

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ**  
до виконання курсового проекту

**«ПРОЕКТУВАННЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ»**

із навчальної дисципліни

**«ВІТРОЕНЕРГЕТИКА»**

*(для студентів усіх форм навчання освітнього рівня «бакалавр»  
галузей знань 14 – Електрична інженерія спеціальність  
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
освітня програма «Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії»)*

**Харків**  
**ХНУМГ ім. О. М. Бекетова**  
**2020**

Методичні рекомендації до виконання курсового проекту «Проектування вітроенергетичної установки» із навчальної дисципліни «Вітроенергетика» (для студентів усіх форм навчання освітнього рівня «бакалавр» галузей знань 14 – Електрична інженерія спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітня програма «Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії») / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. : М. Л. Глебова, О. Б. Єгоров, С. І. Корнелюк. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020. – 97 с.

Укладачі : канд. техн. наук, доц. М. Л. Глебова,  
канд. техн. наук, доц. О. Б. Єгоров,  
викладач С. І. Корнелюк

#### **Рецензент**

**Д. В. Тугай**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри альтернативної електроенергетики та електротехніки Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

*Рекомендовано кафедрою альтернативної електроенергетики та електротехніки протокол № 9 від 20.02.2020.*

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 АЕРОДИНАМІЧНИЙ РОЗРАХУНОК ВІТРОКОЛЕСА З ГОРИЗОНТАЛЬНОЮ ВІССЮ ОБЕРТАННЯ.....	6
1.1 Вхідні дані.....	6
1.2 Розрахунок оптимального коефіцієнту гальмування потоку.....	7
1.3 Розрахунок відносних параметрів геометрії лопаті.....	14
1.4 Розрахунок розмірних параметрів вітроколеса.....	21
2 РОЗРАХУНОК ТРИФАЗНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА.....	27
2.1 Визначення головних розмірів.....	27
2.2 Проектування статора вітрогенератора.....	34
2.3 Проектування індуктора вітрогенератора.....	45
2.4 Втрати і ККД у режимі нормального навантаження.....	64
2.5 Розрахунок нагрівання обмотки статора й обмотки збудження.....	67
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	70
ДОДАТКИ.....	71

## ВСТУП

У цей час зростає використання вітрової енергії у світі й в Україні. У зв'язку із цим, підготовка фахівців в області поновлюваних нетрадиційних джерел енергії стає найважливішою державною справою.

Ціль сьогодення методичних рекомендацій (курсowego проекту) – надати студентам можливість ознайомитися з одним зі спрощених інженерних методів аеродинамічного й електромагнітного розрахунків сучасних вітроагрегатів. Теорія вітроагрегатів, що розбудовується кілька десятиліть, ще далека від свого завершення. Більше того, можна сказати, що не існує досить точних і надійних методів аеродинамічного розрахунків вітроагрегатів.

Слід зазначити, що темпи розвитку вітроенергетики далеко не відповідають можливостям, досягнутим в області сучасного машинобудування, і, найголовніше, далекі від задоволення запитів споживачів. Це обумовлено декількома причинами. Серед причин технічного характеру на перше місце можна поставити загальний недолік усіх вітроустановок: низький запас кінетичної енергії, що доводиться на одиниці об'єму робочого тіла, тобто атмосферного повітря. Побудова одиничних вітроагрегатів великої потужності являє собою складне інженерне завдання. Більше того, вартість 1 кВт·год енергії, виробленого вітроагрегатом, суттєво вище вартості енергії, одержуваної за рахунок спалювання рідкого палива й енергії атомних електростанцій. Наступним негативним фактором у системі використання вітрової енергії є нерівномірність її вступу, обумовлена наявністю періодів затишку. Є й інші моменти негативного характеру. Разом з тим застосування енергії вітру має багато переваг. І, насамперед, її потенційні запаси порівнювані, а теоретично перевершують сумарну потужність усіх працівників електростанцій.

Найбільш ефективним шляхом подальшого вивчення проблеми виявляється застосування чисельних методів розв'язку й аналізу системи вихідних диференціальних рівнянь і відповідних початково-крайових завдань, що відбивають нестационарний характер плинку газу і його взаємодії з основними робочими органами.

У методичних рекомендаціях (курсовому проекту) описана наближена інженерна методика аеродинамічного розрахунків вітротурбини пропелерного типу, яка у вітроустановці з горизонтальною віссю обертання перетворить енергію вітру в механічну й електричну енергію. Також надано методику електромагнітного розрахунку синхронного генератора, де відбувається перетворення механічної енергії вітру у електричну.

Вибір оптимального варіанта електричного генератора обумовлюється критерієм, що визначається мінімумом вартості матеріалів, витрат на виготовлення та експлуатацію. Для цього треба вміти проводити електромагнітний, тепловий, механічний і економічний розрахунки генератора.

**Організація проектування.** Курсовий проект студент виконує за індивідуальним завданням, яке видає керівник. Терміни виконання і захисту курсового проекту вказані в навчальному графіку. Курсовий проект складається з наступних основних частин: аеродинамічного розрахунків вітроколеса, електромагнітного розрахунку синхронного генератора.

Розрахунково-пояснювальна записка до курсового проекту має бути написана на стандартних аркушах білого паперу формату А4. У ній коротко з відповідними поясненнями викладають розрахункову частину проекту. До записки входять відповідні схеми, ескізи, графіки, виконані з дотриманням масштабу. Компонують розрахунково-пояснювальну записку в такому порядку. Перший аркуш – титульний. Приклад його заповнення є на кафедрі. Другий аркуш записки – завдання на виконання курсового проекту. Завдання затверджує і підписує керівник. Третій аркуш – «Зміст», в якому приводиться перелік основних розділів пояснювальної записки.

Далі наводиться вступ, а потім основні розділи розрахунку. Наприкінці записки йдуть висновок і список літератури.

# 1 АЕРОДИНАМІЧНИЙ РОЗРАХУНОК ВІТРОКОЛЕСА З ГОРИЗОНТАЛЬНОЮ ВІССЮ ОБЕРТАННЯ

Аеродинамічний розрахунок проводиться за методом, розробленим опираючись на теорію ідеального гвинта [1, 2], в основі якого, лежить вирішення нелінійних рівнянь та визначених інтегралів численними методами.

## 1.1 Вхідні дані

До вхідних даних розрахунку відносяться параметри, що задаються для кожного варіанту окремо, а також координати обраного профілю та його аеродинамічні характеристики [3].

Студент обирає свої дані згідно з указаними викладачем варіантами, з таблиці А1 додатка А.

Для прикладу розрахунку, оберемо профіль типу «GOE-225» дванадцятивідсоткової товщини, його аеродинамічні і геометричні параметри наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 — Умовні позначення вхідних даних розрахунку та їх величини для конкретного прикладу

Найменування параметра	Позначення	Одиниці виміру	Величина
1	2	3	4
Номінальна потужність генератора	$P$	Вт	500
Середньорічна швидкість вітру	$V_{с.р.}$	м/с	4,37
Швидкість вітру в пориві	$V_{пор}$	м/с	40
Кількість лопатей	$i_l$	о. е.	3
ККД електричний	$\eta_{ел}$	о. е.	0,7
ККД механічний (трансмисії)	$\eta_{мех}$	о. е.	0,9
Густина повітря при норм. атмосферних умовах	$\rho$	кг/ м <sup>3</sup>	1,23

Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4
Попередньо заданий коефіцієнт швидкохідності на кінці лопаті в робочій точці характеристики вітроколеса	$Z_R$	о. е.	6,5
Відносний радіус розміщення кореневого перерізу лопаті	$\bar{r}_0$	о. е.	0,2
Число перерізів лопаті	$n$	о. е.	5
Число точок ділення заданого інтервалу коефіцієнту гальмування для вибору його оптимального значення	$n_e$	о. е.	6
Відносна товщина профілю лопаті біля кореня	$\bar{c}_{корн}$	о. е.	0,20
Відносна товщина профілю лопаті на периферії	$\bar{c}_{периф}$	о. е.	0,10
Поправочний коефіцієнт при розрахунку коефіцієнта потужності	$K_{пот}$	о. е.	0,8

## 1.2 Розрахунок оптимального коефіцієнту гальмування потоку

### 1.2.1 Коефіцієнт гальмування потоку

Задаємо шість значень коефіцієнта гальмування потоку  $e$  через рівний проміжок від 0,27 до 0,42 за формулою:

$$e_i = 0,27 + 0,15 \frac{k_i - 1}{n_e - 1}. \quad (1.1)$$

де  $n_e$  – число точок ділення інтервалу визначення  $e$ ;

$$k_i = 1, 2, \dots, n_e.$$

При  $n_e = 6$

$$e_1 = 0,27 + 0,15 \frac{1-1}{6-1} = 0,27;$$

$$e_2 = 0,27 + 0,15 \frac{2-1}{6-1} = 0,3;$$

$$e_3 = 0,27 + 0,15 \frac{3-1}{6-1} = 0,33;$$

$$e_4 = 0,27 + 0,15 \frac{4-1}{6-1} = 0,36;$$

$$e_5 = 0,27 + 0,15 \frac{5-1}{6-1} = 0,39;$$

$$e_6 = 0,27 + 0,15 \frac{6-1}{6-1} = 0,42.$$

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

### 1.2.2 Коефіцієнт ідеальної потужності

За формулою

$$C_{p_{i0}} = 4e \frac{1-e}{1+e} \quad (1.2)$$

визначаємо шість значень коефіцієнту ідеальної потужності  $C_{p_{i0}}$ , що відповідають шести значенням  $e_k$ :

$$C_{p_{i01}} = 4e_1 \frac{1-e_1}{1+e_1} = 4 \cdot 0,27 \frac{1-0,27}{1+0,27} = 0,621;$$

$$C_{p_{i02}} = 4e_2 \frac{1-e_2}{1+e_2} = 4 \cdot 0,3 \frac{1-0,3}{1+0,3} = 0,646;$$

$$C_{p_{i03}} = 4e_3 \frac{1-e_3}{1+e_3} = 4 \cdot 0,33 \frac{1-0,33}{1+0,33} = 0,665;$$

$$C_{p_{i04}} = 4e_4 \frac{1-e_4}{1+e_4} = 4 \cdot 0,36 \frac{1-0,36}{1+0,36} = 0,678;$$

$$C_{p_{i05}} = 4e_5 \frac{1-e_5}{1+e_5} = 4 \cdot 0,39 \frac{1-0,39}{1+0,39} = 0,685;$$

$$C_{p_{i06}} = 4e_6 \frac{1-e_6}{1+e_6} = 4 \cdot 0,42 \frac{1-0,42}{1+0,42} = 0,686.$$



### 1.2.3 Коефіцієнт кінцевих втрат

За формулою

$$\bar{T}_j = \frac{e}{1-e} \left( \frac{8 \sqrt{1 + \left( \frac{1-e}{z_R} \right)^2}}{(1+e)i_n Z_R} - \left( \sqrt{1 + \left( \frac{i_n Z_R}{\pi(1-e/2)} \right)^2} \right)^{-1} \right) \quad (1.3)$$

знаходимо шість значень коефіцієнту кінцевих втрат  $\bar{T}_j$ , що відповідають  $e_k$ :

$$\bar{T}_{j_1} = \frac{0,27}{1-0,27} \left( \frac{8 \sqrt{1 + \left( \frac{1-0,27}{6,5} \right)^2}}{(1+0,27)3 \cdot 6,5} - \left( \sqrt{1 + \left( \frac{3 \cdot 6,5}{\pi(1-0,27/2)} \right)^2} \right)^{-1} \right) = 0,0692;$$

$$\bar{T}_{j_2} = \frac{0,3}{1-0,3} \left( \frac{8 \sqrt{1 + \left( \frac{1-0,3}{6,5} \right)^2}}{(1+0,3)3 \cdot 6,5} - \left( \sqrt{1 + \left( \frac{3 \cdot 6,5}{\pi(1-0,3/2)} \right)^2} \right)^{-1} \right) = 0,0779;$$

$$\bar{T}_{j_3} = \frac{0,33}{1-0,33} \left( \frac{8 \sqrt{1 + \left( \frac{1-0,33}{6,5} \right)^2}}{(1+0,33)3 \cdot 6,5} - \left( \sqrt{1 + \left( \frac{3 \cdot 6,5}{\pi(1-0,33/2)} \right)^2} \right)^{-1} \right) = 0,0871;$$

$$\bar{T}_{j_4} = \frac{0,36}{1-0,36} \left( \frac{8 \sqrt{1 + \left( \frac{1-0,36}{6,5} \right)^2}}{(1+0,36)3 \cdot 6,5} - \left( \sqrt{1 + \left( \frac{3 \cdot 6,5}{\pi(1-0,36/2)} \right)^2} \right)^{-1} \right) = 0,0968;$$

$$\bar{T}_{j_5} = \frac{0,39}{1-0,39} \left( \frac{8 \sqrt{1 + \left( \frac{1-0,39}{6,5} \right)^2}}{(1+0,39)3 \cdot 6,5} - \left( \sqrt{1 + \left( \frac{3 \cdot 6,5}{\pi(1-0,39/2)} \right)^2} \right)^{-1} \right) = 0,1073;$$

$$\bar{T}_{j_6} = \frac{0,42}{1-0,42} \left( \frac{8 \sqrt{1 + \left( \frac{1-0,42}{6,5} \right)^2}}{(1+0,42)3 \cdot 6,5} - \left( \sqrt{1 + \left( \frac{3 \cdot 6,5}{\pi(1-0,42/2)} \right)^2} \right)^{-1} \right) = 0,1186.$$

### 1.2.4 Коефіцієнт профільних втрат

За формулою

$$\bar{T}_p = 2\mu_{\alpha_{\min}} \left( \frac{1-e}{Z_R} + \frac{Z_R}{3(1-e)} \right) \quad (1.4)$$

де  $\mu_{\alpha_{\min}}$  – мінімальний коефіцієнт зворотної аеродинамічної якості, обирається з додатка Б.

Знаходимо шість значень коефіцієнту профільних втрат  $\bar{T}_p$ , що відповідають  $e_k$ :

$$\bar{T}_{p_1} = 2 \cdot 0,0103 \left( \frac{1-0,27}{6,5} + \frac{6,5}{3(1-0,27)} \right) = 0,0635;$$

$$\bar{T}_{p_2} = 2 \cdot 0,0103 \left( \frac{1-0,3}{6,5} + \frac{6,5}{3(1-0,3)} \right) = 0,0661;$$

$$\bar{T}_{p_3} = 2 \cdot 0,0103 \left( \frac{1-0,33}{6,5} + \frac{6,5}{3(1-0,33)} \right) = 0,0688;$$

$$\bar{T}_{p_4} = 2 \cdot 0,0103 \left( \frac{1-0,36}{6,5} + \frac{6,5}{3(1-0,36)} \right) = 0,0719;$$

$$\bar{T}_{p_5} = 2 \cdot 0,0103 \left( \frac{1-0,39}{6,5} + \frac{6,5}{3(1-0,39)} \right) = 0,0752;$$

$$\bar{T}_{p_6} = 2 \cdot 0,0103 \left( \frac{1-0,42}{6,5} + \frac{6,5}{3(1-0,42)} \right) = 0,0789.$$

### 1.2.5 Коефіцієнт втрат на закручення струменя

Визначаємо середній по висоті лопаті коефіцієнту швидкохідності:

$$Z_{\text{сер}} = \frac{1+\bar{r}_0}{2} Z_R = \frac{1+0,2}{2} 6,5 = 3,9. \quad (1.5)$$

Визначаємо середній за висотою лопаті відносний ККД елементарного вітряка  $\eta_{відн}$ :

$$\eta_{відн} = \frac{1 - \frac{\mu_{a\min} \cdot Z_{сер}}{1 - e}}{1 + \frac{\mu_{a\min} (1 - e)}{Z_{сер}}} \quad (1.6)$$

$$\eta_{відн1} = \frac{1 - \frac{0,0103 \cdot 3,9}{1 - 0,27}}{1 + \frac{0,0103(1 - 0,27)}{3,9}} = 0,9431;$$

$$\eta_{відн2} = \frac{1 - \frac{0,0103 \cdot 3,9}{1 - 0,3}}{1 + \frac{0,0103(1 - 0,3)}{3,9}} = 0,9408;$$

$$\eta_{відн3} = \frac{1 - \frac{0,0103 \cdot 3,9}{1 - 0,33}}{1 + \frac{0,0103(1 - 0,33)}{3,9}} = 0,9383;$$

$$\eta_{відн4} = \frac{1 - \frac{0,0103 \cdot 3,9}{1 - 0,36}}{1 + \frac{0,0103(1 - 0,36)}{3,9}} = 0,9356;$$

$$\eta_{відн5} = \frac{1 - \frac{0,0103 \cdot 3,9}{1 - 0,39}}{1 + \frac{0,0103(1 - 0,39)}{3,9}} = 0,9325;$$

$$\eta_{відн6} = \frac{1 - \frac{0,0103 \cdot 3,9}{1 - 0,42}}{1 + \frac{0,0103(1 - 0,42)}{3,9}} = 0,9292.$$

За формулою

$$\bar{T}_{mi} = C_{\rho i} \cdot \eta_{віднi}^2 \frac{\ln(1/\bar{r}_0)}{2 \cdot Z_R^2} \quad (1.7)$$

Визначаємо коефіцієнт втрат на закручення струменя для відповідних  $e$ :

$$\bar{T}_{m1} = 0,621 \cdot 0,9432^2 \frac{\ln(1/0,2)}{2 \cdot 6,5^2} = 0,0105 ;$$

$$\bar{T}_{m2} = 0,646 \cdot 0,9409^2 \frac{\ln(1/0,2)}{2 \cdot 6,5^2} = 0,0109 ;$$

$$\bar{T}_{m3} = 0,665 \cdot 0,9383^2 \frac{\ln(1/0,2)}{2 \cdot 6,5^2} = 0,0112 ;$$

$$\bar{T}_{m4} = 0,678 \cdot 0,9359^2 \frac{\ln(1/0,2)}{2 \cdot 6,5^2} = 0,0113 ;$$

$$\bar{T}_{m5} = 0,685 \cdot 0,9326^2 \frac{\ln(1/0,2)}{2 \cdot 6,5^2} = 0,0113 ;$$

$$\bar{T}_{m6} = 0,686 \cdot 0,9293^2 \frac{\ln(1/0,2)}{2 \cdot 6,5^2} = 0,0113 .$$

### 1.2.6 Попередній коефіцієнт потужності

За формулою

$$C_{P_{\text{попер } i}} = C_{P_{i0}} ((1 - r_0^{-2}) - \bar{T}_{ji} - \bar{T}_{pi} - \bar{T}_{mi}) \quad (1.8)$$

розраховуємо попередній коефіцієнт потужності  $C_{P_{\text{попер } i}}$  для рядка  $e$ :

$$C_{P_{\text{попер } 1}} = 0,621((1 - 0,2^2) - 0,0692 - 0,0635 - 0,0105) = 0,507 ;$$

$$C_{P_{\text{попер } 2}} = 0,646((1 - 0,2^2) - 0,0779 - 0,066 - 0,0109) = 0,5202 ;$$

$$C_{P_{\text{попер } 3}} = 0,665((1 - 0,2^2) - 0,0871 - 0,0687 - 0,0111) = 0,5273 ;$$

$$C_{P_{\text{попер } 4}} = 0,678((1 - 0,2^2) - 0,0968 - 0,0718 - 0,0113) = 0,5286 ;$$

$$C_{P_{\text{попер } 5}} = 0,685((1 - 0,2^2) - 0,1073 - 0,0751 - 0,0113) = 0,5245 ;$$

$$C_{P_{\text{попер } 6}} = 0,686((1 - 0,2^2) - 0,1186 - 0,0788 - 0,0113) = 0,5155 .$$

### 1.2.7 Значення параметрів, що залежать від коефіцієнту гальмування

У таблиці 1.2 зведено величини знайдених параметрів при різних значеннях  $e$ .

Таблиця 1.2 – Величини знайдених параметрів при різних значеннях  $e$

Найменування параметрів	Позначення	Номер точки					
		1	2	3	4	5	6
Коефіцієнт гальмування потоку	$e$	0,27	0,3	0,33	0,36	0,39	0,42
Коефіцієнт ідеальної потужності	$C_{P_{i0}}$	0,6208	0,6462	0,665	0,6776	0,6846	0,6862
Коефіцієнт кінцевих втрат	$\bar{T}_j$	0,0692	0,0779	0,0871	0,0968	0,1073	0,1186
Коефіцієнт профільних втрат	$\bar{T}_p$	0,0635	0,0661	0,0688	0,0719	0,0752	0,0789
Середній по висоті лопаті відносний ККД	$\eta_{відн}$	0,9431	0,9408	0,9383	0,9356	0,9325	0,9292
Коефіцієнт втрат на закручення струї	$\bar{T}_m$	0,0105	0,0109	0,0112	0,0113	0,0113	0,0113
Попередній коефіцієнт потужності	$C_{P_{нопер}}$	0,507	0,5202	0,5273	0,5286	0,5245	0,5155

1.2.8 Вибір максимального значення  $C_{P_{нопер}}$  та визначення відповідних йому значень  $e = e_{opt}$ , та  $C_{P_{i0}} = C_{P_{i0}}$ .

Із останнього рядка таблиці 1.2 видно, що максимальним значенням  $C_{P_{нопер}}$  є число 0,5286, тобто

$$C_{P_{нопер\max}} = 0,5286, \text{ а } e_{opt} = 0,36, \text{ та } C_{P_{i0}} = 0,6776.$$

### 1.2.9 Визначення розрахункового коефіцієнта потужності в робочій точці

Визначимо розрахунковий коефіцієнт потужності:

$$C_{P_{роз}} = K_{ном} C_{P_{нопер\max}} = 0,8 \cdot 0,5286 = 0,4229. \quad (1.9)$$

### 1.2.10 Визначення розрахункового моменту

Визначимо розрахунковий момент:

$$C_{M_{роз}} = C_{P_{роз}} / Z_R = 0,4229 / 6,5 = 0,0651. \quad (1.10)$$

## 1.3 Розрахунок відносних параметрів геометрії лопаті

Для  $e = e_{opt} = 0,36$ , що відповідає максимальному значенню  $C_{P_{лоп}}^*$  (табл. 1.2), при числі перерізів лопаті  $n = 5$  визначаємо геометрію лопаті при обраних п'яти перерізах.

