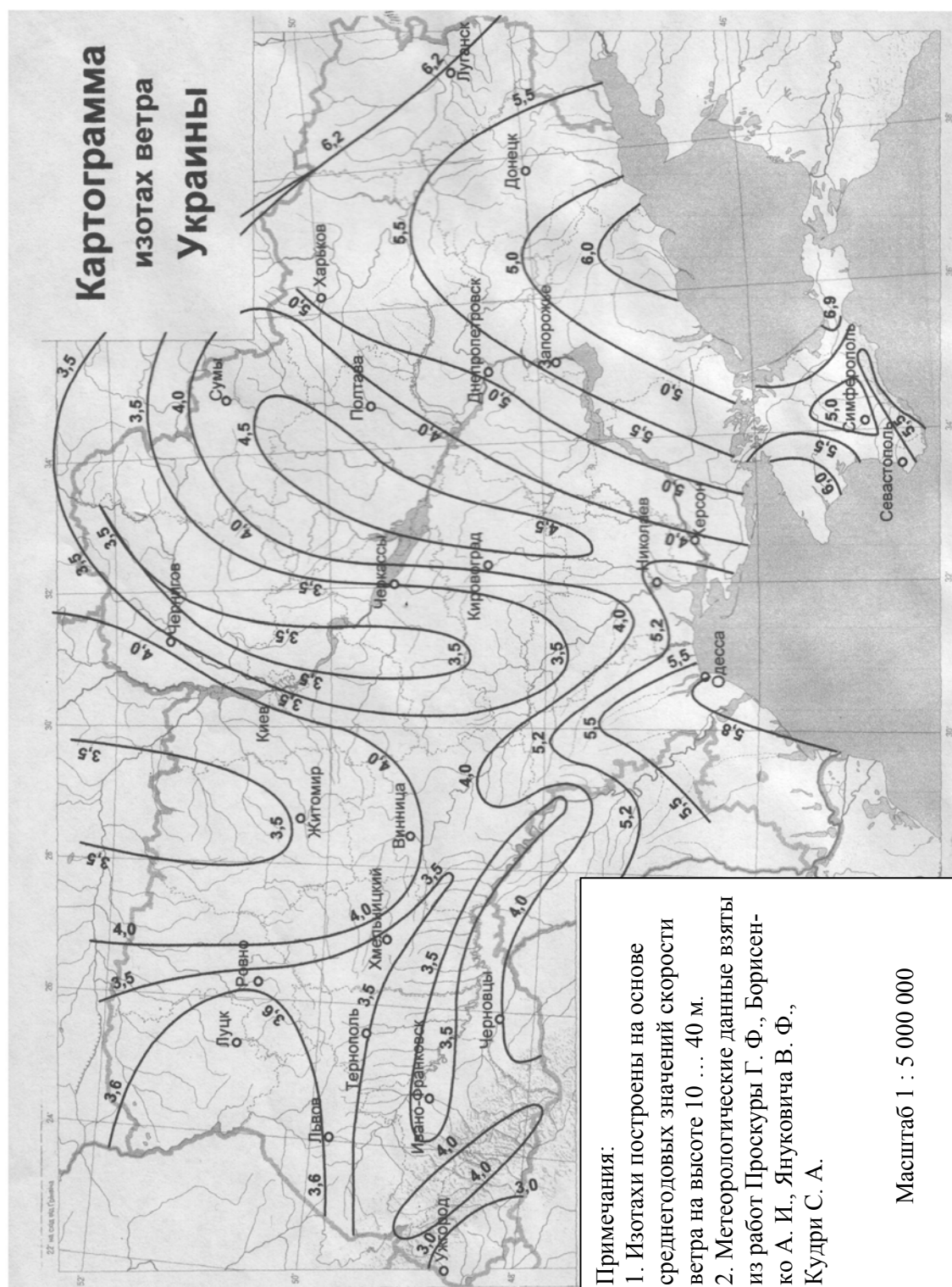
В прил. 2 представлена зависимость коэффициента мощности C_p от коэффициента быстроходности Z для разных типов ветроколес.