### 1.3.1 Відносний радіус розміщення перерізу лопаті

Знаходимо відносні радіуси розміщення перерізів  $\bar{r}_k$  для  $n = 5$ :

$$\bar{r}_k = \bar{r}_0 + \frac{(1 - \bar{r}_0)(k - 1)}{(5 - 1)}, \quad k = 1, 2, \dots, 5. \quad (1.11)$$

При  $\bar{r}_0 = 0,2$

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

$\bar{r}_1 = 0,2$  – кореневий переріз;

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

### 1.3.2 Коефіцієнт швидкохідності перерізу лопаті

Знаходимо

$$Z_k = Z_R \bar{r}_k = 6,5 \bar{r}_k; \quad (1.12)$$

Для знайденого рядка значень  $\bar{r}_k$  визначаємо:

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

### 1.3.3 Число відносних модулів перерізу лопаті

Визначаємо

$$Z_{u_k} = Z_k \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{C_{P_{u0}}}{Z_k^2}}}{2(1 - e_{opt})} = Z_k \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{0,678}{Z_k^2}}}{2(1 - 0,36)}. \quad (1.13)$$

$$Z_{u_1} = 1,3 \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{0,678}{1,3^2}}}{2(1 - 0,36)} = 2,2177, \quad k = 1;$$

$$Z_{u_2} = 2,6 \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{0,678}{2,6^2}}}{2(1 - 0,36)} = 4,1619, \quad k = 2;$$

$$Z_{u_3} = 3,9 \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{0,678}{3,9^2}}}{2(1 - 0,36)} = 6,1609, \quad k = 3;$$

$$Z_{u_4} = 5,2 \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{0,678}{5,2^2}}}{2(1 - 0,36)} = 8,1756, \quad k = 4;$$

$$Z_{u_5} = 6,5 \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{0,678}{6,5^2}}}{2(1 - 0,36)} = 10,1968, \quad k = 5.$$

### 1.3.4 Коефіцієнт сумарної напруженості перерізів лопатей, що знаходяться в зоні дії елементарної кільцевого струменя

Визначаємо

$$C_{напр_k} = \frac{8\pi \bar{r}_k e_{opt}}{(1 + e_{opt})(1 - e_{opt})^2 (Z_{u_k} + \mu_{a_{min}}) \sqrt{1 + Z_{u_k}^2}}. \quad (1.14)$$

$$C_{напр_1} = \frac{8\pi \cdot 0,2 \cdot 0,36}{(1 + 0,36)(1 - 0,36)^2 (2,2178 + 0,0103) \sqrt{1 + 2,2178^2}} = 0,5993; \quad k = 1;$$

$$C_{напр_2} = \frac{8\pi \cdot 0,4 \cdot 0,36}{(1 + 0,36)(1 - 0,36)^2 (4,162 + 0,0103) \sqrt{1 + 4,162^2}} = 0,3638; \quad k = 2;$$

$$C_{напр_3} = \frac{8\pi \cdot 0,6 \cdot 0,36}{(1 + 0,36)(1 - 0,36)^2 (6,1611 + 0,0103) \sqrt{1 + 6,1611^2}} = 0,253; \quad k = 3;$$

$$C_{напр4} = \frac{8\pi \cdot 0,8 \cdot 0,36}{(1+0,36)(1-0,36)^2(8,1758+0,0103)\sqrt{1+8,1758^2}} = 0,1927; k = 4;$$

$$C_{напр5} = \frac{8\pi \cdot 1,0 \cdot 0,36}{(1+0,36)(1-0,36)^2(10,1969+0,0103)\sqrt{1+10,1969^2}} = 0,1553; k = 5.$$

### 1.3.5 Значення параметрів для п'яти перерізів лопаті

Таблиця 1.3 – Значення параметрів для п'яти перерізів лопаті

Найменування параметрів	Позначення	Номер перерізу лопаті				
		1 (корінь)	2	3	4	5 (периферія)
Відносна відстань перерізу лопаті від осі колеса	$\bar{r}_k$	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
Коефіцієнт швидкохідності перерізу лопаті	$Z_k$	1,3	2,6	3,9	5,2	6,5
Число відносних модулів перерізу лопаті	$Z_{u_k}$	2,2177	4,1619	6,1609	8,1756	10,1968
Коефіцієнт сумарної навантаженості	$C_{напрk}$	0,5993	0,3638	0,253	0,1927	0,1553

### 1.3.6 Коефіцієнт підйомної сили периферійного перерізу

Знаємо, що  $C_{y_{a\text{периф}}} = C_{y_a}(\mu_{a\text{min}})$  – із таблиці Б1 додатка Б.

Маємо  $\mu_{a\text{min}} = 0,0103$ , відповідне йому  $C_{y_a}(\mu_{a\text{min}}) = 1,173$ . Отже,  $C_{y_{a\text{периф}}} = 1,173$ .

### 1.3.7 Відносна хорда (в частках зовнішнього радіуса колеса) периферійного перерізу

Знаходимо відносну хорду периферійного перерізу

$$\bar{b}_{\text{периф}} = \frac{C_{напр}}{i_L C_{y_{a\text{периф}}}} = \frac{C_{напр}}{i_L C_{y_a}} = \frac{0,1553}{3 \cdot 1,173} = 0,0441, \quad (1.15)$$

де  $C_{напр}$  (із формули 1.14) для  $k = 5$ .



Відносна хорда в частках діаметра колеса

$$\bar{b}_{\text{периф}_D} = \bar{b}_{\text{периф}} / 2 \approx 0,0441 / 2 = 0,0221 \cdot$$

### 1.3.8 Коефіцієнт підйомної сили кореневого перерізу

Визначаємо коефіцієнт підйомної сили кореневого перерізу

$$C_{y_{a_{\text{корен}}}} = 0,95 C_{y_{a_{\text{тах}}}} = 0,95 \cdot 1,463 = 1,39 \quad (1.16)$$

де  $C_{y_{a_{\text{тах}}}}$  обирається з додатка Б.

### 1.3.9 Відносна хорда (в частках зовнішнього радіуса колеса) кореневого перерізу

Обчислимо відносну хорду кореневого перерізу

$$\bar{b}_{\text{корен}} = \frac{C_{\text{напр}}}{i_l C_{y_{a_{\text{корен}}}}} = \frac{0,5991}{3 \cdot 1,39} = 0,1437 \quad (1.17)$$

тоді відносна хорда в частках діаметра колеса

$$\bar{b}_{\text{корен}_D} = \frac{\bar{b}_{\text{корен}}}{2} = \frac{0,1437}{2} = 0,0719 \quad (\text{тобто близько } 7 \%).$$

### 1.3.10 Відносна хорда (в частках зовнішнього радіуса колеса) проміжного перерізу

За формулою

$$\bar{b}_k = \bar{b}_{\text{корен}} + \frac{(\bar{b}_{\text{периф}} - \bar{b}_{\text{корен}})(k-1)}{n-1} \quad (1.18)$$

визначаємо відносну хорду проміжного перерізу (в частках радіуса колеса):

$$\text{для } k = 1 \text{ (кореневий)} \quad \bar{b}_1 = 0,1437 + (0,0441 - 0,1437) \frac{1-1}{5-1} = 0,1437;$$

$$\text{для } k = 2 \quad \bar{b}_2 = 0,1437 + (0,0441 - 0,1437) \frac{2-1}{5-1} = 0,1188;$$

$$\text{для } k = 3 \quad \bar{b}_3 = 0,1437 + (0,0441 - 0,1437) \frac{3-1}{5-1} = 0,0939;$$

$$\text{для } k = 4 \quad \bar{b}_4 = 0,1437 + (0,0441 - 0,1437) \frac{4-1}{5-1} = 0,069;$$

$$\text{для } k = 5 \text{ (периферія)} \quad \bar{b}_5 = 0,1437 + (0,0441 - 0,1437) \frac{5-1}{5-1} = 0,0441.$$

### 1.3.11 Коефіцієнт підйомної сили проміжного перерізу

Коефіцієнт підйомної сили проміжного перерізу визначається за формулою

$$C_{y_a k} = \frac{C_{\text{нап}_k}}{i_a \bar{b}_k}. \quad (1.19)$$

Знаходимо коефіцієнти підйомної сили:

$$C_{y_a 1} = 0,5993 / (3 \cdot 0,1437) = 1,3899$$

$$C_{y_a 2} = 0,3638 / (3 \cdot 0,1188) = 1,0205$$

$$C_{y_a 3} = 0,253 / (3 \cdot 0,0939) = 0,8978$$

$$C_{y_a 4} = 0,1927 / (3 \cdot 0,069) = 0,9305$$

$$C_{y_a 5} = 0,1553 / (3 \cdot 0,0441) = 1,173$$

*1.3.12 Визначення номера елемента висхідної гілки вихідних значень характеристики  $C_{y_a}$ , найближчого до  $C_{y_{ak}}$  та більшого за нього*

Порівнюємо  $C_{y_{ak}}$  із зростаючою за величиною частиною масиву вихідних даних (див. табл. 1.2). Визначаємо номера елемента, ближчого по величині до  $C_{y_{ak}}$  та більшого за нього.

Для першого перерізу  $C_{y_{a1}} = 1,3899$ ,  $i_1 = 7$ ; для другого перерізу –  $C_{y_{a2}} = 1,0205$ ,  $i_2 = 5$ ; для третього перерізу –  $C_{y_{a3}} = 0,8978$ ,  $i_3 = 4$ ; для четвертого перерізу –  $C_{y_{a4}} = 0,9305$ ,  $i_4 = 4$ ; для п'ятого перерізу –  $C_{y_{a5}} = 1,173$ ,  $i_5 = 5$ .

*1.3.13 Кут атаки проміжного перерізу*

Кути атаки проміжних перерізів розраховують за формулою

$$\alpha_k = \alpha(i_k - 1) + (\alpha(i_k) - \alpha(i_k - 1)) \frac{C_{y_{ak}} - C_{y_a}(i_k - 1)}{C_{y_a}(i_k) - C_{y_a}(i_k - 1)}. \quad (1.20)$$

де  $\alpha$  – кут атаки з додатка Б.

Наводимо розрахунки  $\alpha_k$ :

$$\alpha_1 = 6 + (9 - 6) \frac{1,3899 - 1,303}{1,394 - 1,303} = 8,8632^\circ ;$$

$$\alpha_2 = 0 + (3 - 0) \frac{1,0205 - 1,004}{1,173 - 1,004} = 0,2925^\circ ;$$

$$\alpha_3 = -3 + (0 - 3) \frac{0,8978 - 0,746}{1,004 - 0,746} = -1,2345^\circ ;$$

$$\alpha_4 = -3 + (0 - 3) \frac{0,9305 - 0,746}{1,004 - 0,746} = -0,8541^\circ ;$$

$$\alpha_5 = 0 + (3 - 0) \frac{1,173 - 1,004}{1,173 - 1,004} = 3^\circ .$$

### 1.3.14 Кут протікання перерізу лопаті

Кути протікання визначаються за формулою:

$$\beta_k = \arctg(1/Z_{u_k}). \quad (1.21)$$

Відповідно до отриманих значень  $Z_{u_k}$ , наведеними в таблиці 1.3,

$$\beta_1 = \arctg(1/2,2177) = 24,271^\circ;$$

$$\beta_2 = \arctg(1/4,1619) = 13,5107^\circ;$$

$$\beta_3 = \arctg(1/6,1609) = 9,2195^\circ;$$

$$\beta_4 = \arctg(1/8,1756) = 6,9735^\circ;$$

$$\beta_5 = \arctg(1/10,1968) = 5,6011^\circ.$$

### 1.3.15 Кут заклинення (установки) перерізу лопаті

Кути заклинення визначаються за формулою:

$$\varphi_k = \beta_k - \alpha_k. \quad (1.22)$$

### 1.3.16 Підсумок розрахунку відносних параметрів геометрії лопаті

У таблиці 1.4 наведено відносні параметри геометрії лопаті.

Таблиця 1.4 – Відносні параметри геометрії лопаті

Найменування параметрів, одиниці вимірювання	Позначення	Номер перерізу				
		1 (корінь)	2	3	4	5 (периферія)
Відносний радіус розміщення перерізу лопаті, о. е.	$\bar{r}_k$	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
Відносна хорда (в частках зовнішнього радіуса колеса) периферійного перерізу, о. е.	$\bar{b}_k$	0,1437	0,1188	0,0939	0,069	0,0441
Коефіцієнт підйомної сили, о. е.	$C_{y_a,k}$	1,3899	1,0205	0,8978	0,9305	1,173
Кут протікання, градус	$\beta_k$	24,271	13,511	9,2195	6,9735	5,6011
Кут заклинення (установки) перерізу лопаті, градус	$\varphi_k$	15,408	13,218	10,454	7,828	2,601

## 1.4 Розрахунок розмірних параметрів вітроколеса

### 1.4.1 Вихідні дані розрахунку розмірних параметрів

Вихідними даними для розрахунку розмірних параметрів є дані таблиці 1.1:

- номінальна потужність  $P = 500$  Вт;
- густина повітря  $\rho = 1,23$  кг/м<sup>3</sup>;
- середньорічна швидкість вітру  $V_{c.p.} = 4,37$  м/с;
- швидкість вітру в пориві  $V_{пор} = 25$  м/с;
- заданий коефіцієнт швидкохідності в робочій точці  $Z_R = 6,5$ ;
- отриманий коефіцієнт потужності  $C_{P_{роз}}$  в робочій точці

$$C_{P_{роз}} = 0,4229 \approx 0,4.$$

А також прийmemo, що:

- ККД електричний  $\eta_{ел} = 0,7$ ;
- ККД механічний  $\eta_{мех} = 0,9$ .

### 1.4.2 Розмірні параметри вітроколеса

#### Розрахункова швидкість вітру

менше 4 м/с;

$$V = 0,5 + 1,5V_{c.p.} = 8,25 \text{ м/с};$$

менше 4 м/с і більше 6 м/с

$$V = 2,5 + V_{c.p.} = 7 \text{ м/с};$$

більше 6 м/с

$$V = 1,3 + 1,2V_{c.p.} = 7,5 \text{ м/с}.$$

Оскільки  $V_{c.p.} = 4,37$  м/с, тобто  $4 \text{ м/с} \leq V_{c.p.} \leq 6 \text{ м/с}$ , то за [1] визначаємо:

$$V = 2,5 + V_{c.p.} = 2,5 + 4,37 \approx 7 \text{ м/с}.$$

**Зовнішній діаметр вітроколеса** визначається із співвідношення:

$$D_{роз} = \sqrt{\frac{8P}{C_{P_{роз}} \rho V^3 \pi \eta_{ел} \eta_{мех}}} \quad (1.23)$$

Згідно з цим розрахуємо діаметр вітроколеса:

$$D_{роз} = \sqrt{\frac{8 \cdot 500}{0,4 \cdot 1,23 \cdot 7^3 \cdot 3,14 \cdot 0,7 \cdot 0,9}} = 3,4618 \approx 3,5 \text{ м.}$$

Приймаємо, за  $D = 3,5$  м.

**Радіус вітроколеса:**

$$R = D / 2 = 3,5 / 2 = 1,75 \text{ м} = 1750 \text{ мм.} \quad (1.24)$$

**Внутрішній діаметр вітроколеса:**

$$d_0 = \bar{r}_0 D = 0,2 \cdot 3,5 = 0,7 \text{ м.} \quad (1.25)$$

**Радіус розміщення перерізу лопаті** обчислюється за формулою:

$$r_k = \bar{r}_k R. \quad (1.26)$$

За формулою (1.25) маємо:

$$\begin{aligned} r_1 &= 0,2 \cdot 1750 \text{ мм} = 350 \text{ мм}; & r_2 &= 0,4 \cdot 1750 \text{ мм} = 700 \text{ мм}; \\ r_3 &= 0,6 \cdot 1750 \text{ мм} = 1050 \text{ мм}; & r_4 &= 0,8 \cdot 1750 \text{ мм} = 1400 \text{ мм}; \\ r_5 &= 1 \cdot 1750 \text{ мм} = 1750 \text{ мм.} \end{aligned}$$

### Відносний крок між перерізами:

Розраховуємо відносний крок між перерізами

$$\Delta\bar{r} = \frac{1 - \bar{r}_0}{n - 1} = \frac{1 - 0,2}{5 - 1} = 0,2. \quad (1.27)$$

### Відстань між перерізами лопаті (крок):

Знаходимо відстань між перерізами лопаті

$$\Delta r = \Delta\bar{r}R = 0,2 \cdot 1,75 = 0,35 \text{ м} = 350 \text{ мм}. \quad (1.28)$$

### Хорди перерізу :

Розмірні хорди визначаються за формулою:

$$b_k = \bar{b}_k R. \quad (1.29)$$

Проведемо розрахунок:

$$b_{\text{корн}} = 0,1437 \cdot 1750 = 251,5 \text{ мм}; \quad b_2 = 0,1188 \cdot 1750 = 208 \text{ мм};$$

$$b_3 = 0,0939 \cdot 1750 = 164,4 \text{ мм}; \quad b_4 = 0,069 \cdot 1750 = 120,8 \text{ мм};$$

$$b_{\text{периф}} = 0,0441 \cdot 1750 = 77,2 \text{ мм}.$$

### Відносна товщина профілю

З урахуванням  $\bar{c}_{\text{корн}} = 0,2$  та  $\bar{c}_{\text{периф}} = 0,1$ , розрахуємо значення  $\bar{c}_k$ , за формулою:

$$\bar{c}_k = \bar{c}_{\text{корн}} + \frac{(\bar{c}_{\text{периф}} - \bar{c}_{\text{корн}})(k - 1)}{n - 1}, \quad (1.30)$$

Згідно з розрахунком:

$$\bar{c}_1 = 0,2; \quad \bar{c}_2 = 0,175; \quad \bar{c}_3 = 0,15; \quad \bar{c}_4 = 0,125; \quad \bar{c}_5 = 0,1.$$

Розмірну товщину профілю, знайдемо за формулою:

$$c_k = \bar{c}_k b_k. \quad (1.31)$$

Отже отримаємо величини  $c_k$  та  $\bar{c}_k$  і наведемо їх у таблиці 1.7.

Безрозмірні величини хорди залежно від номера перерізу лопаті наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Безрозмірні та розмірні величини хорди та товщини

Номер перерізу	1 (корінь)	2	3 (середина)	4	5 (периферія)
$\bar{b}_{k_R}$	0,1437	0,1188	0,0939	0,069	0,0441
$b_k$ , мм	251,5	208	164,4	120,8	77,2
$\bar{c}_k$	0,2	0,175	0,15	0,125	0,1
$c_k$ , мм	50,3	36,4	24,7	15,1	7,7

### Координати профілів

Для вибраного профілю типу «GOE–225» безрозмірні координати верхньої ( $\bar{x}, \bar{y}_g$ ) та нижньої ( $\bar{x}, \bar{y}_n$ ) дуг наведено в таблиці В додатка В.

Шляхом проведення розрахунку для розмірних хорд  $b_k$  та товщини  $c_k$  отримаємо таблиці розмірних координат профілів.

### Координати центра суміщення профілів (ЦСП)

Координати ЦСП знаходяться за формулами:

$$x_{\text{цсп}} = 0,352b_k, \quad y_{\text{цсп}} = 0,5c_k. \quad (1.32)$$

Таблиця 1.3 – Центри суміщення профілів

Номер перерізу	1 (корінь)	2	3 (середина)	4	5 (периферія)
$x$ , мм	88,5	73,2	57,9	42,5	27,2
$y$ , мм	25,2	18,2	12,3	7,6	3,9



### **Частота обертання вітроколеса в робочій точці характеристики**

Частоту обертання знайдемо за виразом:

$$n = \frac{60 \cdot V \cdot Z_{p.m}}{\pi \cdot D} \quad (1.33)$$

$$n = \frac{60 \cdot 7 \cdot 6,5}{3,14 \cdot 3,5} = 248,4 \text{ об/хв.}$$

### **Обертний момент в робочій точці характеристики**

Обертний момент, що створює віротурбіна на валу електрогенератора:

$$W = Z_R V/R = 43,33$$

$$M = P/w = 500/43,33 = 11,54 \quad (1.34)$$

Таким чином, було розраховано аеродинамічні характеристики вітроколеса пропелерного типу, аналітичним способом.

## 2. РОЗРАХУНОК ТРИФАЗНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Вихідні дані для проектування генератора:

номінальна потужність  $P_H=500$  кВт;

номінальна лінійна напруга  $U_{1H}=1000$  В;

швидкість обертання  $n=500$  об/хв;

коефіцієнт потужності  $\cos(\varphi)=0,8$ ;

частота  $f=50$  Гц;

форма виконання прямокутна.

Приступаючи до розрахунку електричного генератора, необхідно враховувати те, що номінальна потужність генератором буде вироблятися за умовою номінальної частоти обертання його ротору. Але обертання вітроколеса залежить від швидкості вітру і коливається у широких межах. Тому для регулювання швидкості обертання ротору синхронного генератора встановлюється редуктор, який має декілька ступенів перетворення частоти обертання і дозволяє підтримувати оберти ротору на рівні номінального значення, тобто 500 об/хв. Редуктор розраховується окремо у курсі «Технічна механіка»

### 2.1 Визначення головних розмірів

Головними розмірами синхронної машини є внутрішній діаметр статора  $D_i$  і його розрахункова довжина  $l_i$ .

Зв'язок між головними розмірами та обраними електромагнітними навантаженнями встановлюють за допомогою рівняння машинної постійної

$$C = \frac{6,1}{K_{обм} \cdot K_{\phi} \cdot B_{\delta max} \cdot A \cdot \alpha_i} = \frac{D_i^2 \cdot l_i \cdot n}{S'_H}, \quad (2.1)$$

де  $K_{обм}$  – обмотувальний коефіцієнт, попередньо приймають  $= 0,92$ ;

$K_{\phi}$  – коефіцієнт форми поля,  $K_{\phi} = 1,14 \div 1,16$ ;

$B_{\delta max}$  – максимальна індукція в повітряному зазорі, Тл;

$A$  – лінійне навантаження, А/м;

$\alpha_i$  – розрахунковий коефіцієнт полюсного перекриття.

$$\alpha_i = \frac{b_p}{\tau} \cdot K_\alpha = \alpha \cdot K_\alpha, \quad (2.2)$$

де  $b_p$  – довжина полюсної дуги, м;

$\tau$  – полюсний розподіл, м;

$K_\alpha$  – коефіцієнт, що залежить від відношення максимального повітряного зазору до мінімального, звичайно приймають  $\frac{\delta_{\max}}{\delta} = 1,5$ , тоді  $K_\alpha = 1$ ;

$\alpha_i = \alpha = 0,7 \div 0,74$  для  $2p > 4$ ;

$S'_n$  – розрахункова електромагнітна потужність, ВА.

### 2.1.1 Розрахункова електромагнітна потужність

Для синхронних генераторів (с.г.):

$$S'_n = \frac{K_e \cdot P_n}{\cos \varphi}, \quad (2.3)$$

де  $K_e$  – відношення ЕРС в якорі при номінальній напрузі до номінальної напруги;

для с.г.  $\cos \varphi = 0,8$  (що відстає),  $K_e = 1,08$ ;

$\eta$  – ККД попередньо вибираємо за таблицями 2.1, 2.2 (для серійних машин), у відносних одиницях.

Таблиця 2.1 – Значення ККД (%) синхронних генераторів при  $\cos \varphi = 0,8$  і  $U_{1H} = 400$  В

P <sub>н</sub> , кВт	n <sub>н</sub> , об/хв			
	1000	600	500	375
125	-	-	90,5	-
160	-	91,3	-	-
200	-	-	91,9	-
250	93	92,6	-	-
315	-	-	92,7	-
400	-	-	-	92,6
500	-	-	-	93,4
630	-	-	-	93,8
8800	-	-	-	94,1

Таблиця 2.2 – Значення ККД (%) синхронних генераторів при  $\cos \varphi = 0,8$  і  $U_{1H} = 230$  В, 400 В,  $n = 1500$  об/хв

P <sub>н</sub> , кВт	η, %
4	80
8	82,2
12	86
16	87
20	87,5
30	88
50	90
60	90,5
100	92,5

### 2.1.2 Внутрішній діаметр розточення статора

Діаметр статора  $D_i$  визначають за залежністю  $D_i = f(S'_n)$  виконаних машин (рис. 2.1, 2.2).

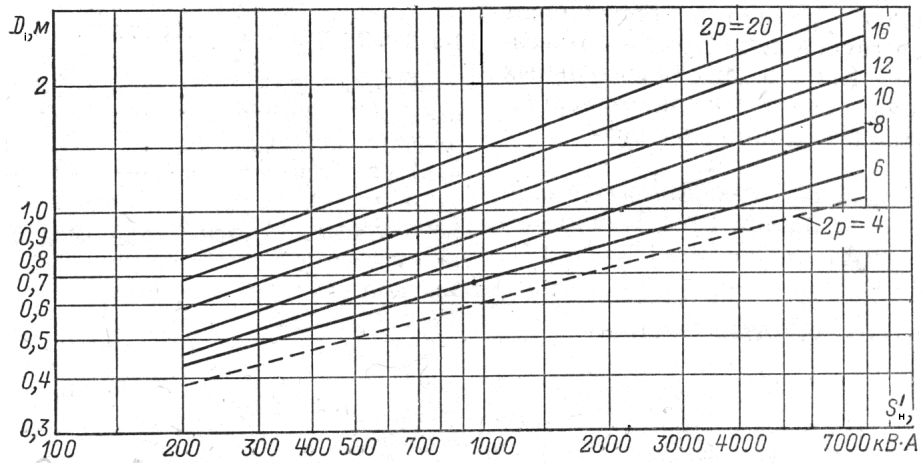


Рисунок 2.1 – Залежність  $D_i = f(S'_n)$  при  $S'_n > 100$  кВА

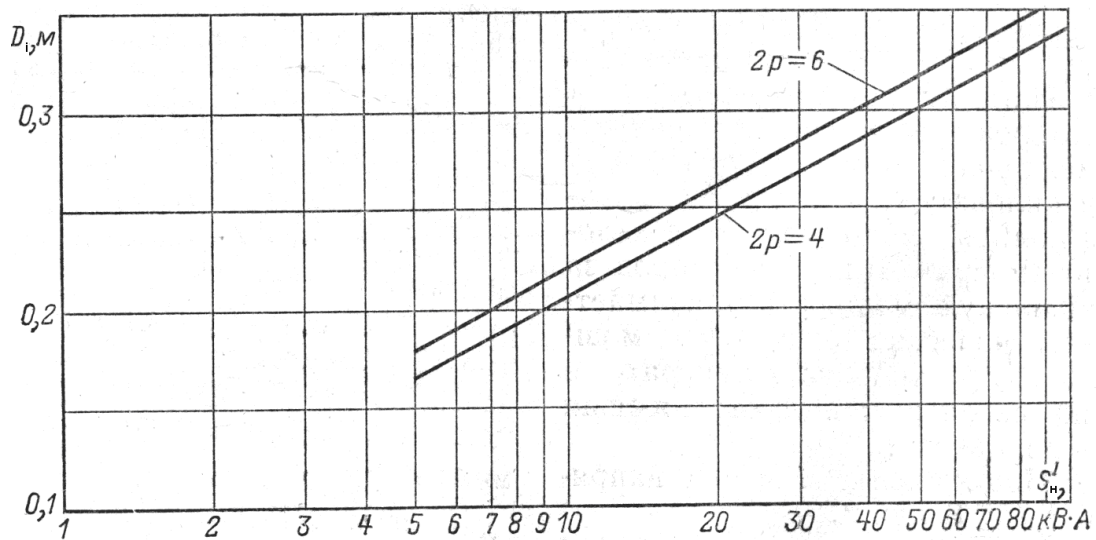


Рисунок 2.2 – Залежність  $D_i = f(S'_n)$  при  $S'_n \leq 100$  кВА

Полісний розподіл, м:

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_i}{2p}, \quad (2.4)$$

де  $p$  – число пар полюсів,  $p = \frac{60f}{n}$ .

### 2.1.3 Вибір електромагнітних навантажень

Електромагнітні навантаження  $B_{\delta_{max}}$  і  $A$  вибирають залежно від величини полюсного розподілу (рис. 2.3, 2.4).

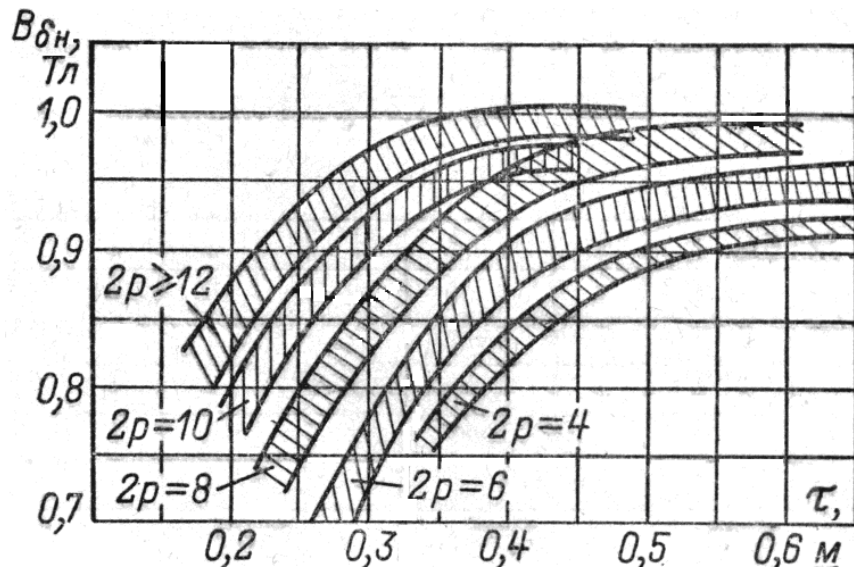


Рисунок 2.3 – Залежність  $B_{\delta_{max}}$  від  $\tau$  для синхронних машин потужністю  $P_n > 100$  кВт

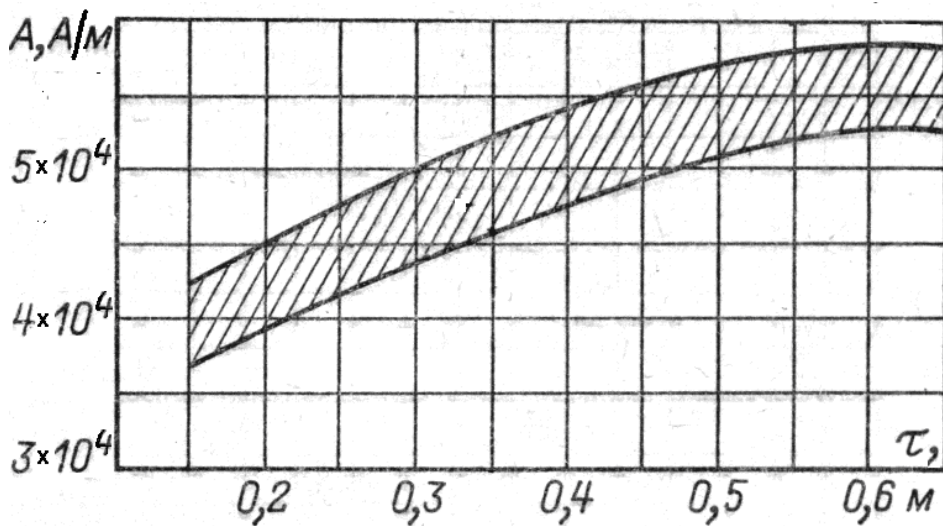


Рисунок 2.4 – Залежність  $A$  від  $\tau$  для синхронних машин потужністю  $P_n > 100$  кВт

### 2.1.4 Розрахункова довжина машини

$$l_i = \frac{6,1 \cdot S'_n \cdot 10^3}{D_i^2 \cdot n \cdot K_{обм} \cdot K_\phi \cdot B_{\delta \max} \cdot A \cdot \alpha_i}, \text{ м.} \quad (2.5)$$

### 2.1.5 Відношення розрахункової довжини до полюсного розподілу

$$\lambda = \frac{l_i}{\tau}. \quad (2.6)$$

Перевіряємо  $\lambda$  за рисунком 2.5.

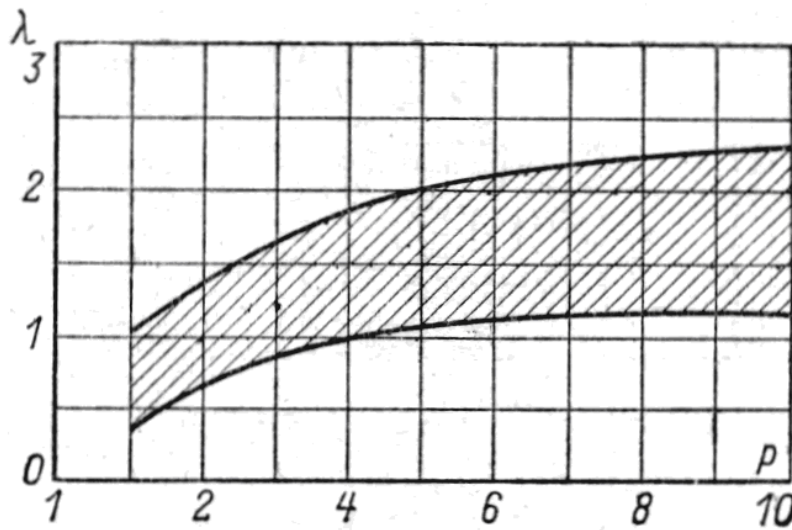


Рисунок 2.5 – Значення  $\lambda = l_i / \tau$  залежно від числа пар

### 2.1.6 Вибір зовнішнього діаметра статора $D_a$ і діаметра розточення статора $D_i$

Попереднє значення  $D_i$  діаметра, м знаходимо за формулою

$$D_a = K_d \cdot D_i, \quad (2.7)$$

де  $K_d = f(p)$  обираємо за таблицею 2.4.

Таблиця 2.4 – Значення коефіцієнта  $K_d$  залежно від числа полюсів машини

$2p$	$K_d$
4	1,43 ÷ 1,52
6	1,40 ÷ 1,45
8	1,35 ÷ 1,40
10	1,30 ÷ 1,35
12	1,28 ÷ 1,33
16	1,22 ÷ 1,28

Зовнішні діаметри стандартизовані з умов найвигіднішого розкрою листів при штампуванні. Прийнята в даний час шкала зовнішніх діаметрів наведена в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Значення нормалізованих діаметрів синхронних машин

Габарит	Зовнішній діаметр $D_a$ , мм	Висота осі оберту, мм
5	280	180
6	327	200
7	393	225
8	423	250
9	493	280
10	520	315
11	590	355
12	660	400
13	740	450
14	850	500
15	990	560
16	1180	630
17	1430	630
18	1730	630
19	2150	630
20	2600	630
21	3250	630

Зовнішній діаметр, обчислений за формулою (2.7) в міліметрах, округляємо до найближчого стандартного значення, переводимо в метри та уточнюємо діаметр розточення:

$$D_i = \frac{D_a}{K_d} . \quad (2.8)$$

Отримане значення (мм) округляємо до найближчого цілого числа, що закінчується цифрою 0 чи 5.

Уточнюємо значення полюсного розподілу, м:

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_i}{2p} . \quad (2.9)$$

#### 2.1.7 Довжина осердя статора і число пакетів

Звичайно великі й середні синхронні машини захищеного виконання проектують з радіальною системою вентиляції, для здійснення якої осердя статора розбивають по довжині на окремі пакети, розділені вентиляційними каналами [4, с. 277]. Звичайно довжина пакета  $l_{\text{пак}} = 0,04 \div 0,05$  м, ширина каналу  $b_{\text{к}} = 0,01$  м.

За наявності вентиляційних каналів довжина статора (м), буде більшою розрахункову:

$$l_1 = (1,05 \div 1,08) l_i . \quad (2.10)$$

Довжину всіх пакетів беруть однаковою. У цьому разі кількість вентиляційних каналів

$$n_{\text{к}} = \frac{l_1 - l_{\text{пак}}}{l_{\text{пак}} + b_{\text{к}}} , \quad (2.11)$$

до того ж  $n_{\text{к}}$  округляємо до цілого числа.

Визначаємо число каналів, уточнюємо довжину пакета, м:

$$l_{\text{пак}} = \frac{l_1 - n_{\text{к}} \cdot b_{\text{к}}}{n_{\text{к}} + 1} . \quad (2.12)$$



## 2.2 Проектування статора вітрогенератора

### 2.2.1 Вибір виконання обмотки

Для статора синхронних машин потужністю вище 200 кВт, проєктованих на високу напругу 3 кВ і вище, звичайно застосовують двошарову петлеву обмотку з укороченим кроком, виконувану у вигляді твердих компаундованих секцій, що укладаються у відкриті пази прямокутної форми [4].

### 2.2.2 Число пазів статора

Кожному значенню полюсного розподілу і напруги на затисках синхронної машини відповідають визначені оптимальні межі значення ширини паза і зубцевого розподілу статора в розточенні [4]. Оптимальні значення зубцевого розподілу в розточенні (рис. 2.6) і відповідно число пазів на полюс і фазу вибираємо за формулою

$$q_1 = \frac{\pi \cdot D_i}{2p \cdot m \cdot t_{z_1}}, \quad (2.13)$$

де  $m$  – число фаз,  $m = 3$ .

Обрана кількість пазів на полюс і фаза при  $2p \leq 8$  може бути цілим чи дробовим числом, при  $2p > 8$  для генераторів з метою наближення форми кривої ЕРС до синусоїди бажано, щоб  $q$  було дробовим.

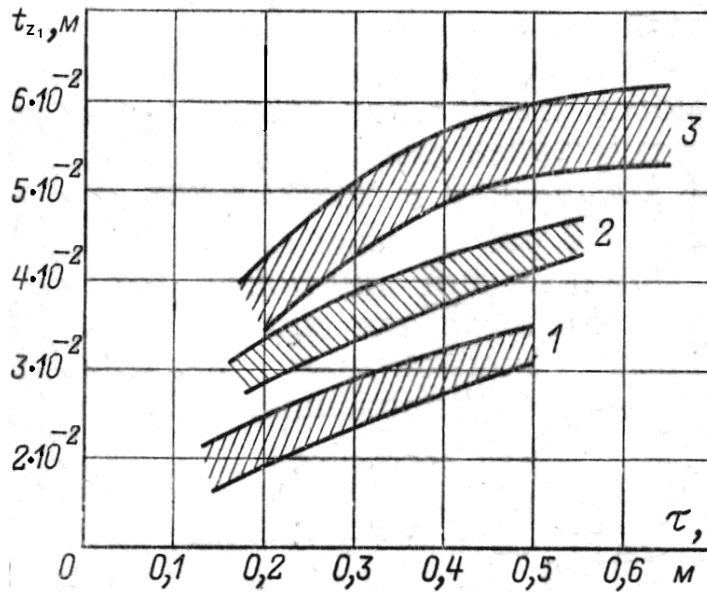


Рисунок 2.6 – Межа змін зубцевого поділу  $t_{z_1}$  залежно від  $\tau$  полюсного поділу для синхронних машин: 1 – 13 та 14-го габаритів; 2 – 16-го та 17-го; 3 – 18-го та 21-го

### 2.3.2 Число назів статора

$$z_1 = 2p \cdot m \cdot q_1. \quad (2.14)$$

### 2.2.3 Перевірка умов симетрії обмотки при дробовому $q_1$

Обмотка статора буде симетричною, якщо числа  $z_1$  і  $q_1$  задовольняють умовам:

$$\frac{z_1}{t} = \frac{2p \cdot m \cdot q_1}{t} = \frac{2p \cdot m}{d} \text{ дорівнює цілому числу;} \quad (2.15)$$

$$\frac{2p}{a \cdot d} \text{ дорівнює цілому числу,} \quad (2.16)$$

де  $q_1 = b_1 + \frac{c}{d} = \frac{b \cdot d + c}{d} = \frac{b}{d}$ ;  $\frac{c}{d}, \frac{t}{d}$  – дробі, що не скорочуються;

$a$  – кількість паралельних гілок.

#### 2.2.4 Крок обмотки та обмотувальний коефіцієнт

Обмотку бажано виконати з укороченням кроку порядку 0,8  $\tau$ .  
Приймаємо, що

$$y_1 = \beta \cdot m \cdot q_1 = 0,8m \cdot q_1. \quad (2.17)$$

Округляємо значення  $y_1$  до найближчого цілого числа та уточнюємо значення укорочення і коефіцієнта скорочення кроку:

$$\beta = \frac{y_1}{m \cdot q_1}; \quad (2.18)$$

$$K_y = \sin \frac{\pi \cdot \beta}{2}. \quad (2.19)$$

Визначаємо коефіцієнт розподілу обмотки (для цілого значення  $q_1$ ):

$$K_p = \frac{\sin \frac{q_1 \cdot \alpha}{2}}{q_1 \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}, \quad (2.20)$$

де  $\alpha = \frac{2\pi \cdot p}{z_1}$ ,

коефіцієнт обмотки  $K_{обм} = K_p \cdot K_y$ . При розрахунках значення синуса треба обчислювати в радіанах.

#### 2.2.5 Попереднє значення магнітного потоку статора

$$\Phi_1 = \alpha_i \cdot \tau \cdot l_1 \cdot B_{\delta_{\max}}, \text{ Вб.} \quad (2.21)$$

### 2.2.6 Попереднє значення числа витків у фазі

$$W_1 = \frac{0,47U_{1\phi n} \cdot 10^{-2}}{\Phi_1 \cdot K_{обм}}, \quad (2.22)$$

де  $U_{1\phi n}$  – фазова напруга, звичайно вибираємо з'єднання обмотки Y, тоді

$$U_{1\phi n} = \frac{U_{1л}}{\sqrt{3}}.$$

### 2.2.7 Кількість ефективних провідників у пазу статора

(округляємо до цілого):

$$S_n = \frac{a \cdot W_1}{p \cdot q_1}, \quad (2.23)$$

де  $a$  – кількість паралельних гілок.

Для високовольтних синхронних машин (3 ÷ 6 кВ) потужністю менше 5 000 кВА звичайно прагнуть брати  $a = 1$ .

Кількість ефективних провідників у пазу має позначатися цілим, бажано парним числом, також необхідно, щоб виконувалася умова  $S_n \geq 4$ .

4. Якщо це неможливо виконати при  $a = 1$ , то розглядають варіанти  $a = 2$ ; 3 чи 4 з урахуванням зауважень підрозділу 3.3 за умовами симетрії обмотки.

Якщо при  $a \neq 1$  не вдається одержати  $S_n$  парним, то застосовують варіант з непарним значенням, причому в цьому разі необхідна перевірка можливості:

а) виконання симетричної обмотки з однаковим числом витків у кожній з трьох фаз;

б) укладання в пазах секцій з різним числом витків.

### 2.2.8 Уточнене значення числа витків фази обмотки

$$W_1 = \frac{S_n \cdot p \cdot q_1}{a}. \quad (2.24)$$

2.2.9 Уточнене значення магнітного потоку та перевірка індукції в повітряному проміжку

$$\Phi_1 = \frac{0,47U_{1\phi n} \cdot 10^{-2}}{W_1 \cdot K_{обм}}, \text{ Вб}; \quad (2.25)$$

$$B_{\delta \max} = \frac{\Phi_1}{Q_{\delta}}, \text{ Тл}; \quad (2.26)$$

$$Q_{\delta} = \alpha_i \cdot \tau \cdot l_i. \quad (2.27)$$

Отримане значення  $B_{\delta \max}$  не повинно відрізнятись більше ніж на  $(3 \div 8)\%$  від значення, прийнятого на початку розрахунку. Якщо при перевірці значення  $B_{\delta \max}$  розбіжність більше, то необхідно змінити довжину машини  $l_i$  і відповідно перерахувати  $l_i$ ,  $n_k$ ,  $l_{\text{нак}}$ .

2.2.10 Номінальний струм фази статора

$$I_{1\phi n} = \frac{S'_n \cdot 10^3}{3U_{1\phi n} \cdot K_e}, \quad (2.28)$$

де  $S'_n$  – розрахункова потужність, кВА;

$U_{1\phi n}$  – номінальна фазна напруга, В.