В прил. 3 приведены конструкции и данные о ветроэлектрических установках с синхронными генераторами на постоянных магнитах, выпускаемые иностранными фирмами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фатеев Е.М. Ветродвигатели и ветроустановки. — М.: Сельхозгиз, 1957.
2. Яковлев А.И., Затучная М.А. Рабочие и регулировочные характеристики ветротурбин пропеллерного типа// Авиационно-космическая техника и технология. — Х.: Гос. аэрокосм. ун-т «ХАИ». — 1999. — Вып. 8. — С. 39 – 43.
3. Сабинин Г.Х. Теория регулирования быстроходных ветродвигателей поворотом лопастей центробежным регулятором// Труды ЦАГИ. — М. — 1957. — № 8. — С. 5 – 77.
4. Яковлев А. И., Затучная М. А. Аэродинамический расчет ветротурбин пропеллерного типа: Учеб. пособие по курсовому проектированию. — Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2001.
5. Яковлев А. И., Затучная М. А. Расчет ветротурбин с вертикальной осью вращения: Учеб. пособие по курсовому проектированию. — Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2002.
6. Яковлев А. И., Затучная М. А., Пашков В. Н. Влияние формы и метода построения лопасти ветродвигателя пропеллерного типа на его энергетические характеристики// Авиационно-космическая техника и технология. — Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ». — 2000. — Вып. 15. — С. 132 – 135.
7. Беляев Н. М. Сопротивление материалов. — М.: Наука, 1976.
8. Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя: В 3 т. — 5-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1980.
9. Крупнов А. Ф. Расчет авиационных синхронных генераторов с возбуждением от постоянных магнитов. Учеб. пособие по курсовому и дипломному проектированию. — Рига.: РВВАИУ им. Я. Алкснинса, 1991.
10. Постников В. М. Проектирование электрических машин. — К.: ГИЗ, 1960.
11. Балагуров В. А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока. — М.: Высш. шк., 1982.
12. Балагуров В. А., Галтеев Ф. Ф. Электрические машины с постоянными магнитами. — М.: Энергоатомиздат, 1988.