2.2.11 Перевірка лінійного навантаження

$$A = \frac{I_{1\phi n} \cdot S_n}{a \cdot t_{z_1}}, \text{ А/м}, \quad (2.29)$$

де  $t_{z_1} = \frac{\pi \cdot D_i}{z_1}$  – зубцевий розподіл у розточенні.

Отримана при перевірці  $A$  не повинна відрізнятись більше ніж на  $5 \div 10\%$  від величини, прийнятої на початку розрахунку.

Якщо при перевірці значення  $A$  розбіжність більше, то треба змінити кількість провідників у пазу  $S_n$  і відповідно перерахувати  $W_1$ ,  $\Phi$ ,  $B_{\delta \max}$ .

### 2.2.12 Вибір щільності струму для обмотки статора

Припустимо щільність струму  $J_1$  визначають за добутком  $A \cdot J_1$ , що є характеристикою теплового навантаження обмотки і залежить від класу нагрівостійкості застосовуваної ізоляції. На рисунку 2.7 надана залежність  $A \cdot J_1 = f(\tau)$  для серійних синхронних машин з ізоляцією класу В. При застосуванні ізоляції класу F значення  $A \cdot J_1$ , наведені на рисунку 2.7, можна збільшити на 25÷30 %.

Значення щільності струму,  $\frac{A}{\text{м}^2}$ ,

$$J_1 = \frac{A \cdot J_1}{A}. \quad (2.30)$$

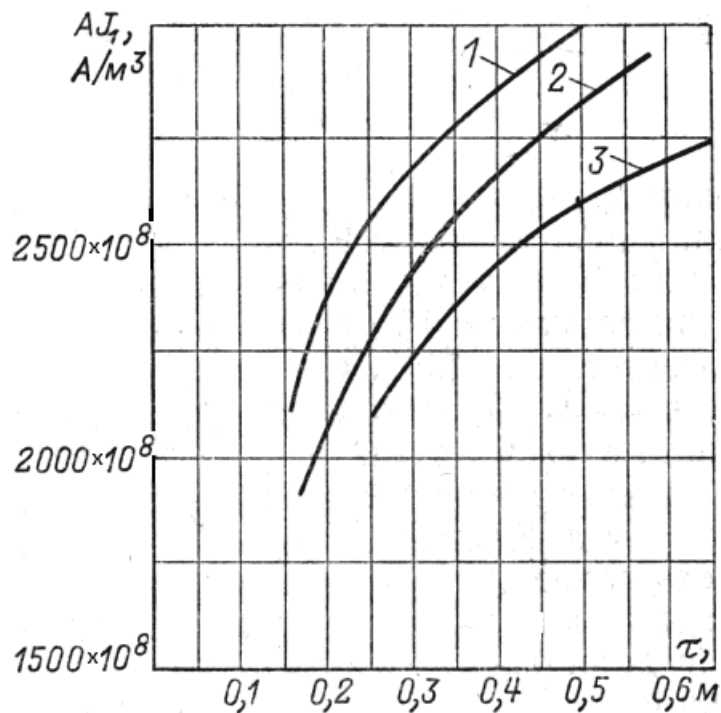


Рисунок 2.7 – Залежність  $A \cdot J_1$  від  $\tau$  для синхронних машин:

1 – 13 і 14-го габаритів;

2 – 16-го і 17-го; 3 – 18-го і 21-го габаритів

### 2.2.13 Переріз ефективного провідника (витка обмотки)

$$Q_{1ef} = \frac{I_{1\phi n} \cdot 10^6}{a \cdot J_1}, \text{ мм}^2, \quad (2.31)$$

де  $a$  – число паралельних гілок.

### 2.2.14 Ширина паза

Ширину паза визначаємо, виходячи з умови, що максимальне значення індукції в розрахунковому перерізі зубця повинно знаходитися в межах  $B_{z_1 \frac{1}{3}} = 1,4 \div 1,65$  Тл.

Визначаємо зубцевий розподіл у розрахунковому перерізі, м,

$$t_{z_1 \frac{1}{3}} = \frac{\pi \left( D_i + \frac{2}{3} h_{n1} \right)}{z_1}. \quad (2.32)$$

Для попередніх розрахунків приймаємо висоту паза  $h_{n1} = 0,06 \div 0,08$  м.

Попереднє значення ширини зубця в розрахунковому перерізі, м,

$$b_{z_1 \frac{1}{3}} = \frac{\Phi_1}{\alpha_i \cdot m \cdot q_1 \cdot l_{ef} \cdot B_{z_1 \frac{1}{3}}}, \quad (2.33)$$

де  $l_{ef}$  – ефективна довжина сталі, м,

$$l_{ef} = n_{пак} \cdot l_{пак} \cdot K_{зап} = l_{пак} \cdot (n_k + 1) \cdot K_{зап},$$

де  $K_{зап}$  – коефіцієнт заповнення, для лакованих листів сталі товщиною 0,5 мм,  $K_{зап} = 0,93$ .

Визначаємо попереднє значення ширини паза, м,

$$b_{n1} = t_{z_1 \frac{1}{3}} - b_{z_1 \frac{1}{3}}. \quad (2.34)$$

Ширина паза повинна знаходитися в межах  $(0,34 \div 0,5) t_{z_1 \frac{1}{3}}$ .

### 2.2.15 Вибір ізоляції обмотки

Ізоляцію обмотки вибираємо залежно від заданої лінійної напруги  $U_{1н}$ . У синхронних машинах від 100 кВт і вище застосовується термореактивна чи безупинна ізоляція класу нагрівостійкості В, специфікація якого надана в додатку Д.

### 2.2.16 Ширина неізольованої міді обмотки

$$b_{м1} = b_{п1} - (\Delta_{із} + \delta_{укл} + \delta_{із} + \delta_{шт} + \delta_{вит}), \text{ мм}, \quad (2.35)$$

де  $b_{п1}$  – ширина паза, мм;

$\Delta_{із}$  – товщина ізоляції секції 0,33 мм;

$\delta_{укл}$  – допуск на укладання секції за шириною,  $\delta_{укл} = 0,3$  мм;

$\delta_{із}$  – товщина ізоляції обмотки проводу,  $\delta_{із} = 0,3$  мм;

$\delta_{шт}$  – допуск на штампування,  $\delta_{шт} = 0,3$  мм;

$\delta_{вит}$  – товщина виткової ізоляції (дод. А),  $\delta_{вит} = 0,5$  мм.

Отримане значення  $b_{м1}$  округляємо до найближчого стандартного значення (дод. Г).

Якщо ширина міді більше 6,9 мм, то розбиваємо за шириною ефективний провідник на два елементарних.

### 2.2.17 Висота міді обмотки

За обчисленим значенням  $Q_{1еф}$  і шириною міді  $b_{м1}$  вибираємо висоту міді  $a_{м1}$  (дод. Д). Ця висота з технологічних міркувань повинна бути менше 3,53 мм. Тому в разі потреби розбиваємо ефективний провідник за висотою на ряд елементарних. Уточнюємо значення перерізу, мм<sup>2</sup>:

$$Q_{1еф} = Q_{1ел} \cdot n_b \cdot n_a, \quad (2.36)$$

де  $Q_{1ел}$  – переріз елементарного провідника, мм<sup>2</sup>;

$n_b, n_a$  – число елементарних провідників в одному ефективному провіднику відповідно за шириною і висотою.



Обрані розміри міді повинні задовольняти умові  $(b_{m1}; a_{m1}) > 1,05$ .

**Приклад:**  $b_{m1} = 10,25$  мм;  $Q_{1ef} = 44,5$  мм<sup>2</sup>.

Оскільки  $b_{m1} > 6,9$  мм, розбиваємо провідник за шириною на два; за додатком 2 визначаємо  $b_{m1}$  (дорівнює 5,1 мм). Тоді переріз кожного елементарного провідника  $\frac{Q_{1ef}}{2} = 22,22$  мм, що відповідає його висоті  $a_{m1} > 3,53$  мм. Тому розбиваємо ефективний провідник і за висотою на два, тобто  $Q_{1ef} = 11$  мм. За додатком 2  $a_{m1} = 2,26$  мм. Одержуємо уточнене значення перерізу

$$Q_{1ef} = 11 \cdot 2 \cdot 2 = 44 \text{ мм}^2 .$$

### 2.2.18 Заповнення паза по ширині і висоті та визначення розмірів паза $b_{n1}$ і $h_{n1}$ відповідно

Зразок заповнення паза наданий у додатку Е.

Навести масштабний ескіз-розріз паза з обмоткою.

### 2.2.19 Перевірка величини індукції в розрахунковому перерізі зубця

$$B_{z_1^{1/3}} = \frac{\Phi_1}{Q_{z_1^{1/3}}}, \text{ Тл}, \quad (2.37)$$

$$\text{де } Q_{z_1^{1/3}} = \alpha_i \cdot m \cdot q_1 \cdot l_{ef} \cdot b_{z_1^{1/3}}, \quad b_{z_1^{1/3}} = t_{z_1^{1/3}} - b_{n1} ,$$

$b_{n1}$  – ширина паза, отримана в підрозділі 2.2.14.

Отримане значення повинне знаходитися в межах  $1,4 \div 1,7$ . Якщо значення  $b_{z_1^{1/3}}$  виходить за ці межі, то необхідно змінити розміри паза, тобто розміри обмотки міді, скласти нове заповнення паза і знову перевірити величину  $b_{z_1^{1/3}}$ .

### 2.2.20 Перевірка величини індукції у стинці статора

$$B_{a1} = \frac{\Phi_1}{2Q_{a1}}, \text{ Тл}, \quad (2.38)$$

де  $Q_{a1} = h_{a1} \cdot l_{\text{сф}}$  – площа спинки статора, м<sup>2</sup>;

$h_{a1} = 0,5(D_a - D_i) - h_{n1} - a_1$  – висота спинки, м,

звідкіля  $h_{n1}$  – висота паза, отримана в підрозділі 3.18;

$a_1$  – розмір, що враховує ослаблення перерізу спинки стяжними шпильками.

Звичайно приймають  $a_1 = (0,5 \div 1)10^{-2}$ м.

Межі значення  $B_{a1} = 1,3 \div 1,5$  Тл. Якщо отримане значення  $B_{a1}$  не лежить у вказаних межах, то треба відповідно змінити внутрішній діаметр  $D_i$ , залишивши без зміни довжину машини, число витків і розміри паза.

При зміні діаметра  $D_i$  слід уточнити значення  $b_{z_1/3}$  і  $V_{\delta\text{max}}$ . При цьому передбачається, що зміна  $D_i$  не перевищить 2,0 ÷ 3,0%.

Якщо зміна  $D_i$  у зазначених межах не дає необхідного результату, потрібно змінити зовнішній діаметр  $D_a$ , перейшовши на наступний габарит.

### 2.2.21 Уточнене значення щільності струму

$$J_1 = \frac{I_{1\text{фн}} \cdot 10^6}{a \cdot Q_{1\text{сф}}}, \text{ А/м}^2. \quad (2.39)$$

### 2.2.22 Активний електричний опір обмотки статора

а) середня довжина витка частини обмотки статора, м,

$$l_{\text{сеп1}} = 2(l_1 + l_{S1}), \quad (2.40)$$

де  $l_1$  – повна довжина осердя статора;

$l_{S1}$  – середня довжина лобової обмотки статора (дод. Ж);

б) активний опір обмотки при 20°C, Ом,

$$r_{1\text{хол}} = \rho \frac{W_1 \cdot l_{\text{сер1}}}{a \cdot Q_{1\text{еф}}} = \frac{W_1 \cdot l_{\text{сер1}}}{57a \cdot Q_{1\text{еф}}}, \quad (2.41)$$

де  $W_1$  – число витків фази;

$l_{\text{сер1}}$  – середня довжина витка, м;

$Q_{1\text{еф}}$  – переріз активного провідника, мм<sup>2</sup>;

$\rho$  – питомий опір, для міді при температурі

$$T = 20^\circ\text{C} \quad \rho = \frac{1}{57} \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}};$$

$a$  – число паралельних гілок;

в) активний опір обмотки при 75°C, Ом,

$$r_{1\ 75^\circ\text{C}} = r_{1\text{хол}} \cdot K_t = 1,22r_{1\text{хол}}, \quad (2.42)$$

де  $K_t$  – температурний коефіцієнт;

$$K_t = 1 + 0,004(T - t) = 1 + 0,004(75 - 20)^0 = 1,22. \quad (2.43)$$

### 2.2.23 Активний опір у відносних одиницях

$$r_{1\text{в.о.}} = E_{r\text{в.о.}} = \frac{r_{115^\circ\text{C}} \cdot I_{1\text{нф}}}{U_{1\text{нф}}}, \quad (2.44)$$

де  $E_{r\text{в.о.}}$  – активне спадання напруги в обмотці статора при номінальному навантаженні, виражене у в.о. (відносних одиницях);

$U_{1\text{нф}}$  – номінальна фазна напруга, В.

Величину  $r_1$  % визначаємо за формулою

$$r_1 \% = r_{1\text{ в.о.}} \cdot 100 \%. \quad (45)$$

Отримане значення  $r_1$  % звичайно лежить у межах 1,0÷3,0 %.

### 2.2.24 Індуктивний опір обмотки статора

$$X_1 = 15,8 \left( \frac{f}{100} \right) \cdot \left( \frac{W_1}{100} \right)^2 \cdot \frac{\sum \lambda_i \cdot l_i}{q_1 \cdot p}, \text{ Ом}, \quad (2.46)$$

де  $\sum \lambda_i$  – повна питома провідність потоків розсіювання статора (дод. К);

$l_i$  – розрахункова довжина, м.

### 2.2.25 Індуктивний опір обмотки статора у відносних одиницях

$$X_{1\text{в.о.}} = F_{\text{хв.о.}} = \frac{X_1 \cdot I_{1\phi\text{н}}}{U_{1\phi\text{н}}}. \quad (2.47)$$

Індуктивний опір, виражений у відсотках,

$$X_{1\%} = X_{1\text{в.о.}} \cdot 100\%. \quad (2.48)$$

Значення  $X_{1\%}$  лежить в межах  $7,0 \div 16\%$ .

### 2.2.26 Вага обмотки статора

$$G_{\text{м1}} = 3l_{\text{сер1}} \cdot W_1 \cdot a \cdot Q_{1\text{еф}} \cdot \gamma \cdot 10^{-3}, \text{ кг}, \quad (2.49)$$

де  $l_{\text{сер1}}$  – середня довжина витка обмотки статора, м;

$Q_{1\text{еф}}$  – переріз ефективного провідника обмотки, мм<sup>2</sup>;

$a$  – число паралельних гілок;

$\gamma$  – питома вага міді, для голої міді  $\gamma=8,9$ ; для ізольованої  $\gamma=9,8$ .

## 2.3 Проектування індуктора вітрогенератора

### 2.3.1 Поліс індуктора

Поліс звичайно має прямокутний переріз і виготовляється шихтуванням з листів гарячекатаної сталі товщиною  $\Delta = 1,0 \div 1,5$  мм.

На торцях шихтованого полюса розташовані щоки (фланці), які утримують за допомогою заклепок жерсті полюса в запресованому стані (рис. 2.8).

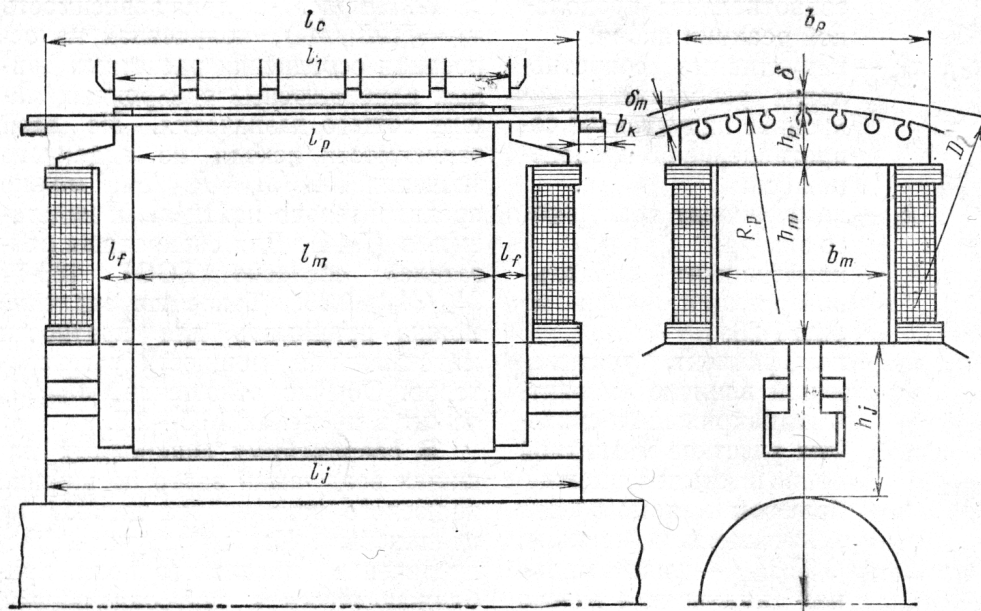


Рисунок 2.8 – Ескіз полюса (розміри ротора синхронної явнополюсної машини)

Товщина фланця  $b_{фл}$  у функції числа пар полюсів наведена у таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 – Визначення товщини фланця

2р	ВКЗ	$\tau$ , м	$V_m$ , Тл	$K_m$	$b_{фл}$ , м
6	1 ÷ 0,8	0,35 ÷ 0,6	1,5 ÷ 1,42	0,15 ÷ 0,19	0,06 ÷ 0,05
8	1,1 ÷ 0,9	0,3 ÷ 0,55	1,48 ÷ 1,4	0,19 ÷ 0,24	0,045 ÷ 0,055
10	1,1 ÷ 0,9	0,25 ÷ 0,52	1,4 ÷ 1,35	0,25 ÷ 0,28	0,05 ÷ 0,035
12	1,2 ÷ 0,95	0,2 ÷ 0,45	1,4 ÷ 1,35	0,33 ÷ 0,28	0,045 ÷ 0,03
16	1,3 ÷ 1,1	0,2 ÷ 0,4	1,3 ÷ 1,25	0,32 ÷ 0,39	0,035 ÷ 0,025
20	1,3 ÷ 1,1	0,2 ÷ 0,35	1,3 ÷ 1,25	0,38 ÷ 0,41	0,025 ÷ 0,015
32	1,5 ÷ 1,1	0,13 ÷ 0,2	1,3 ÷ 1,25	0,5 ÷ 0,56	0,02 ÷ 0,012

Довжина полюса, м,

$$l_m = l_1 + 0,01. \quad (2.50)$$

### 2.3.2 Повітряний зазор під серединою полюса

Попереднє значення величини повітряного зазору під серединою полюса, м,

$$\delta > 0,565BKЗ \frac{A \cdot \tau \cdot 10^{-6}}{B_{\delta \max}} \cdot \frac{K_{обм1} \cdot K_{ad}}{K_{\delta}} = (0,35 \div 0,45)BKЗ \cdot \frac{A \cdot \tau \cdot 10^{-6}}{B_{\delta \max}}, \quad (2.51)$$

де  $K_{обм1}$  – обмотувальний коефіцієнт, приймається рівним 0,92;

$K_{ad}$  – коефіцієнт, що враховує явнополюсне виконання синхронної машини при розрахунку реакції по поздовжній осі,  $K_{ad} = 0,8 \div 0,9$ ;

$K_{\delta}$  – коефіцієнт повітряного зазору, попередньо приймається  $K_{\delta} = 1,15 \div 1,25$ ;

$BKЗ$  – відношення короткого замикання; при  $2p \leq 24$ , для двигунів і генераторів звичайно приймається  $BKЗ = 0,65 \div 0,75$ .

### 2.3.3 Повітряний зазор по краях полюса

Поверхня полюсного наконечника (башмака) окреслюється радіусом  $R_p$ . Для одержання форми ЕРС, близької до синусоїди, звичайно приймають

$$\delta_{\max} = 1,5\delta, \text{ м.} \quad (2.52)$$

### 2.3.4 Ширина полюсного наконечника (башмака)

$$b'_p = \alpha_i \cdot \tau, \text{ м.} \quad (2.53)$$

де  $\alpha_i$  – коефіцієнт полюсного перекриття (конструктивний).

З достатнім ступенем точності можна прийняти  $b_p = b'_p$  (рис. 2.8).

### 2.3.5 Попереднє значення коефіцієнта розсіювання полюса

*в режимі холостого ходу*

Коефіцієнт  $\sigma_m$  залежить від розмірів полюса, тому для попереднього розрахунку слід користуватися наближеною формулою

$$\sigma_m = 1 + \frac{8\delta}{\tau}. \quad (2.54)$$

### 2.3.6 Попереднє значення ширини осердя полюса

$$B_m = \frac{\Phi_m}{(l_m \cdot K_{зан} + 2b_{фл} \cdot K_{фл})B_m} = \frac{\Phi_1 \sigma_m}{(l_m \cdot K_{зан} + b_{фл})B_m}, \text{ м}, \quad (2.55)$$

де  $l_m$  – довжина полюса, м;

$K_{зан}$  – коефіцієнт заповнення при товщині жерсті полюса  $\Delta = 1,0 \div 1,5$  мм;

$K_{зан} = 0,98$ ;

$K_{фл}$  – коефіцієнт, що враховує корисну частину перерізу фланця, по якому проходить магнітний потік,  $K_{фл} = 0,4 \div 0,65$ ;  $K_{фл} \approx 0,5$ ;

$B_m$  – індукція в осерді полюса в режимі холостого ходу (вибираємо за табл. 2.6).

### 2.3.7 Попереднє значення висоти осердя полюса

Висота осердя полюса залежить від висоти котушки обмотки збудження. Котушку полюса великих і середніх синхронних машин звичайно виконують зі смугової міді, гнутої на ребро.

Висоту одношарової котушки, м, попередньо визначають за формулою

$$h_{кот} = \tau \cdot K_m + 0,04, \quad (2.56)$$

де  $K_m$  – коефіцієнт (табл. 6).

Відповідно до попередньо прийнятої висоти котушки висота осердя полюса, м,

$$h_m = h_{кот} + 2h_{рам}, \quad (2.57)$$

де  $2h_{рам}$  – висота двох ізоляційних рамок (шайб), за допомогою яких котушка зверху і знизу ізолюється від полюса;  $h_{рам} = 0,008 \div 0,015$  м.

Матеріал рамки (шайби) – гетинакс або ізоліт.

Висота полюса, а також всі інші попередньо визначені розміри полюса обов'язково перевіряють і остаточно встановлюють при розрахунку обмотки збудження за допомогою масштабного ескізу полюса з обмоткою.

### 2.3.8 Висота полюсного наконечника (башмака)

Звичайно в середній і великій синхронній машинах у полюсні наконечники (башмаки) закладається заспокійлива обмотка, виконувана з міді чи латуні. Для генераторів звичайно беруть мідь. У цьому разі висота полюсного башмака,  $m$ , приблизно визначається за формулою

$$h_p = (0,3 \div 0,4)(b_p - b_m) + d_d, \quad (2.58)$$

де  $d_d$  – діаметр стержня,  $m$ , пускової (чи заспокійливої) обмотки, що встановлюється нижче.

### 2.3.9 Радіус заокруглення полюсного наконечника

$$R_p = \frac{D_i}{2 + 8D_i \cdot \frac{(\delta_{\max} - \delta)}{b_p^2}}, \text{ м.} \quad (2.59)$$

### 2.3.10 Попередні розміри і число стержнів демпферної клітки для генераторів

а) крок демпферної клітки (обмотки) – зубцевий розподіл полюсного башмака  $t_{z_2}$ .

Крок  $t_{z_2}$  може бути більше або менше за крок пазів статора. У першому випадку ( $t_{z_2} > t_{z_1}$ ) беремо  $t_{z_2}$  не менше  $1,15t_{z_1}$ , у другому ( $t_{z_2} < t_{z_1}$ )  $t_{z_2}$  не більше  $0,87t_{z_1}$ . Причому крок  $t_{z_2}$  встановлюється по розточенню статора, а не по дузі полюсного башмака.

Обраний крок  $t_{z_2}$  не повинен викликати надмірних втрат у сталі і явищ прилипання в двигуні.



б) число стержнів на полюс

$$n_2 = \frac{b_P - (0,025 \div 0,04)}{t_{z_2}} + 1. \quad (2.60)$$

в) переріз стержня демпферної клітки генератора, мм<sup>2</sup>,

$$q_{cm} \geq \frac{(0,3 \div 0,6)3q_1 \cdot S_n \cdot Q_{1ef}}{n_2}, \quad (2.61)$$

де  $S_n$  – число ефективних провідників у пазу статора;

$Q_{1ef}$  – переріз ефективного провідника обмотки статора, мм<sup>2</sup>.

Рекомендується приймати нижню межу коефіцієнта – 0,3.

Переріз стержня, мм<sup>2</sup>,

$$q_{cm} = \frac{I_{cm}}{J_{2пуск}}, \quad (2.63)$$

де  $J_{2пуск}$  – припустима щільність струму при пуску; приймаємо 25 ÷ 35 А/мм<sup>2</sup>.

д) діаметр стержня демпферної клітки, мм,

$$d_d = 1,13\sqrt{q_{cm}}. \quad (2.64)$$

За отриманою величиною  $d_d$  вибираємо найближчий нормальний діаметр стержня з ряду 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 і 15 мм.

е) переріз кільця, мм<sup>2</sup>,

$$Q_k = 0,5n_2 \cdot q_{cm}. \quad (2.65)$$

### 2.3.11 Розміри корпусу (обода) індуктора

При розрахунку магнітного ланцюга зневажають величиною сили, що намагнічує (НС) корпусу через її мале значення.

Конструкцію корпусу ротора вибирають залежно від швидкості обертання ротора і діаметра корпусу [4, с. 286].

Спосіб кріплення полюса до корпусу ротора вибирають залежно від величини зусилля, що діє на полюс під час роботи синхронної машини, і від конструкції корпусу ротора [4, с. 206].

Довжина обода, м,

$$l_j = l_m + \Delta l_c. \quad (2.66)$$

Для великих машин  $\Delta l_c = (10 \div 15) \cdot 10^{-2}$  м; для середніх дорівнює  $(4 \div 5) \cdot 10^{-2}$  м, для малих – 0.

Товщина обода, м,

$$h_j = \frac{\alpha_i \cdot B_{\delta \max} \cdot \tau \cdot l_i \cdot \sigma_m}{2B_j \cdot l_j}. \quad (2.67)$$

Індукцію  $B_j$  вибирають в межах  $1 \div 1,3$  Тл.

Розрахункова довжина осердя полюса, м,

$$l'_m = l_m + l_f, \quad (2.68)$$

де  $l_f$  – товщина однієї щоки полюса,  $l_f = (1,5 \div 3) \cdot 10^{-2}$  м.

### 2.3.12 Розрахунок характеристики холостого ходу

Результати обчислень характеристики холостого ходу заносимо до таблиці 2.7. Нижче наведені пояснення з окремих пунктів цієї таблиці.

Розрахунок НС ведуть на один полюс:

а) марки сталі статора і полюса вибирають за додатком Л;

б) довжини силової лінії окремих ділянок магнітопроводу:  
у зазорі

$$l_{\delta} = \delta \cdot K_{\delta 1}, \quad (2.69)$$

де  $K_{\delta 1}$  – коефіцієнт повітряного зазору для відкритих пазів,

$$K_{\delta 1} = \frac{5 + \frac{b_{n1}}{\delta}}{5 + \frac{b_{n1}}{\delta} \cdot \frac{b_{z1}}{t_{z1}}}; \quad (2.70)$$

у зубцях статора

$$l_{z1} = h_{n1}; \quad (2.71)$$

у спинці статора

$$l_{n1} = \frac{\pi \cdot D_a}{4p}; \quad (2.72)$$

у полюсі

$$L_m = h_m + 0,2h_p; \quad (2.73)$$

в) перерізи ділянок магнітопроводу визначені раніше (див. підрозділи 2.3.9, 2.3.19, 2.3.20).

Переріз полюса,  $m^2$  визначають за формулою

$$Q_m = b_m \cdot l_m \cdot K_{zan} + 2b_m \cdot b_{\phi l} \cdot K_{\phi l}; \quad (2.74)$$

Таблиця 2.7 – Характеристика холостого ходу

$E_1$	Одиниця виміру	0,58U <sub>1нф</sub>	0,1U <sub>1нф</sub>	1,21U <sub>1нф</sub>	1,33U <sub>1нф</sub>
$\Phi$	Вб				
$B_\delta = \frac{\Phi_1}{Q_\delta}$	Тл				
$B_{z_1^{1/3}} = \frac{\Phi_1}{Q_{z_1^{1/3}}}$	Тл				
$B_{a_1} = \frac{\Phi_1}{2Q_{a_1}}$	Тл				
$H_{z_1}$	А/м				
$H_{a_1}$	А/м				
$F_\delta = 0,8\delta \cdot K_{\delta 1} \cdot B_\delta \cdot 10^6$	А				
$F_{z_1} = H_{z_1} \cdot l_{z_1}$	А				
$F_{a_1} = H_{a_1} \cdot l_{a_1}$	А				
$F_\delta + F_{z_1} + F_{a_1}$	А				
$\Phi_\delta = (F_\delta + F_{z_1} + F_{a_1}) \cdot \lambda_{mp} \cdot 10^{-8}$	Вб				
$\Phi_m = \Phi_1 + \Phi_\delta$	Вб				
$B_m = \frac{\Phi_m}{Q_m}$	Тл				
$H_m$	А/м				
$F_m = H_m \cdot l_m$	А				
$F_{\delta m} = 0,016B_m \cdot 10^4$	А				
$\sum F = F_\delta + F_{z_1} + F_{a_1} + F_m + F_{\delta m}$	А				
$\frac{\sum F}{\sum F_{E=1}}$	Во				
$I_b = \frac{\sum F}{W_2}$	А				

г) потік полюса. При попередніх розрахунках він обчислюється приблизно, після визначення розмірів полюса (попередніх) слід розрахувати більш точно потік полюса

$$\Phi_m = \Phi_1 + \Phi_\delta; \quad (2.75)$$

$$\Phi_\delta = (F_\delta + F_{z_1} + F_{a_1}) \cdot \lambda_{mp} \cdot 10^{-8}; \quad (2.76)$$

де  $\Phi_\delta$  – потік розсіювання полюса в режимі холостого ходу;

$\lambda_{mp}$  – повна провідність полюсів (дод. М).

Визначаємо коефіцієнт розсіювання полюсів:

$$G_m = 1 + \frac{\Phi_\delta}{\Phi_1}; \quad (2.77)$$

д) величину напруженості  $H_{z_1}$ ,  $H_{a_1}$ ,  $H_m$  знаходимо для прийняття сталі залежно від індукції в додатку 6;

е) величиною НС ярма індуктора в розрахунку звичайно зневажають;

ж) розраховуємо НС. зубців статора, коли  $B_{z_1/3}$  визначаємо по кривих намагнічування, приведеним на рис. 2.9, 2.10, 2.11, за коефіцієнтом

$$K_{z_1} = \frac{t_{z_1/3} - 0,93b_{z_1/3}}{0,93b_{z_1/3}}; \quad (2.78)$$

з) визначаємо величину НС додаткового повітряного зазору під башмаком полюса  $F_{\delta m}$ .

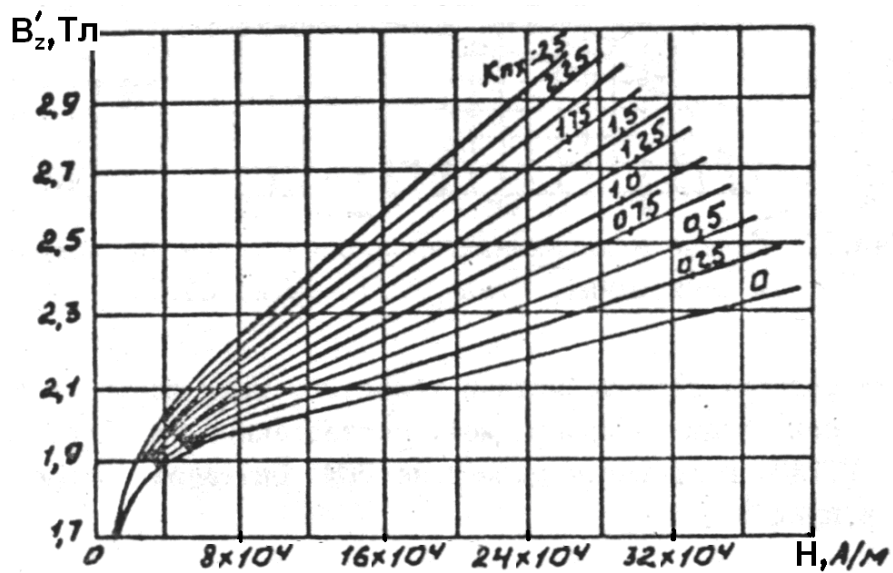


Рисунок 2.9 – Криві намагнічування сталі 1411 (до визначення магнітного напруження зубців машин сталого струму і синхронних)

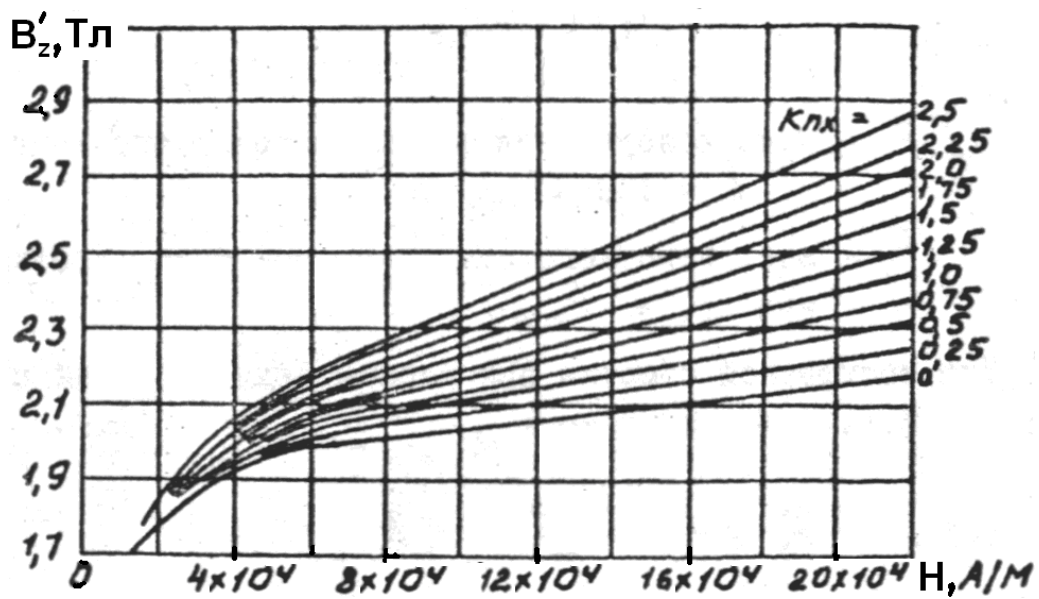


Рисунок 2.10 – Криві намагнічування сталей 1511, 1512, 1513 (до визначення магнітного напруження зубців машин сталого струму і синхронних)

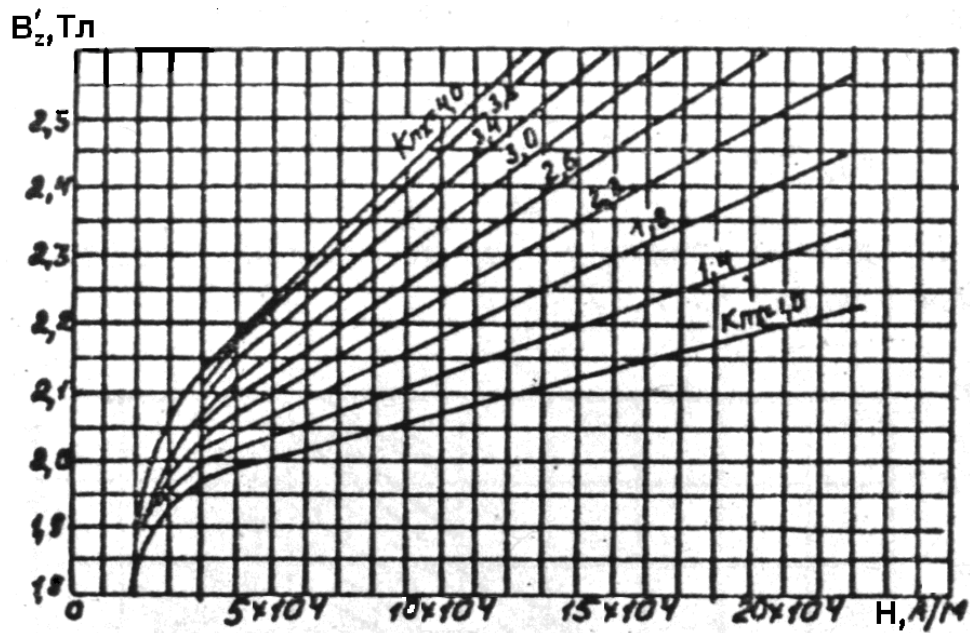


Рисунок 2.11 – Криві намагнічування зубців машин сталого струму і синхронних. Сталь 2211, 2312, 2411

### 2.3.13 Перевірка значення ВКЗ

$$BKЗ = \frac{\sum F}{F_k}, \quad (2.79)$$

де  $\sum F$  – НС в режимі холостого ходу при  $E = 1,0 U_{1\phi n}$  ;

$F_k$  – НС короткого замикання при струмі короткого замикання  $I_k = I_{1\phi n}$  .

Для трифазної обмотки при ширині індукційної сторони фази в  $60^\circ$  НС реакції статора

$$F_r = \frac{1,1W_1 \cdot I_{1\phi n}}{p} \cdot K_y, \quad (2.80)$$

де  $I_{1\phi n}$  – номінальний струм фази статора.

Силу короткого замикання, що намагнічує, визначаємо за формулою

$$F_k = F_r + X_{1e.o.} (F_{\delta E=1} + F_{\delta m E=1}), \quad (2.81)$$

де  $F_{\delta E=1}$ ,  $F_{\delta m E=1}$  – відповідні н.с. при  $E = 1,0 U_{1\phi n}$ .

Отримане значення ВКЗ повинне знаходитися в межах  $0,9 \div 1,2$ .

Якщо при перевірці виявиться, що значення ВКЗ відрізняється від попередньо прийнятого значення більше, ніж на 10 %, то треба змінити зазор, внести відповідні зміни в обчислення НС і знову перевірити ВКЗ.

#### 2.3.14 НС обмотки, що намагнічує, при номінальному навантаженні

Для розрахунку НС при навантаженні необхідно визначити НС магнітного кола при навантаженні. Для цього прорахуємо одну точку кривої намагнічування при навантаженні, що відповідає результуючій ЕРС в обмотці статора.

– Результуюча ЕРС в обмотці статора генератора при відстаючому струмі

$$E_{ge} = \sqrt{(\cos \varphi + E_{rge})^2 + (\sin \varphi + E_{xge})^2} . \quad (2.82)$$

– Результуюча ЕРС в обмотці статора двигуна при випереджальному струмі

$$E_{ge} = \sqrt{(\cos \varphi - E_{rge})^2 + (\sin \varphi + E_{xge})^2} . \quad (2.83)$$

– Активне та індуктивне спадання напруги, В,

$$E_r = E_{rbc} \cdot U_{1fn}; \quad E_x = E_{xbc} \cdot U_{1fn}. \quad (2.84)$$

– Магнітний потік при навантаженні

$$\Phi_{1n} = \Phi_1 E_{bc} , \quad (2.85)$$

де  $\Phi_1$  – магнітний потік у режимі холостого ходу при  $1,0 U_{1fn}$ .

– НС магнітного ланцюга, що відповідає ЕРС

$$F_E = F_{\delta E} + F_{aE} + F_{zE} + F_{mE} + F_{\delta\delta\delta E} , \quad (2.86)$$

де  $F_{\delta E}, F_{aE}, F_{zE}$  – НС, обчислені для індукцій, що відповідають потоку навантаження  $\Phi_{1n}$ ;

$F_{mE}, F_{\delta\delta\delta E}$  – НС, обчислені для індукції  $B_{mE}$ ;



– Індукція полюса

$$B_{mE} = \frac{\Phi_{mE}}{Q_m}, \quad (2.87)$$

$$\Phi_{mE} = \Phi_{1H} + \Phi_{\delta} = \Phi_{1H} + \lambda_{mp} (F_{\delta E} + F_{aE} + F_{zE} + K_e \cdot F_r) \cdot 10^{-8}, \quad (2.88)$$

де  $K_e$  – коефіцієнт, що залежить від  $\cos \varphi$ , визначають за рисунком 2.12;

$F_r$  – НС реакції статора.

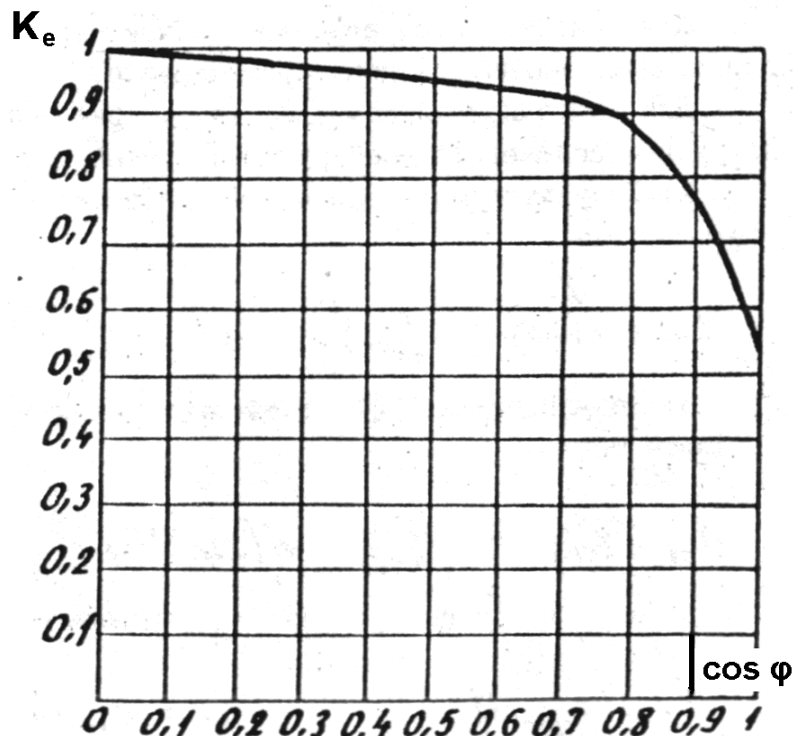


Рисунок 2.12 – До визначення НС при навантаженні синхронних машин, коефіцієнт  $K_e$

– Величину НС обмотки збудження при навантаженні знаходять за векторною діаграмою Потьє (рис. 2.13).

Побудову спрощеної діаграми виконують в наступному порядку. Під кутом  $\varphi$  до вектора струму (з урахуванням знака  $\varphi$ ) відкладаємо вектор напруги  $U_{1\phi H}$ , до нього додаємо вектор спадання напруги в обмотці статора (індуктивне  $E_x$  і омичне  $E_r$ , виражені у вольтах). Результуючий вектор  $E$  представляє результуючу ЕРС обмотки статора при навантаженні.

Перпендикулярно до вектора  $E$  відкладаємо вектор  $F_E$ . З кінця вектора  $F_E$  паралельно напрямку вектора струму відкладаємо вектор  $F_r$  реакції обмотки статора  $F_r$ .

Результуючий вектор  $F_{3H}$  представляє  $H$  обмотки збудження при номінальному навантаженні.