КАРТОГРАММА ИЗОТАХ ВЕТРА УКРАИНЫ



**ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ
ОТ КОЭФФИЦИЕНТА БЫСТРОХОДНОСТИ
ДЛЯ РАЗНЫХ ТИПОВ ВЕТРОКОЛЕС**

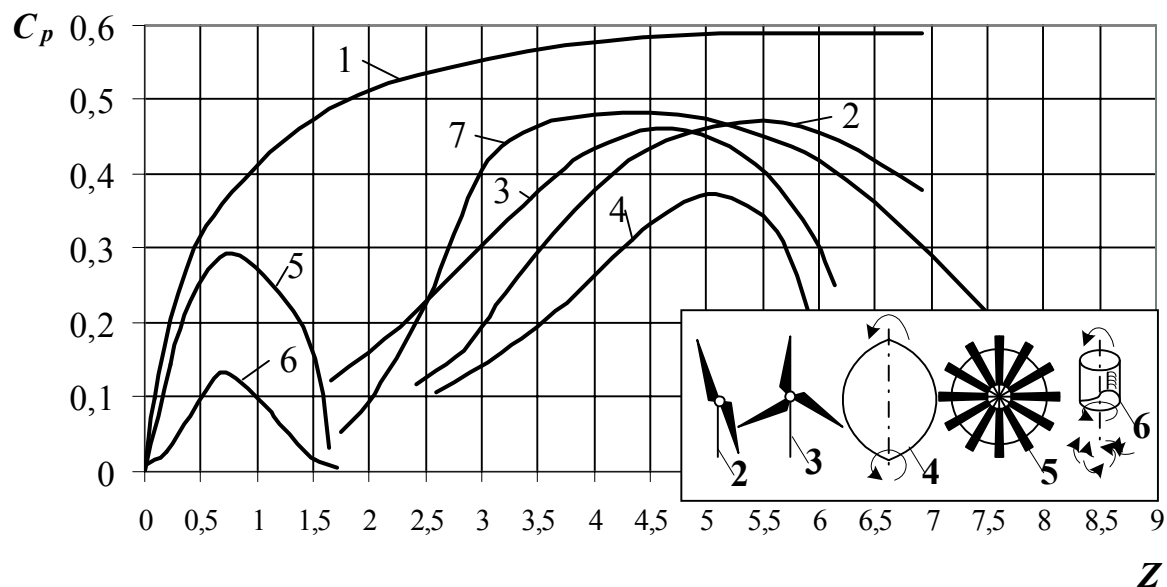
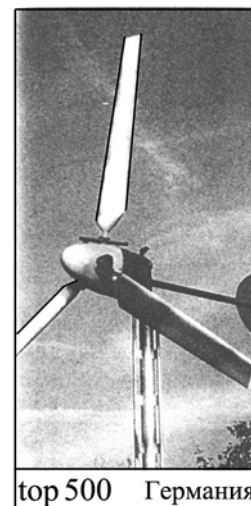


Рис. П.2.1. Зависимость коэффициента C_p от коэффициента быстроходности Z : 1 — идеальная эффективность ветротурбин пропеллерного типа; 2 — высокоскоростная двухлопастная турбина типа «Пропеллер»; 3 — трехлопастной «Пропеллер»; 4 — вертикально-осевая турбина типа «Дарье»; 5 — многолопастной ветронасос; 6 — ротор Савониуса; 7 — расчетная кривая для трехлопастной ветротурбины типа «Пропеллер»

Приложение 3

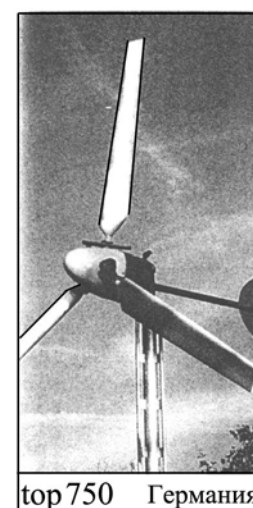
КОНСТРУКЦИИ И ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ВЕТРОУСТАНОВОК С СИНХРОННЫМИ ГЕНЕРАТОРАМИ НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ

Мощность, кВт	0,5
Напряжение, В	12/24
Диаметр ротора, материал лопастей	2,4 м, GFK
Скорость ветра включения/номинальная, м/с	3,5/10,0
Цена, DM	5739



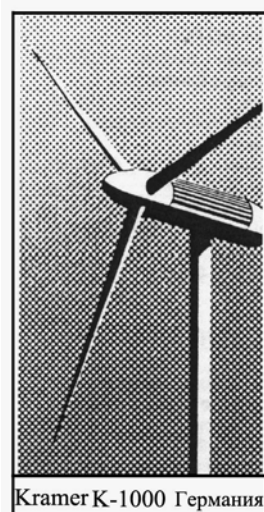
Мощность, кВт	0,6
Напряжение, В	24
Диаметр ротора, материал лопастей	2,0 м, GFK
Скорость ветра включения/номинальная, м/с	3,0/10,0
Цена, DM	7 220

Мощность, кВт	0,75
Напряжение, В	24 /48/96
Диаметр ротора, материал лопастей	2,4 м, GFK
Скорость ветра включения/номинальная, м/с	3,5/11,5
Цена, DM	5 878



Продолжение прил. 3

Мощность, кВт	1,0
Напряжение, В	230
Диаметр ротора, материал лопастей	2,4 м, GFK
Скорость ветра включения/номинальная, м/с	3,0/9,5
Цена, DM	3 965