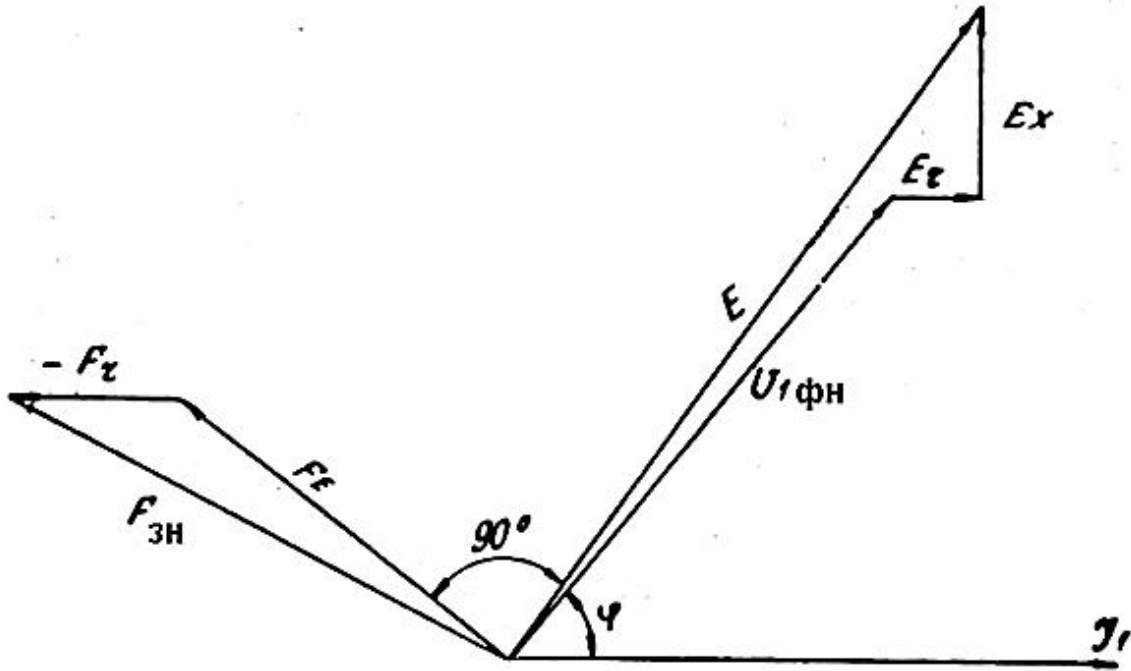


Рисунок 2.13 – Діаграма генератора при відстаючому струмі

### 2.3.15 Переріз провідника обмотки збудження

$$q_{m2} = K_{33} \cdot K_t \frac{2p \cdot l_{сер2} \cdot F_{3H}}{57(U_2 - \Delta U_2)}, \text{ мм}^2, \quad (2.89)$$

де  $K_{33}$  – коефіцієнт запасу збудження,  $K_{33} = 1,15 \div 1,25$ ;

$K_t$  – температурний коефіцієнт,  $K_t = 1,32$ ;

$l_{сер2}$  – середня довжина витка обмотки збудження, м;

$U_2$  – напруга збудження, В;

$\Delta U_2$  – спадання напруги в щітковому контакті,  $\Delta U_2 = 3 \div 5$  В.

Обмотку збудження при потужності синхронної машини вище 250 кВт звичайно виконують зі смугової міді, гнутої на ребро. Смугову мідь можна гнути, якщо її товщина більше 14,5 мм (але не більше 60 мм), а по перерізу більше 30 мм<sup>2</sup>. Одношарові обмотки зі смугової міді, намотаної на ребро, дуже доцільні, тому що забезпечують найкращі умови охолодження і допускають більш високе навантаження за струмом в порівнянні з багатошаровими. Тому в синхронних машинах середньої потужності для виготовлення такої обмотки застосовують збуджувачі з нестандартною величиною напруги 40, 55, 65, 80 і 100 В. У великих синхронних машинах одношарову обмотку виготовляють для стандартних значень напруги збудження 115 і 230 В.

Для обчислення перерізу знаходимо попереднє значення середньої довжини витка обмотки, м,

$$l_{сер2} = 2[l_m + (b_m - 2b_{фл})] + \pi \cdot R_a, \quad (2.90)$$

де  $R_a$  – середній радіус заокруглення, м,

$$R_a = b_{фл} + 0,5b_{m2} + a, \quad (2.91)$$

де  $b_{фл}$  – товщина фланця (див. табл. 2.6);

$a = 0,005$  м – для плоского фланця;  $a = 0,0075$  м – для напівкруглого фланця;

$b_{m2}$  – ширина міді, попередньо приймають  $b_{m2} = 0,02 \div 0,04$  м.

### 2.3.16 Попереднє значення числа витків обмотки збудження і розмірів міді

а. Вибір щільності струму. Щільність струму  $J_{m2}$  в режимі номінального навантаження одношарової обмотки збудження лежить в межах  $4,5 \div 3$  А/мм<sup>2</sup>.

б. Попереднє значення струму збудження при номінальному навантаженні, А,

$$I_{3H} = q_{m2} \cdot J_{m2}. \quad (2.92)$$

в. Попереднє значення числа витків одного полюса

$$W_2 = \frac{F_{3H}}{i_{3H}}. \quad (2.93)$$

г. Попереднє значення висоти міді обмотки, мм

$$a_{m2} = \frac{h_m - 2h_{рам}}{W_2} - 0,25, \quad (2.94)$$

де  $h_m$  – висота полюса, мм;

$h_{рам}$  – висота гетинаксової рамки, рівна  $10 \div 15$  мм;

0,25 – товщина азбестової прокладки, мм.

Величину  $a_{m2}$  округляємо до найближчого стандартного розміру (дод. Д).

Осердя полюса ізолюємо проложенням азбестовим папером товщиною 0,3 мм і формувальним міканітом 0,3 мм. Загальна однобічна товщина ізоляції полюса складає 6 мм (клас ізоляції В).

д. Ширина міді. За перерізом  $q_{m2}$  і висотою  $a_{m2}$  вибираємо найближче значення ширини міді  $b_{m2}$  (дод. Д), уточнюємо переріз (дод. Д) і перевіряємо щільність струму, А/мм<sup>2</sup>:

$$J_{m2} = \frac{i_{3H}}{q_{m2}}. \quad (2.95)$$

е. Перевірка відношення  $b_{m2}/a_{m2}$ , що з технічних міркувань повинне задовольняти умові  $(b_{m2}/a_{m2}) < 35$ .

### 2.3.17 Уточнення розмірів обмотки збудження

а. На масштабному ескізі вичерчуємо пари полюсів з обмоткою збудження і визначаємо мінімальну відстань між обмотками (котушками). Для  $2p \leq 10$  ця величина має бути більше  $5 \div 10$  мм.

б. Уточнюємо розміри міді, число витків, висоту котушок, висоту і ширину полюса.

Висоту осердя полюса, мм, визначаємо за формулою

$$h_m = \left( W_2 + \frac{1}{2} \right) a_{m2} + \Delta_{iz} \left( W_2 - \frac{1}{2} \right) + 2h_p + \Delta_{укл}, \quad (2.96)$$

де  $\Delta_{iz}$  – товщина азбестової прокладки, рівна 0,25 мм;

$h_p$  – товщина рамки, приймають  $10 \div 15$  мм;

$\Delta_{укл}$  – технологічний допуск, рівний  $0,8 \div 1,5$  мм.

### 2.3.18 Уточнення розрахунку характеристики холостого ходу і НС

Якщо розміри полюса після їхнього уточнення змінені більше, ніж на 5 %, то в розрахунок характеристики холостого ходу і в розрахунок НС при номінальному навантаженні вносимо відповідні уточнення.

### 2.3.19 Опір обмотки збудження в холодному стані ( $20^\circ\text{C}$ )

$$R_{2хол} = \frac{2p \cdot W_2 \cdot l_{сер2}}{57q_{m2}}, \text{ Ом.} \quad (2.97)$$

### 2.3.20 Опір обмотки збудження в гарячому стані

$$R_{2гар} = R_{2хол} \cdot K_t, \text{ Ом,} \quad (2.98)$$

де  $K_t$  – температурний коефіцієнт; для ізоляції класу В  $K_t = 1,4$ .

### 2.3.21 Максимальний струм збудження

$$i_{з\max} = \frac{U_2 - \Delta U_{щ}}{R_{2зар}}, \text{ А}, \quad (2.99)$$

де  $\Delta U_{щ}$  – спадання напруги в щітковому контакті (3 ÷ 5 В).

### 2.3.22 Струм збудження при номінальному навантаженні

$$i_{зн} = \frac{F_{зн}}{W_2}, \text{ А}. \quad (2.100)$$

### 2.3.23 Запас збудження

$$K_{зз} = \frac{i_{з\max}}{i_{зн}}. \quad (2.101)$$

Запас збудження повинен бути більше 15 %, тобто необхідно, щоб  $K_{зз} > 1,15$ .

### 2.3.24 Вага міді обмотки збудження

$$G_{m2} = 2p \cdot l_{сер2} \cdot W_2 \cdot q_{m2} \cdot \gamma \cdot 10^{-3}, \text{ кг}, \quad (2.102)$$

де  $l_{сер2}$  – середня довжина витка, м;

$q_{m2}$  – переріз міді, мм<sup>2</sup>;

$\gamma$  – питома вага міді, для голої міді  $\gamma = 8,9$ .

### 2.3.25 Питома витрата міді обмотки збудження

$$q_{m2} = \frac{G_{m2}}{P_n}, \text{ кг/кВт.} \quad (2.103)$$

Значення питомої витрати міді знаходиться в межах  $0,3 \div 0,9$  кг/кВт.

## 2.4 Втрати і ККД у режимі нормального навантаження

### 2.4.1 Втрати в режимі холостого ходу

а. Механічні втрати, кВт,

$$P_{\text{мех}} = 3,68\rho \left( \frac{V_{\kappa}}{40} \right)^3 \sqrt{l_1}, \quad (2.104)$$

де  $V_{\kappa}$  – колова швидкість ротора, м/с,  $V_{\kappa} = \frac{\pi \cdot D_i \cdot n}{60}$ .

б. Втрати в сталі осердя статора, кВт:

у спинці жерсті

$$P_{\text{ста}} = 2\rho \cdot \Phi_1 \cdot K_{f_1} \cdot l_{a_1} \cdot B_a, \quad (2.105)$$

у зубцях

$$P_{\text{смz}} = 2\rho \cdot \Phi_1 \cdot K_{f_2} \cdot l_{z_1} \cdot B_{z_1}, \quad (2.106)$$

де  $l_{a_1}$ ,  $l_{z_1}$  – довжини ділянок магнітопроводу, м;

$\Phi_1$  – магнітний потік статора, Вб;

$p$  – число пар полюсів;

$B_{a_1}$ ,  $B_{z_1}$  – індукції в режимі холостого ходу при  $E = 1,0 U_{1\text{фн}}$ ;

$K_{f_1}$ ,  $K_{f_2}$  – коефіцієнти, що залежать від сорту сталі (табл. 2.8).

Таблиця 2.8 – Визначення коефіцієнтів

Сталь	1411	1511	1211
$K_{f1}$	20,2	15,7	33,4
$K_{f2}$	31,2	24,2	51,5

в. Втрати в полюсних башмаках, кВт,

$$P_p = K_p \left( \frac{z_1 \cdot n_1}{10^4} \right)^{1,5} \cdot (B_p \cdot t_{z_1}) \cdot S \cdot 10^{-3}, \quad (2.107)$$

де  $z_1$  – число пазів статора;

$n_1$  – швидкість обертання;

$t_{z_1}$  – зубцевий розподіл у розточенні, м;

$S$  – поверхня полюсних башмаків, м<sup>2</sup>,

$$S = 2p \cdot b_p \cdot l_p, \quad (2.108)$$

$$B_p = \beta_p \cdot K_{\delta 1} \cdot B_{\delta \max}, \quad (2.109)$$

де  $K_{\delta 1}$  – коефіцієнт повітряного зазору;

$B_{\delta \max}$  – індукція в зазорі при холостому ході, Тл.

Коефіцієнти  $\beta_p$ ,  $K_p$  визначають за таблицями 2.9, 2.10 залежно від товщини жерсті полюса  $\Delta_{ж}$ , мм.

Таблиця 2.9 – Визначення коефіцієнта  $K_p$

$\Delta_{ж}$ , мм	0,5	1,0	2,0
$K_p$	2,8	5,0	8,6

Таблиця 2.10 – Визначення коефіцієнта  $\beta_p$

$B_m / \delta$	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0
$\beta_p$	0,075	0,15	0,225	0,28	0,32	0,35

г. Повні втрати холостого ходу, кВт,

$$P_{xx} = P_{\text{мех}} + P_{\text{ста}} + P_{\text{смz}} + P_p. \quad (2.110)$$



#### 2.4.2 Електричні втрати в статорній обмотці (втрати в міді)

$$P_{m1} = 3I_{1\phi n}^2 \cdot r_{115^\circ C} \cdot 10^{-3}, \text{ кВт.} \quad (2.111)$$

#### 2.4.3 Додаткові втрати

В основному ці втрати складаються із втрат від поверхневого ефекту в пазових частинах статорної обмотки, втрат від третьої гармоніки, втрат у натискних сегментах статора.

З достатньою точністю можна оцінити додаткові втрати у відсотках від номінальної потужності, кВт:

- а) для машин до 100 кВт – 0,5 %;
- б) для машин понад 100 кВт – 0,25 ÷ 0,4 %.

#### 2.4.4 Втрати на збудження

$$P_3 = \frac{i_{3n}^2 \cdot R_{2_{75^\circ C}}}{\eta_3} \cdot 10^{-3}, \text{ кВт,} \quad (2.112)$$

де  $i_{3n}$  – номінальний струм збудження;

$$R_{2_{75^\circ C}} = R_{2_{хол}} \cdot K_t = 1,22R_{2_{хол}};$$

$\eta_3$  – ККД збуджувача, приблизно 0,8.

#### 2.4.5 Повні втрати машини

$$\sum P = P_{xx} + P_{m1} + P_3 + P_{доод}, \text{ кВт,} \quad (2.113)$$

де  $P_{доод}$  – додаткові втрати при номінальному навантаженні.

#### 2.4.6 Коефіцієнт корисної дії при номінальному навантаженні

$$\eta = \left( 1 - \frac{\sum P}{S_n' \cdot \cos \varphi + \sum P} \right) \cdot 100\%; \quad (2.114)$$

## 2.5 Розрахунок нагрівання обмотки статора й обмотки збудження

### 2.5.1 Перевищення температури сталі статора над температурою навколишнього повітря

$$\Delta t_{cm} = \frac{(W_1 + W_2)\gamma_{cm}}{1 + 0,1V_k}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (2.115)$$

де  $W_1$  – питоме теплове навантаження від втрат у сталі статора, віднесене до поверхні розточення статора, Вт/м<sup>2</sup>,

$$W_1 = \frac{P_{cm}}{\pi \cdot D_i \cdot l_{cm}}, \quad (2.116)$$

де  $P_{cm} = P_{cma} + P_{cmz}$  – втрати в сталі статора, Вт;

$l_{cm}$  – довжина осердя статора без вентиляційних каналів, м;

$l_{cm} = n_{нак} \cdot l_{нак}$ ;

$D_i$  – діаметр розточення, м;

$V_k$  – колова швидкість індуктора, м/с;

$W_2$  – питоме теплове навантаження від втрат у міді обмотки статора, віднесене до поверхні розточення статора, Вт/м<sup>2</sup>,

$$W_2 = \frac{A \cdot J_1}{\gamma_t}, \quad (2.117)$$

де  $\gamma_t$  – постійна, залежна від температури нагрівання обмотки; для обмотки статора з ізоляцією класу В  $\gamma_t = 40 \cdot 10^6$  См/м, для обмотки статора з ізоляцією класу А  $\gamma_t = 42,5 \cdot 10^6$  См/м;

$\gamma_{cm}$  – постійна, що характеризує тепловіддачу статора. Залежно від величини відношення повної довжини  $l_l$  до полюсного розподілу  $\tau$  ця постійна повинна бути прийнята за таблицею 2.11.

Таблиця 2.11 – Визначення постійної  $\gamma_{cm}$

$\frac{l_1}{\tau} \leq 2$	$2 < \frac{l_1}{\tau} < 4$	$4 < \frac{l_1}{\tau} < 5$
$\gamma_{cm} = 125 \cdot 10^{-4}$	$\gamma_{cm} = 150 \cdot 10^{-4}$	$\gamma_{cm} = 175 \cdot 10^{-4}$

2.5.2 *Перевищення температури зовнішньої поверхні лобових частин обмотки статора над температурою навколишнього повітря*

$$\Delta t_s = \frac{W_3}{13,3(1 + 0,07V_k)}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (2.118)$$

де  $W_3$  – питоме теплове навантаження від втрат у міді обмотки статора, віднесене до поверхні пазів статора, Вт/м<sup>2</sup>,

$$W_3 = W_2 \frac{t_{z_1}}{P_{z_1}}, \quad (2.119)$$

де  $t_{z_1}$  – зубцевий розподіл статора в розточенні;

$P_{z_1}$  – периметр паза,  $P_{z_1} = 2(h'_{n_1} + b_{n_1})$ ;

$h'_{n_1}$  – висота паза до клина.

2.5.3 *Середній перепад температури в ізоляції обмотки статора*

$$\Delta t_{iz} = \frac{\delta'}{0,16} W_3, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (2.120)$$

де  $\delta'$  – однобічна товщина ізоляції, мм;

$$\delta' = \frac{1}{2} [b_{n_1} - (b_{.m_1} + \delta_{.m_1})],$$

де  $b_{n_1}$  – ширина паза статора;

$b_{.m_1}$  – повна ширина голої міді у пазу;

$\delta_{.m_1}$  – допуск на мідь за шириною, прийнятий при заповненні паза.

2.5.4 *Середнє перевищення температури міді обмотки статора над температурою навколишнього повітря*

$$\Delta t_{\text{м1}} = \frac{1}{0,5l_{\text{сер1}}} [(\Delta t_{\text{см}} + \Delta t_{\text{із}})l_{\text{см}} + (\Delta t_{\text{с}} + \Delta t_{\text{із}})(0,5l_{\text{сер1}} - l_{\text{см}})], \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (2.121)$$

де  $l_{\text{сер1}}$  – середня довжина витка обмотки статора.

Отримані значення перегріву не повинні перевищувати:  $65^\circ\text{C}$  – для ізоляції класу А;  $85^\circ\text{C}$  – для ізоляції класу В.

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кривцов В. С. Неисчерпаемая энергия Кн. 1 Ветроэлектрогенераторы : учебник / В. С. Кривцов, А. М. Олейников, А. И. Яковлев. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т «Харьков. авиац. ин-т» ; Севастополь : Севаст. нац. техн. ун-т, 2003. – 400 с.
2. Wilson R. E. Aerodynamic performance of wind turbines / R. E. Wilson, R. B. S. Lissaman, S. N. Walker. – Washington, 2016. – 194 p.
3. Расчет и проектирование ветроэлектрических установок с горизонтально-осевой ветротурбиной и синхронным генератором на постоянных магнитах : учеб. пособие по курсовому проектированию / [А. И. Яковлев, М. А. Затучная, В. Н. Меркушев, В. Н. Пашков]. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т «Харьков. авиац. ин-т», 2003. – 125 с.
4. Копылов И. П. Проектирование электрических машин / И. П. Копылов. – Москва : Энергия, 1980.

## ДОДАТКИ

### ДОДАТОК А

Таблиця А.1 – Вхідні дані для аеродинамічного розрахунку вітроколеса

Найменування параметра	Позначення	Одиниці виміру	ВАРІАНТ														
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Номінальна потужність	$N$	Вт	450	650	540	580	540	600	550	510	600	550	540	500	520	570	600
Середньорічна швидкість вітру	$V_{c.p.}$	м/с	4,57	4,27	4,17	4,7	4,17	4,37	4,2	4,37	4,37	4,4	4,17	4,1	4,5	4,37	4,0
Швидкість вітру в пориві	$V_{пор}$	м/с	40	42	41	40	45	41	43	40	45	40	41	43	42	40	44
Кількість лопатей	$i_l$	о. е.	3	4	3	4	3	4	3	4	3	4	3	4	3	4	3
ККД електричний	$\eta_{ел}$	о. е.	0,71	0,75	0,78	0,71	0,78	0,75	0,74	0,76	0,73	0,72	0,78	0,78	0,71	0,73	0,75
ККД механічний (трансмисії)	$\eta_{мех}$	о. е.	0,92	0,88	0,9	0,94	0,9	0,94	0,9	0,91	0,94	0,9	0,9	0,89	0,9	0,94	0,9
Густина повітря при норм. атмосферних умовах	$\rho$	кг/ м <sup>3</sup>	1,23	1,25	1,35	1,5	1,55	1,15	1,35	1,13	1,5	1,25	1,45	1,3	1,15	1,25	1,5

Продовження таблиці А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Попередньо заданий коефіцієнт швидкості на кінці лопаті в робочій точці характеристики вітроколеса	$Z_R$	о. е.	6,7	6,25	6,4	6,2	6,4	6,2	6,4	6,2	6,2	6,4	6,4	6,42	6,4	6,2	6,35
Відносний радіус розміщення кореневого перерізу лопаті	$\bar{r}_0$	о. е.	0,22	0,24	0,25	0,21	0,25	0,21	0,25	0,2	0,21	0,25	0,25	0,21	0,25	0,21	0,22
Число перерізів лопаті	$n$	о. е.	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Число точок ділення заданого інтервалу коефіцієнту гальмування для вибору його оптимального значення	$ne$	о. е.	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Відносна товщина профілю лопаті біля кореня	$\bar{c}_{корн}$	о. е.	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20

Продовження таблиці А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Відносна товщина профілю лопаті на периферії	$\bar{c}_{периф}$	о. е.	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Поправочний коефіцієнт при розрахунку коефіцієнта потужності	$K_{пот}$	о. е.	0,84	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,79	0,81	0,81	0,81	0,8	0,81	0,81	0,81
Номинальна потужність	$N$	Вт	600	550	640	680	540	550	650	610	500	650	640	610	520	570	500
Середньорічна швидкість вітру	$V_{с.р.}$	м/с	4,2	4,1	4,4	4,37	4,27	4,17	4,22	4,37	4,47	4,14	4,27	4,16	4,35	4,31	4,20
Швидкість вітру в пориві	$V_{пор}$	м/с	44	42	41	40	45	41	43	40	45	40	41	43	42	40	44
Кількість лопатей	$i_l$	о. е.	3	4	3	4	3	4	3	4	3	4	3	4	3	4	3
ККД електричний	$\eta_{ел}$	о. е.	0,7	0,75	0,78	0,71	0,78	0,75	0,74	0,76	0,73	0,72	0,78	0,78	0,71	0,73	0,75
ККД механічний (трансмисії)	$\eta_{мех}$	о. е.	0,9	0,88	0,9	0,94	0,9	0,94	0,9	0,91	0,94	0,9	0,9	0,89	0,9	0,94	0,9
Густина повітря при норм. атмосферних умовах	$\rho$	кг/ м <sup>3</sup>	1,23	1,25	1,35	1,5	1,55	1,15	1,35	1,13	1,5	1,25	1,45	1,3	1,15	1,25	1,5



Продовження таблиці А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Попередньо заданий коефіцієнт швидкості на кінці лопаті в робочій точці характеристики вітроколеса	$ZR$	о. е.	6,5	6,25	6,4	6,2	6,4	6,2	6,4	6,2	6,2	6,4	6,4	6,42	6,4	6,2	6,35
Відносний радіус розміщення кореневого перерізу лопаті	$\bar{r}_0$	о. е.	0,22	0,24	0,25	0,21	0,25	0,21	0,25	0,2	0,21	0,25	0,25	0,21	0,25	0,21	0,22
Число перерізів лопаті	$n$	о. е.	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Число точок ділення заданого інтервалу коефіцієнту гальмування для вибору його оптимального значення	$ne$	о. е.	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Відносна товщина профілю лопаті біля кореня	$\bar{c}_{корн}$	о. е.	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20

Закінчення таблиці А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Відносна товщина профілю лопаті на периферії	$\bar{c}_{периф}$	о. е.	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Поправочний коефіцієнт при розрахунку коефіцієнта потужності	$K_{пот}$	о. е.	0,82	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,79	0,81	0,81	0,81	0,8	0,81	0,81	0,81

## ДОДАТОК Б

Таблиця Б.1 – Координати та аеродинамічні характеристики профілю GOE–225

Найменування параметрів		Кут атаки	Коефіцієнт підйомної сили	Коефіцієнт зворотної аеродинамічної якості
Позначення		$\alpha$	$C_{y_a}$	$\mu_a$
Одиниці виміру		градус	о. е.	о. е.
Номер точки характеристики	1	– 9°	0,036	0,375
	2	– 6°	0,39	0,029487
	3	– 3°	0,746	0,014477
	4	0°	1,004	0,010956
	5	3°	1,173	0,010315
	6	6°	1,303	0,012203
	7	9°	1,394	0,016141
	8	12°	1,448	0,01989
	9	15°	1,463	0,026179
	10	18°	1,439	0,034677
	11	20°	1,398	0,043634

## ДОДАТОК В

Таблиця В.1 – Безрозмірні координати профілю GOE–225

<i>Номер точки</i>	$\bar{x} = (x/b)100\%$	$\bar{y}_n = (y_n/c)100\%$	$\bar{y}_e = (y_e/c)100\%$
1	2	3	4
1	0,000000	0,000000	0,000000
2	0,002013	– 0,010243	0,011270
3	0,008035	– 0,013491	0,022844
4	0,018019	– 0,017179	0,034372
5	0,031883	– 0,020887	0,046358
6	0,049516	– 0,022942	0,058311
7	0,070776	– 0,023356	0,071707
8	0,095492	– 0,022070	0,084154
9	0,123464	– 0,020322	0,094936
10	0,154469	– 0,017937	0,104581
11	0,188255	– 0,014533	0,112767
12	0,224552	– 0,009784	0,119600
13	0,263066	– 0,004074	0,125063
14	0,303488	0,002085	0,128937
15	0,345492	0,008207	0,130725
16	0,388740	0,014348	0,130782
17	0,432883	0,020549	0,129091
18	0,477568	0,026321	0,125849
19	0,522432	0,031183	0,121756
20	0,567117	0,034866	0,116803
21	0,611261	0,037068	0,110663
22	0,654509	0,037447	0,103439
23	0,696513	0,036513	0,095178

Продовження таблиці В.1

1	2	3	4
24	0,736934	0,034260	0,085079
25	0,775449	0,031068	0,074456
26	0,811745	0,026906	0,063631
27	0,845531	0,022255	0,053260
28	0,876536	0,017986	0,043744
29	0,904509	0,014001	0,035059
30	0,929224	0,009913	0,027015
31	0,950485	0,006382	0,020078
32	0,968117	0,003041	0,013996
33	0,981982	0,000414	0,009215
34	0,991965	-0,001478	0,005771
35	0,997987	-0,002619	0,003694
36	1,000000	0,000000	0,000000

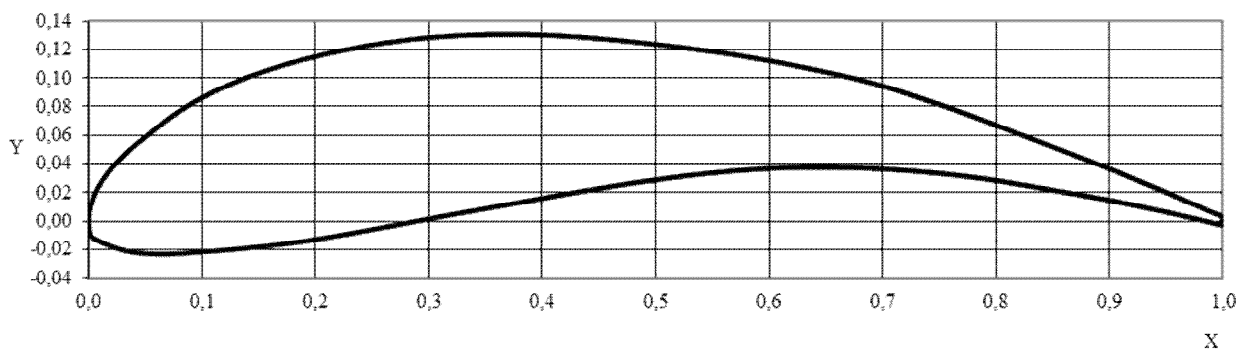


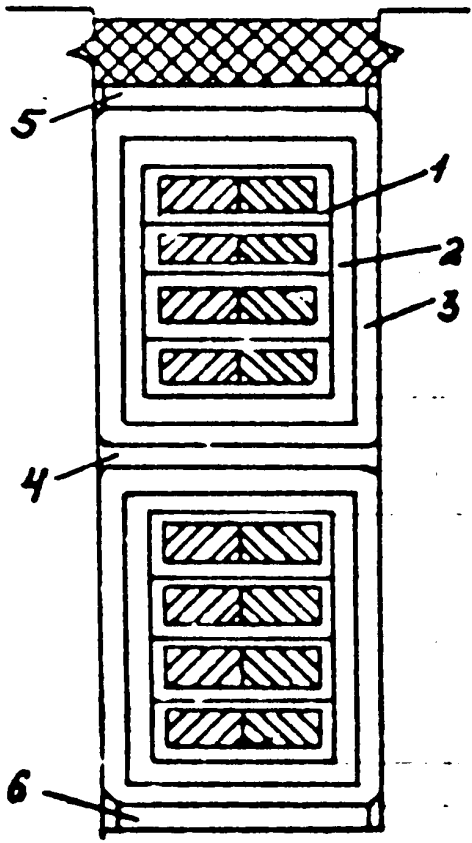
Рисунок В.1 – Вид профілю GOE–225

## ДОДАТОК Г

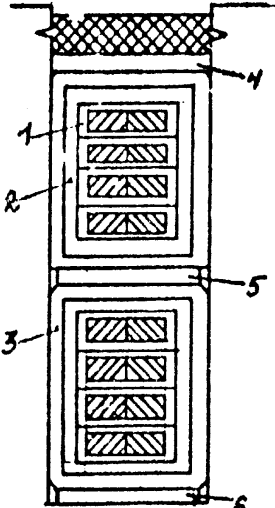
Таблиця Г.1 – Гільзова ізоляція класу F статорних обмоток змінного струму потужністю від 100 до 1000 кВт на напругу 3000–3300 В

Частина обмотки	Позиція	Матеріал			Число шарів		Товщина ізоляції	
		Найменування	Марка	Товщина, мм	За шириною	За висотою	За шириною	За висотою
	1	Ізоляція провідника	–	–	–	–	–	–
	2	Скляна стрічка	ЛЭС	0,1	1 шар у разбірку	–	0,2	0,2
	3	Скломікафолій	МФП-Т	0,2	6,5 оборотів	–	2,6	2,6
		Товщина ізоляції котушки	–	–	–	–	2,8	2,8
		Припустимі відхилення	–	–	–	–	± 0,4	+ 0,6 - 1,2
	4	Склолакотканина	ЛСК	0,15	2	3	0,3	0,45
	5	Склотекстоліт	СТЭФ	0,5	–	1	-	0,5
	6	Склотекстоліт	СТЭФ	0,5	–	1	-	0,5
	7	Склотекстоліт	СТЭФ	1,0	–	1	-	1,0
		Допуск на укладання	–	–	–	–	0,5	0,5
		Усього на паз без клина	–	–	–	–	3,6	8,8

Таблиця Г.2 – Безперервна ізоляція класу В котушок статорних обмоток машин змінного струму на напругу до 10 000 В

Частина обмотки	Позиція	Матеріал		Число шарів, не менше	Товщина ізоляції, м	
		Найменування	Товщина, мм		За шириною	За висотою
		Виткова ізоляція				
	1	Ізоляція провідника	–			
		Корпусна ізоляція				
	2	Скляноудинитова стрічка ЛС: при $U = 10,5$ кВ $U = 6,6$ кВ	0,13	9 напівнакрив 6 напівнакрив	6 4,5	6 4,5
	3	Стрічка скляна ЛЭС	0,1	1 впритул	0,2	0,2
		Товщина ізоляції котушкової сторони: при $U = 10,5$ кВ $U = 6,6$ кВ			6,2 4,7	6,2 4,7
		Прокладки в пазу				
	4	Склотекстоліт СТ-1	1	2	2	2
	5, 6	Склотекстоліт СТ-1	0,5	2	1	1
		Загальна товщина ізоляції на паз: при $U = 10,5$ кВ $U = 6,6$ кВ			6,2 4,7	15,4 12,4

Таблиця Г.3 – Гільзова терморезистивна ізоляція обмоток статора машин змінного струму потужністю 100–1000 кВт класу нагрівостійкості на напругу 6600 В

Частина обмотки	Позиція	Призначення ізоляції	Матеріал			Число шарів	Двостороння товщина ізоляції, мм, при числі провідників															
			Найменування	Марка	Товщина, мм		за шириною		в котушці													
							за висотою															
							1	2	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
	1	Виткова	Власна ізоляція дроту ПЭТВСД		0,5 з двох сторін		0,5	1,0	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	
	2	Корпусна	Полотни-на склослю-динитова		0,17		4,0		4,0													
				Розбу-хання ізоляції проводу			0,05	0,1	0,1	0,1	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	
	3	Покривна	Скляна стрічка	ЛЭС	0,1	Один шар впри-тул	0,2		0,2													
				Усього ізоляції у котушці			4,75	5,3	5,3	5,85	6,4	6,95	7,5	8,0	8,1	9,15	9,7	10,25	10,8	11,35	11,9	
	4	Проклад-ка	Склотекс-толїт	СТ-1	0,5	1	0,5															
	5	Проклад-ка	Склотекс-толїт	СТ-1	1	2	2,0															
	6	Проклад-ка	Склотекс-толїт	СТ-1	0,5	1	0,5															
				Зазор на укладку			0,2															
				Всього ізоляції в пазу			4,95	5,5	13,6	14,7	15,8	16,9	18,0	19,1	20,2	21,3	22,4	23,5	24,6	25,7	26,8	



## ДОДАТОК Д

Таблиця Д.1 – Розміри і площі поперечного перерізу прямокутної міді

Максимальна товщина ізоляції	0,27											0,33							
	0,02				0,03							0,04				0,05			
18	<i>b/a</i>	1,0	1,08	1,16	1,25	1,35	1,45	1,56	1,68	1,81	1,95	2,10	2,26	2,44	2,63	2,83	3,05	3,28	
	2,1	1,89	2,06	2,23	2,41	2,62	2,84	3,07	3,32	3,59	3,83	3,92	—	—	—	—	—	—	
	2,26	2,05	2,23	2,41	2,62	2,84	3,07	3,32	3,59	3,83	—	—	4,63	—	—	—	—	—	
	2,44	2,23	2,43	2,62	2,84	3,08	3,33	3,60	3,89	4,21	4,55	4,64	—	5,37	—	—	—	—	
	2,63	2,42	2,63	2,84	3,08	3,34	3,60	3,80	4,21	4,55	4,92	5,04	5,46	5,94	6,44	—	—	—	
	2,83	2,62	2,85	3,07	3,33	3,61	3,89	4,20	4,54	4,91	5,31	5,46	5,92	6,43	-	7,53	-	—	
18	3,05	2,84	3,08	3,33	3,60	3,91	4,21	4,55	4,91	5,31	5,74	5,93	6,41	6,96	7,54	8,15	8,72	—	
	3,28	3,07	3,33	3,60	3,89	4,22	4,55	4,91	5,3	5,73	6,19	6,41	6,93	7,52	8,15	8,80	9,51	10,3	
	3,53	3,32	3,60	3,89	4,20	4,56	4,91	5,30	5,72	6,18	6,69	6,93	7,50	8,13	8,80	9,51	10,3	11,1	
	3,8	3,59	3,89	4,20	4,54	4,92	5,30	5,72	6,17	6,67	7,20	7,50	8,11	8,79	9,51	10,3	11,1	12,0	
	4,1	3,89	4,22	4,55	4,92	5,33	5,74	6,19	6,68	7,21	7,79	8,13	8,79	9,52	10,3	11,1	12,0	13,0	
	4,4	4,19	4,54	4,89	5,29	5,73	6,17	6,65	7,18	7,75	8,17	8,76	9,46	10,2	11,1	12,0	12,9	13,9	
18	4,7	4,49	4,87	5,24	5,67	6,14	6,61	7,18	7,79	8,30	8,96	9,39	10,1	11,0	11,9	12,78	13,8	14,9	
	5,1	4,89	5,30	5,71	6,17	6,68	7,19	7,76	8,36	9,02	9,74	10,2	11,0	11,9	12,9	13,9	15,1	16,2	
	5,5	5,29	5,73	6,17	6,67	7,22	7,77	8,33	9,03	9,75	10,5	11,1	11,9	12,9	14,0	15,1	16,3	17,5	
	5,9	5,69	6,16	6,63	7,17	7,76	8,35	8,99	9,70	10,5	11,3	11,9	12,8	13,9	15,0	16,2	17,5	18,9	
	6,4	6,19	6,7	7,24	7,79	8,33	9,07	9,17	10,6	11,4	12,3	12,9	14,0	15,1	16,3	17,6	19,0	20,5	

Продовження таблиці Д.1

Максимальна товщина ізоляції	0,33					0,44							
	0,05					0,07							
Допуск на мідь	0,05					0,07							
	<i>b/a</i>	3,53	3,8	4,1	4,4	4,7	5,1	5,5	6,0	6,5	7,0	8,0	
	2,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	2,26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	2,44	-	-	-	-	-	-					-	
	2,63	-	-	-	-	-	-					-	
	2,83	-	-	-	-	-	-					-	
	3,05	-	-	-	-	-	-					-	
	3,28	-	-	-	-	-	-					-	
	3,53	12,0	12,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	3,8	-	13,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	4,1	14,0	15,1	15,9	-	-	-	-	-	-	-	-	
	4,4	15,0	16,2	17,1	18,5	-	-	-	-	-	-	-	
	4,7	16,1	17,4	18,4	-	21,2	-	-	-	-	-	-	
	5,1	17,5	18,9	20,0	21,5	-	25,1	-	-	-	-	-	
	5,5	18,9	20,4	21,7	23,3	-	27,2	-	-	-	-	-	
	5,9	20,3	21,9	23,3	25,1	26,8	29,2	-	34,5	-	-	-	
	6,4	22,1	23,8	25,3	27,3	29,2	31,7	34,5	37,5	-	-	-	

Продовження таблиці Д.1

Максимальна товщина ізоляції	0,27											0,33				
	0,02				0,03							0,04				
Допуск на мідь	<i>b/a</i>	1,0	1,08	1,16	1,25	1,35	1,45	1,56	1,68	1,81	1,55	2,10	2,26	2,24	2,63	
83	6,9	6,69	7,24	7,79	8,42	9,11	9,79	10,6	11,4	12,3	13,3	14,0	15,1	16,3	17,7	
	7,4	7,19	7,78	8,37	9,04	9,78	10,5	11,3	12,6	13,3	14,2	15,0	16,2	17,6	19,0	
	8,0	7,79	8,43	9,07	9,79	10,6	11,4	12,3	13,2	14,4	15,4	16,3	17,6	19,0	20,5	
	8,6	8,39	9,08	9,77	10,6	11,4	12,3	13,2	14,2	15,5	16,6	17,6	18,9	20,5	22,2	
	9,3	9,08	9,83	10,6	11,4	12,4	13,3	14,3	15,4	16,6	17,9	19,0	20,5	22,2	24,0	
	10,0	9,78	10,6	11,4	12,3	13,3	14,3	15,4	16,6	17,9	19,3	20,5	22,1	23,9	25,8	
83	10,8	10,6	11,4	12,2	-	14,4	15,5	16,6	17,9	19,3	20,9	22,2	23,9	25,9	27,9	
	11,6	11,4	12,3	13,2	14,2	15,5	16,6	17,9	19,3	20,8	22,4	23,9	25,7	27,8	30,0	
	12,5	12,3	13,3	14,2	15,3	16,5	17,9	19,4	20,8	22,4	24,2	25,8	27,8	30,0	32,4	
	13,5	13,3	14,3	15,4	16,5	17,8	19,1	20,8	22,5	24,2	26,1	27,9	30,0	32,4	35,0	
	14,5	14,3	15,4	16,5	17,9	19,2	20,6	22,1	24,2	26,1	28,0	30,0	32,3	34,9	37,6	
	15,6	15,4	16,6	17,8	19,2	20,7	22,2	23,8	25,6	28,0	30,2	32,3	34,8	37,6	40,5	
83	16,8	16,6	17,9	18,2	20,7	22,3	23,9	25,7	27,6	29,7	32,6	34,8	37,5	40,5	43,7	
	18,0	17,8	19,2	20,6	22,2	23,9	25,7	27,6	29,6	31,9	34,3	37,5	40,2	45,4	46,8	
	19,5	19,3	20,8	22,3	24,0	25,9	27,9	29,9	32,2	34,6	37,2	40,0	43,6	47,1	50,8	
	22,0	21,8	23,5	25,2	27,2	29,3	31,5	33,8	36,4	39,1	42,1	45,3	48,6	52,4	57,6	

Продовження таблиці Д.1

Максимальна товщина ізоляції	0,33								0,44							
	Допуск на мідь		0,04		0,05				0,07							
84	<i>b/a</i>	2,83	3,05	3,28	3,53	3,8	4,1	4,4	4,7	5,1	5,5	6,0	6,5	7,0	8,0	
	6,9	19,0	20,6	22,1	23,1	25,9	27,4	29,5	31,5	34,3	37,1	47,5	–	47,4	–	
	7,4	20,4	22,1	23,6	25,6	27,6	29,4	31,7	33,9	36,8	39,8	43,5	47,2	50,9	–	
	8,0	22,1	23,9	25,7	27,7	29,9	31,9	34,3	36,6	39,9	43,1	47,1	51,1	53,1	65,1	
	8,6	23,8	25,7	27,7	29,9	32,2	34,4	36,9	39,5	43,0	46,4	50,7	55,0	59,3	68,9	
	9,3	25,8	27,9	30,0	32,3	34,8	37,2	40,0	42,8	46,5	50,3	54,9	59,6	64,2	73,5	
	10,0	27,8	30,0	32,3	34,8	37,5	40,1	43,1	46,1	50,1	54,1	59,1	64,1	69,1	79,1	
	10,8	30,1	32,4	34,9	37,6	40,5	43,4	46,6	49,9	54,2	58,5	63,9	69,3	74,7	85,5	
	11,6	32,3	34,9	37,5	40,5	43,6	46,7	50,1	53,6	58,3	62,9	68,8	75,5	80,4	90,9	
	12,5	34,9	37,6	40,5	43,6	47,0	50,4	54,1	57,9	62,9	67,9	74,1	80,4	86,6	99,1	
	13,5	37,7	40,7	43,8	47,2	50,8	54,5	58,5	62,6	68,0	73,4	80,1	86,0	93,6	107,1	
14,5	40,5	43,7	47,1	50,6	54,6	58,6	62,9	67,3	74,1	78,9	86,1	93,4	100,6	115,1		
15,6	43,7	47,1	50,7	54,6	58,8	63,1	67,6	72,4	78,7	84,8	92,7	100,5	103,3	123,9		
16,8	47,0	50,7	54,6	58,8	63,3	68,0	73,0	78,1	84,4	91,5	99,9	108,3	116,7	133,5		
18,0	50,4	54,4	56,5	65,0	67,9	72,9	78,3	83,7	90,9	98,1	107,1	116,1	125,1	144,1		
19,5	54,7	59,0	63,5	68,3	73,6	79,1	84,3	90,8	98,6	106,4	116,1	126,9	135,6	155,1		
22,0	61,8	66,6	71,7	77,2	83,1	89,1	95,8	102,5	111,3	120,1	131,1	142,1	153,1	–		

Продовження таблиці Д.1

Максимальна товщина ізоляції	0,27											0,33				
	0,02				0,03							0,04				
Допуск на мідь	<i>b/a</i>	1,0	1,08	1,16	1,25	1,35	1,45	1,56	1,68	1,81	1,95	2,10	2,26	2,44	2,63	
85	25,0	24,8	26,8	28,7	30,9	33,4	35,8	38,5	41,4	44,6	47,9	51,6	55,4	59,7	64,3	
	26,3	26,1	28,2	30,2	32,5	35,1	37,7	40,5	43,6	46,9	50,5	54,3	58,3	62,8	67,7	
	28,0	27,8	30,0	32,2	34,7	37,4	40,2	43,8	46,4	50,0	53,8	57,9	62,2	67,0	72,2	
	30,0	29,8	32,2	34,5	37,2	40,1	43,1	46,3	49,8	53,6	57,7	62,1	66,7	71,9	77,4	
	32,0	31,8	34,3	36,8	39,7	42,8	46,0	49,4	53,2	57,2	61,6	66,3	71,3	76,8	88,7	
	35,0	34,3	37,6	40,3	43,4	46,9	50,3	54,1	58,2	62,7	67,4	72,6	78,0	81,4	90,6	
	40,0	39,8	43,0	46,1	49,7	53,6	57,6	61,9	66,6	71,7	77,2	83,1	89,3	89,3	96,3	
	45,0	44,8	—	—	55,9	60,4	64,8	69,7	75,0	80,8	86,9	93,6	100,6	108,6	116,9	
	50,0	49,8	53,8	52,7	62,2	67,1	72,1	77,5	83,4	89,8	96,7	104,1	119,9	120,7	130,8	
	55,0	54,8	—	—	—	—	—	85,3	91,8	98,9	106,4	114,6	123,2	132,9	143,2	

Закінчення таблиці Д.1

Максимальна товщина ізоляції	0,33								0,44							
	0,04		0,05						0,07							
Допуск на мідь	<i>b/a</i>	2,83	3,05	3,28	3,53	3,8	4,1	4,4	4,7	5,1	5,5	6,0	6,5	7,0	8,0	
	25,0	70,3	75,8	81,5	88,3	94,5	101,4	109,1	116,5	126,6	136,6	149,1	161,6	174,1	190,1	
98	26,3	72,7	79,7	85,8	92,3	99,4	106,9	114,3	122,7	133,2	143,8	156,9	170,1	183,0	–	
	28,0	77,5	–	97,3	98,3	105,9	113,9	122,3	130,7	141,9	153,1	167,1	181,1	195,1	–	
	30,0	83,2	–	97,9	105,4	113,5	122,1	131,1	140,1	132,1	164,1	179,1	194,1	209,1	239,1	
	32,0	88,9	–	102,7	110,3	121,1	129,9	139,3	149,5	152,3	175,1	191,1	207,1	–	–	
	35,0	97,4	–	112,5	120,9	132,5	142,6	153,1	163,6	–	191,6	207,1	226,6	–	279,1	
98	40,0	111,5	–	128,9	138,5	–	–	–	–	–	219,1	230,1	259,1	279,1	319,1	
	45,0	127,7	–	145,7	156,2	–	–	–	–	–	246,6	269,1	291,6	314,1	359,1	
	50,0	159,8	–	161,7	173,8	–	–	–	–	–	274,1	299,1	324,1	349,1	399,1	
	55,0	154,0	–	178,1	191,5	–	–	–	–	–	301,6	329,1	356,6	384,1	439,1	

## ДОДАТОК Е

### Приклад заповнення паза статора

Припустимо, що в результаті розрахунку число ефективних провідників у пазу статора  $S_n$  дорівнює 10, причому кожен ефективний провідник складається з 4-х елементарних ( $n_b = 2, n_a = 2$ ). Тут  $n_b$  і  $n_a$  – число елементарних провідників в одному ефективному відповідно за шириною  $n_b$  і висотою  $n_a$ .