Частота вращения генератора, об/мин	200 — 530
Мощность, кВт	1,0
Напряжение, В	230
Диаметр ротора, материал лопастей	3,0 м, GFK
Скорость ветра включения/номинальная, м/с	2,5/10,0
Цена, DM	5 850

Мощность, кВт	1,0
Напряжение, В	12 /24, 24/48
Диаметр ротора, материал лопастей	2,88 м, GFK
Скорость ветра включения/номинальная, м/с	1,5/12,0
Цена, DM	5 560



Продолжение прил. 3

Частота вращения ротора, об/мин	90 — 280
Мощность, кВт	3,0
Напряжение, В	90-280
Диаметр ротора, материал лопастей	5,12 м, GFK
Скорость ветра включения/номинальная, м/с	2,5/12,0
Цена, DM	15 873



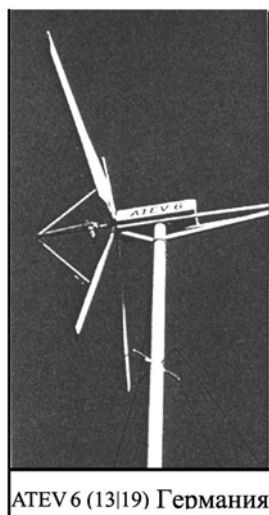
Частота вращения ротора, об/мин	450
Мощность, кВт	3,0
Напряжение, В	24/36/48 60/120/240
Диаметр ротора, материал лопастей	4,5 м, GFK
Скорость ветра включения/номинальная, м/с	3,0/11,0
Цена, DM	9 895

Частота вращения ротора, об/мин	450
Мощность, кВт	4,5
Напряжение, В	24/36/48 60/120/240
Диаметр ротора, материал лопастей	4,5 м, GFK
Скорость ветра включения/номинальная, м/с	3,0/11,0
Цена, DM	12 450



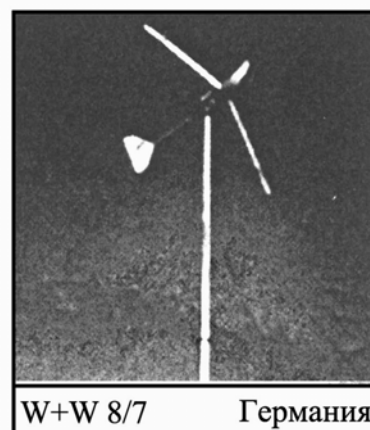
Продолжение прил. 3

Частота вращения ротора, об/мин	1500
Мощность, кВт	4,0
Напряжение, В	24/48 48/96 100/200
Диаметр ротора, материал лопастей	5,25 м, GFK
Скорость ветра включения/номинальная, м/с	2,5/12,0
Цена, DM	16 078



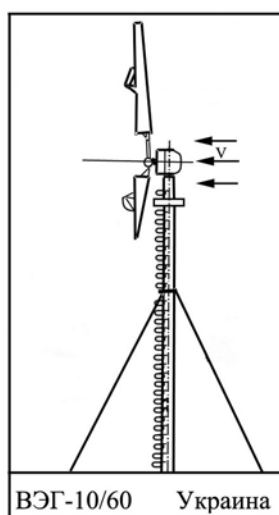
Частота вращения ротора, об/мин	800 — 1500
Мощность, кВт	6,0
Напряжение, В	90-400
Диаметр ротора, материал лопастей	6,0 м, GFK
Скорость ветра включения/номинальная, м/с	3,0/10,5
Цена, DM	30 000

Частота вращения ротора, об/мин	100 — 280
Мощность, кВт	8,0
Напряжение, В	48-400
Диаметр ротора, материал лопастей	7,0 м, GFK
Скорость ветра включения/номинальная, м/с	3,0/12,0