Нехай вибрали елементарний провідник перерізу  $6,93 \text{ мм}^2$  з розмірами  $a=2,1 \text{ мм}; b=3,53 \text{ мм}$  (див. дод. Б).

Розмір міді в ізоляції:

$$a' = a + \Delta + \delta_{iz} = 2,1 + 0,04 + 0,33 = 2,47 \text{ мм};$$

$$b' = b + \Delta + \delta_{iz} = 3,53 + 0,04 + 0,33 = 3,9 \text{ мм},$$

де  $\Delta$  – допуск на мідь, мм;

$\delta_{iz}$  – максимальна товщина ізоляції міді.

Значення  $\Delta$  і  $\delta_{iz}$  беруть з додатку Б.

### Заповнення паза за шириною

1. Мідь ізольована ( $b' \cdot n_b$ )	7,82 мм
2. Допуск на нерівність міді ( $0,15 \div 0,25 \text{ мм}$ )	0,16 мм
3. Міжвиткова ізоляція секції, виконувана з одного шару мікалінти товщиною 0,13 мм у 1/2 нахлесту навколо ефективного провідника ( $0,26 \cdot n_b$ )	0,52 мм
4. Товщина ізоляції секції за шириною згідно з додатком А (табл. А.1)	4,7 мм
Ширина секції	13,2 мм
Короб з кабельного паперу, покритого кремнійорганічною пастою	0,24 мм
Допуск на укладання ( $0,2 \div 0,4 \text{ мм}$ )	0,2 мм
Ширина паза у світлі	13,64 мм
Допуск на штампування ( $+0,3 \text{ мм}$ )	0,3 мм
Ширина паза в штампі	$b_{n_1} = 13,94 \text{ мм}$

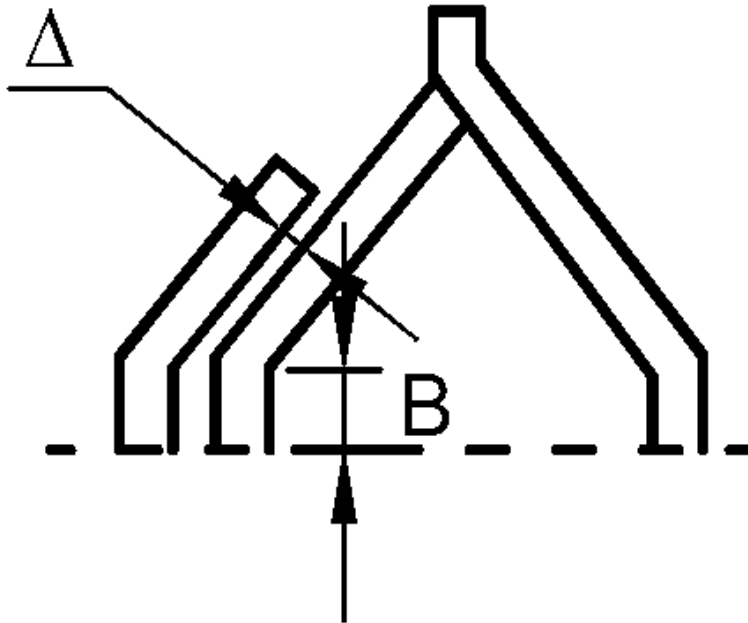
### Заповнення паза за висотою

1. Мідь ізольована ( $a' \cdot n_a \cdot S_n / 2$ )	24,7 мм
2. Допуск на нерівність міді ( $0,15 \div 0,25$ мм)	0,2 мм
3. Міжвиткова ізоляція секції, виконувана з одного шару мікалінти товщиною 0,13 мм у 1/2 нахлесту навколо ефективного провідника ( $0,26 \cdot n_a \cdot S_n / 2$ )	2,60 мм
4. Товщина ізоляції секції за шириною згідно з додатком А (табл. А.1)	12,4/2 = 6,2 мм
Висота однієї секції	33,7 мм
Висота двох секцій	66,14 мм
Короб з кабельного паперу, покритого кремнійорганічною пастою	0,36 мм
Прокладка зі склотекстоліту 3×0,5 (прокл. = 0,5 мм)	1,5 мм
Допуск на укладання (0,2–1,0 мм)	0,2 мм
Висота паза до клина	68,2 мм
Висота клина	3,5 мм
Висота шліца (0,6–1,0 мм)	0,8 мм
Висота паза у світлі	72,5 мм
Висота паза в штампі (+0,5)	$h_{n_1} = 73,0$ мм



## ДОДАТОК Ж

### Визначення середньої довжини лобової частини обмотки якоря



$$l_{s1} = \frac{\pi(D_i + h_{n_1})\beta}{2p \sqrt{1 - \frac{b_{n_1} + \Delta}{t_{z_1}}}} + 2B + 1,57h'_{n_1},$$

де  $h_{n_1}$  – повна висота паза, м;

$h'_{n_1}$  – висота паза до клина, м;

$\beta$  – укорочення кроку;

$b_{n_1}$  – ширина паза, м;

$t_{z_1}$  – зубцевий розподіл у розточенні, м;

$B, \Delta$  – у метрах.

Напруга, В	$\Delta$ , мм	В, мм
2300–4000	4,5–5,0	40
4000–6600	6,5	45

## ДОДАТОК И

### Розрахунок питомих провідностей потоків розсіювання двошарової обмотки статора

1. Провідність відкритого паза з рівнобіжними стінками:

$$\lambda_{n1} = (1,67 + g) \cdot \frac{h_1}{4b_{n1}} + \frac{h_2}{4b_{n1}} + K'_y \cdot \frac{h_3}{b_{n1}},$$

де  $h_1 = h_{\text{із. секції}} - \Delta_{\text{із. секції}}$ ,

$h_2 = \frac{1}{2} \Delta_{\text{із. секції}} + \delta_{\text{пр}} + \frac{1}{2}$  допуску на укладання,

$h_3 = \frac{1}{2} \Delta_{\text{із. секції}} + \delta_{\text{пр}} + \frac{1}{2}$  допуску на укладання +  $h_{\text{кл}}$ ,

$\delta_{\text{пр}}$  – товщина прокладки між секціями;

$h_{\text{кл}}$  – висота клина і шліці;

$b_{n1}$  – ширина паза статора в штампі;

$g$  – коефіцієнт, що враховує зрушення фаз між струмами у верхніх і нижніх сторонах секцій в пазу;

$\beta$  – укорочення кроку обмотки.

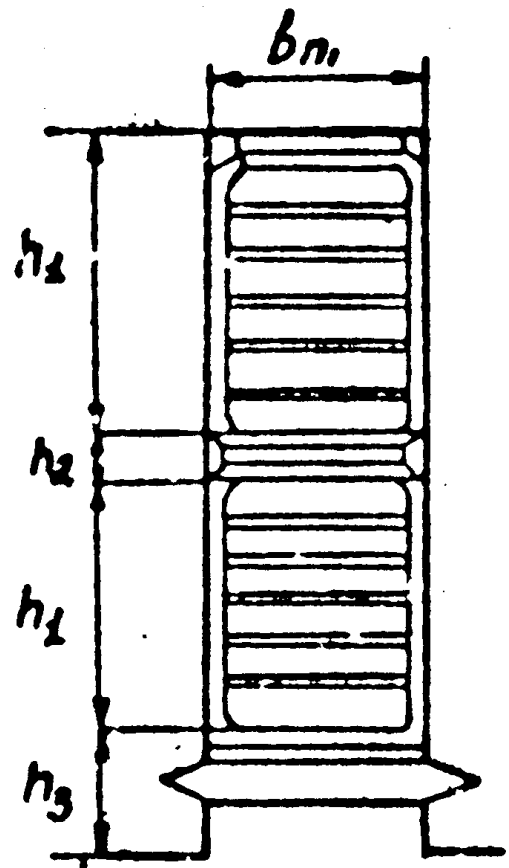
$$\text{Якщо } \beta > \frac{2}{3}, \text{ то } g = \frac{3\beta - 1}{2}; \quad K'_y = \frac{1 - \beta}{2}.$$

2. Провідність по коронках зубців:

$$\lambda_{k1} = \left[ 0,71 \cdot \lg \frac{t_{z1}}{b_{n1}} + 0,16(q - 1) \right] K'_y,$$

де  $t_{z1}$  – зубцевий розподіл статора в розточенні;

$q$  – число пазів на полюс і фазу статора.



3. Провідність по лобових частинах:

$$\lambda_{S1} = \frac{l_{S1}}{l_i} \cdot q \cdot K_S ,$$

для двошарових трифазних обмоток  $K_S = 0,2$ .

4. Повна провідність

$$\sum \lambda_1 = \lambda_{n1} + \lambda_{\kappa1} + \lambda_{S1} .$$

## ДОДАТОК К

Таблиця К.1 – Крива намагнічування для листової сталі (Ст. 3) товщиною 1 ÷ 2 мм (для полюсів)

<i>B</i> , Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,1	100									
0,2	140									
0,3	180									
0,4	210									
0,5	250					275				
0,6	295					320				
0,7	345					375				
0,8	405					440				
0,9	480	490	495	505	510	520	530	540	550	560
1,0	570	582	595	607	615	630	642	655	665	680
1,1	690	703	720	731	748	760	775	790	808	825
1,2	845	860	880	900	920	940	960	992	1 015	1 045
1,3	1 080	1 112	1 145	1 175	1 220	1 260	1 300	1 350	1 393	1 450
1,4	1 490	1 530	1 595	1 645	1 700	1 750	1 835	1 920	2 010	2 110
1,5	2 270	2 450	2 650	2 710	2 880	3 050	3 200	3 400	3 650	3 750
1,6	4 000	4 250	4 500	4 750	5 000	5 250	5 580	5 950	6 230	6 600
1,7	7 050	7 530	7 950	8 400	8 850	9 320	9 800	10 300	10 800	11 400
1,8	11 900	12 400	13 000	13 500	14 100	14 800	15 600	16 200	17 000	17 800
1,9	18 800	19 700	20 700	21 500	22 600	23 500	24 500	25 600	26 500	27 500
2,0	29 000	30 200	31 500	32 800	34 200	36 100	38 000			

Таблиця К.2 – Крива намагнічування листової електротехнічної сталі марок 1411, 1412, 1413

<i>B</i> , Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,2	44	45	48	49	50	51	52	54	54	55
0,3	56	57	58	59	60	61	63	64	65	66
0,4	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76
0,5	77	78	79	80	81	83	84	86	87	89
0,6	90	92	94	96	97	99	101	103	105	107
0,7	109	111	113	115	117	119	122	124	127	130
0,8	133	135	138	141	147	150	154	158	158	162
0,9	166	170	174	179	184	189	194	199	205	211
1,0	217	223	230	237	241	262	260	269	278	288
1,1	298	309	320	332	345	359	374	390	407	425
1,2	444	465	487	510	535	562	590	620	652	686
1,3	722	760	800	850	900	960	1 030	1 110	1 200	1 300
1,4	1 410	1 530	1 660	1 810	1 970	2 140	2 320	2 510	2 710	2 920
1,5	3 140	3 370	3 610	3 870	4 140	4 420	4 710	5 010	5 320	5 640
1,6	5 980	6 330	6 700	7 090	7 500	7 930	8 380	8 850	9 340	9 860
1,7	10 100	11 000	11 600	12 300	13 000	13 700	14 500	15 300	16 200	17 200
1,8	18 100	19 100	20 200	21 400	22 700	24 700	25 600	27 200	29 000	31 100
1,9	33 500	36 300	39 700	43 700	48 300	53 700	59 700	66 200	73 200	80 600
2,0	88 300	96 100	104 000	112 000	120 000	128 000	136 000	144 000	151 000	159 000
2,1	167 000	175 000	183 000	191 000	199 000	207 000	215 000	223 000	231 000	239 000
2,2	246 000	254 000	262 000	270 000	278 000	286 000	294 000	302 000	310 000	318 000
2,3	426 000	337 000	342 000	350 000	352 000	365 000	373 000	381 000	389 000	397 000
2,4	405 000	414 000	421 000	429 000	437 000	445 000				

Таблиця К.3 – Крива намагнічування для листової електричної сталі марок 1511, 1512, 1513

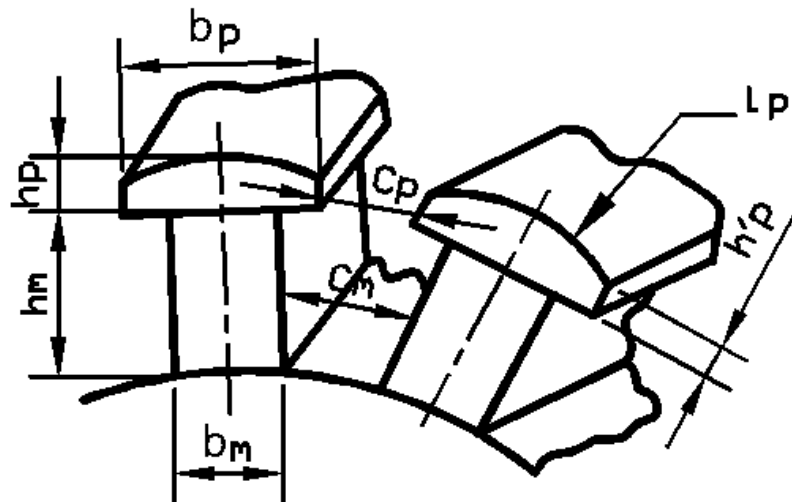
<i>B</i> , Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,4	96	97	98	99	100	103	104	106	108	111
0,5	114	117	120	123	126	129	132	136	140	144
0,6	148	152	156	160	164	168	172	177	182	187
0,7	192	197	202	208	214	220	226	233	240	247
0,8	254	261	268	275	283	289	296	303	310	317
0,9	325	333	341	349	358	367	376	385	394	404
1,0	414	424	435	446	458	470	483	496	510	524
1,1	538	553	569	586	604	623	643	664	695	707
1,2	730	753	780	810	840	870	900	940	980	1 030
1,3	1 080	1 140	1 200	1 270	1 340	1 410	1 490	1 590	1 600	1 720
1,4	1 940	2060	2200	2 340	2 500	2 700	2 920	3 140	3 370	3 600
1,5	3 850	4060	4290	4 520	4 760	5 000	5 300	5 650	6 000	6 350
1,6	6 700	7100	7600	8 800	8 650	9 300	10 000	10 700	11 700	12 200
1,7	13 000	14 000	15 000	16 000	17 000	18 000	19 000	20 000	21 000	22 000
1,8	23000	24 000	25 000	26 000	27 000	28 000	29 000	30 000	31 200	32 500
1,9	34 000	35 500	37 000	38 500	40 500	42 500	45 000	51 000	57 000	63 000
2,0	70 000	77 000	84 500	91 000	100 000	108 000	116 000	124 000	138 000	140 000
2,1	14 8000	156 000	164 000	172 000	180 000	188 000	196 000	204 000	212 000	220 000
2,2	22 8000	236 000	244 000	252 000	260 000	268 000	276 000	284 000	292 000	300 000
<i>Примітка. Для індукції більш ніж 2,06 Тл крива намагнічування виражається рівнянням <math>H = (1,9140 + 1,266B) \cdot 10^6</math></i>										

Таблиця К.4 – Основна крива намагнічування для сталі марки 2411

<i>B</i> , Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,4	66	68	69	70	71	72	73	74	75	76
0,5	77	78	79	80	81	83	84	86	87	89
0,6	90	92	94	96	97	99	101	103	105	107
0,7	109	111	113	115	117	119	122	124	127	130
0,8	133	135	138	141	144	147	150	154	158	162
0,9	166	170	174	179	184	187	194	199	205	211
1,0	217	223	230	237	244	252	260	269	277	286
1,1	295	304	314	324	334	344	355	366	377	388
1,2	390	411	423	435	447	460	473	486	500	540
1,3	585	630	680	735	795	860	930	1 000	1 070	1 150
1,4	1 230	1 320	1 420	1 520	1 630	1 750	1 870	2 010	2 100	2 320
1,5	2 500	2 680	2 870	3 080	3 300	3 540	3 800	4 090	4 380	4 700
1,6	5 000	5 380	5 760	6 200	6 650	7 120	7 650	8 200	8 800	9 400
1,7	10 000	10 500	11 000	11 500	12 000	12 500	13 100	13 700	14 300	14 900
1,8	15 600	16 200	16 800	17 500	18 300	19 100	20 000	20 900	21 900	22 900
1,9	23 900	25 000	262 00	27 400	28 700	30 000	32 000	36 000	42 000	50 000
2,0	59 000	68 000	77 000	86 000	95 000	104 000	113 000	122 000	131 000	140 000
2,1	149 000	158 000	167 000	176 000	185 000	194 000	203 000	212 000	221 000	230 000
2,2	239 000	248 000	257 000	266 000	275 000	284 000	293 000	302 000	311 000	320 000
2,3	329 000	338 000	347 000	356 000	365 000	374 000	383 000	392 000	401 000	410 000
2,4	419 000	428 000	437 000	446 000	455 000	464 000	473000	482 000	491 000	500 000

## ДОДАТОК Л

### Визначення розсіювання полюсів



а) провідність полюсних башмаків (див. ескіз)

$$\lambda_p = \frac{5h_p'}{C_p}(l_p + b_p),$$

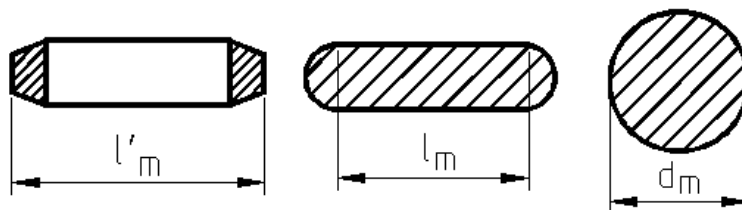
де  $h_p' = h_p - \frac{0,35\tau}{p}$ ;  $C_p = \tau - b_p$ ;  $C_p, h_p', l_p, b_p$ ;

б) провідність полюсних осердь:

прямокутних  $\lambda_m = \frac{1,8(h_m - h_i)}{C_m} \cdot (l_m' - b_m)$ ;

овальних  $\lambda_m = \frac{1,8(h_m - h_i)}{C_m} \cdot (l_m - 1,57b_m)$ ;

круглих  $\lambda_m = \frac{2,8(h_m - h_i)}{C_m} \cdot d_m$ ;



$$C_m = \frac{\pi(D_i - 2\delta - 2h_p - h_m + h_i)}{2p} - b_m,$$

де  $h_i$  – товщина ізоляційної рамки внизу полюса, см,  $h_i = 0,2$  см;

$$\lambda_{mp} = \lambda_m + \lambda_p.$$



*Виробничо-практичне видання*

**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ**

до виконання курсового проекту

**«ПРОЕКТУВАННЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ»**

із навчальної дисципліни

**«ВІТРОЕНЕРГЕТИКА»**

*(для студентів усіх форм навчання освітнього рівня «бакалавр»  
галузей знань 14 – Електрична інженерія спеціальність  
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
освітня програма «Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії»)*

Укладачі : **ГЛЄБОВА** Марина Леонідівна,

**ЄГОРОВ** Олексій Борисович

Відповідальний за випуск *Я. Б. Форкун*

*За авторською редакцією*

Комп'ютерне верстання *І. В. Волосожарова*

План 2020, поз. 209 М

---

Підп. до друку 11.03.2020 Формат 60 × 84/16.

Друк на ризографі. Ум. друк. арк. 5,7.

Тираж 50 пр. Зам. №

Видавець і виготовлювач :

Харківський національний університет  
міського господарства імені О. М. Бекетова,  
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002.

Електронна адреса: [rectorat@kname.edu.ua](mailto:rectorat@kname.edu.ua)

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи :

ДК № 5328 від 11.04.2017.