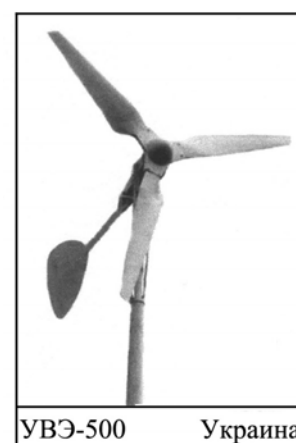
Продолжение прил. 3

Частота вращения ротора, об/мин	0 — 130
Мощность, кВт	10,0
Напряжение, В	230/400
Диаметр ротора, материал лопастей	8,5 м, GFK
Скорость ветра включения/номинальная, м/с	2,8/10,0
Цена, DM	58 500

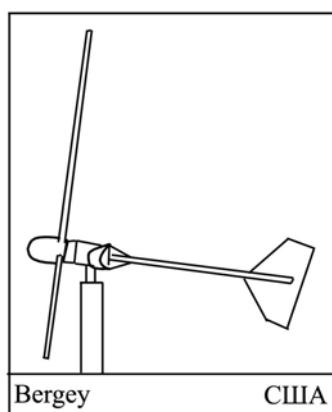


Частота вращения ротора, об/мин	0,125
Мощность, кВт	10,0
Напряжение, В	220
Диаметр ротора, материал лопастей	9,0 м, GFK
Скорость ветра включения/номинальная, м/с	3,0/9,0

Модель	УВЭ 200	УВЭ 500	УВЭ 700
Мощность, кВт	0,2	0,5	0,7
Напряжение, В	12	24	12
Диаметр ротора, материал лопастей	1,5 м, пластик	2,5 м, пластик	2,3 м, пластик
Скорость ветра включения/номинальная, м/с	3,0/8,5	3,0/7,0	3,0/8,0

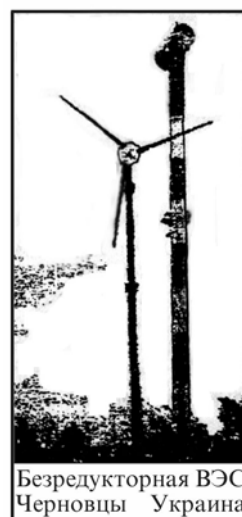


Окончание прил. 3



Модель	BWC 100	BWC EXCEL
Мощность, кВт	1,0	10,0
Диаметр ротора, материал лопастей	2,8 м, стеклопластик	7,0 м, стеклопластик
Скорость ветра включения/номинальная, м/с	4,0/11,0	3,1/12,1
Регулирование мощности	электроникой	
Контроль за превышением оборотов	автоматическое сворачивание	
Регулирование по ветру	пассивное	
Передача	прямая	

Тип генератора	Синхронный с постоянными магнитами торцевого исполнения
Частота вращения ротора, об/мин	20 — 160
Мощность, кВт	6,0
Напряжение, В	24
Скорость ветра включения/номинальная, м/с	2,5/—
Передача	прямая



Яковлев Александр Иванович, Затучная Маргарита Авадьевна,
Меркушев Виталий Николаевич, Пашков Владимир Никитович

**РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
УСТАНОВОК С ГОРИЗОНТАЛЬНО-ОСЕВОЙ
ВЕТРОТУРБИНОЙ И СИНХРОННЫМ ГЕНЕРАТОРОМ
НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ**

Редактор Т. В. Савченко

Св. план, 2003

Подписано в печать 15.09.2003

Формат 60×84 1/16. Бум. офс. № 2. Офс. печ.

Усл. печ. л. 6,9. Уч.-изд. л. 7,81. Т. 200 экз. Заказ 397. Цена свободная

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского

«Харьковский авиационный институт»

61070, Харьков–70, ул. Чкалова, 17

<http://www.khai.edu>

Издательский центр «ХАИ»

61070, Харьков–70, ул. Чкалова, 17

izdat@khai.edu