

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
МИКОЛАЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерно-енергетичний факультет

Кафедра електротехнологій і електропостачання

**ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ТА ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНІ
УСТАНОВКИ**

методичні рекомендації до виконання практичних занять

для студентів спеціальностей 7.10010101, 8.10010101

«Енергетика аграрного виробництва»

МИКОЛАЇВ
2015

УДК 621.311.21
ББК 31.5
Г46

Рекомендовано науково-методичною комісією інженерно-енергетичного факультету МНАУ, протокол № 9 від «28» травня 2015 р.

Укладач:

О. С. Кириченко – канд. техн. наук, доцент кафедри електротехнологій і електропостачання Миколаївського національного аграрного університету.

Рецензенти:

О. О. Черно – заступник директора Інституту автоматики та електротехніки з наукової роботи, канд. техн. наук, доцент кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова;

І. С. Білюк – канд. техн. наук, доцент кафедри автоматики Інституту автоматики і електротехніки Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова.

© Миколаївський національний аграрний університет, 2015

Зміст

Вступ	4
1. Основні завдання практичних занять	5
2. Розподіл часу вивчення дисципліни	9
3. Планування практичних занять	11
4. Організація практичних занять	17
5. Приклад розрахунку синхронного генератора з постійними магнітами для вітроенергетичної установки	18
6. Питання для контролю знань під час практичних занять	42
Рекомендована література	45

Вступ

Основна мета даних методичних рекомендацій полягає у наданні допомоги студентам у засвоєнні матеріалу дисципліни “Гідроелектростанції та вітроенергетичні установки в АПК” під час практичних занять. Матеріал, наведений у рекомендаціях, узгоджений з навчальним планом спеціальностей 7.10010101, 8.10010101 “Енергетика аграрного виробництва”, затвердженим Департаментом вищої освіти Міністерства освіти і науки України та робочою навчальною програмою дисципліни, розробленою на кафедрі електротехнологій і електропостачання та затвердженою методичною комісією Миколаївського національного аграрного університету. Тематику практичних занять з дисципліни та методичні рекомендації до їх виконання складено таким чином, що завдання розподілено рівномірно практично між усіма темами робочої навчальної програми. Практичні заняття передбачають попереднє вивчення теоретичного матеріалу, закріплення теорії відбувається завдяки виконанню практичних завдань. Література до практичних занять обиралася з літературних джерел робочої навчальної програми дисципліни за принципами наявності у бібліотечному фонді, вичерпності, ясності та стислості подання матеріалу.

1. Основні завдання практичних занять з дисципліни “Гідроелектростанції та вітроенергетичні установки в АПК”

Курс “Гідроелектростанції та вітроенергетичні установки в АПК” належить до числа дисциплін циклу природничо-наукової підготовки спеціальностей 7.10010101, 8.10010101 “Енергетика аграрного виробництва”, які визначають теоретичний рівень спеціалістів у галузі гідро- та вітроенергетики.

Вивчення вказаного курсу базується на знаннях, одержаних з курсів «Фізика», «Вища математика», «Теоретичні основи електротехніки», «Електричні машини», «Основи електропостачання», «Електропостачання в агропромисловому комплексі», а його метою є оволодіння основами функціонування технічних систем гідроелектростанцій та вітроенергетичних установок.

Програма курсу містить 2 модулі.

Модуль 1. Гідроелектростанції (ГЕС).

В модулі 1 розглядаються наступні питання:

1. Значення і техніко-економічна оцінка ГЕС.
2. Принципові схеми ГЕС.
3. Компонувальні рішення ГЕС.
4. Конструкції і компоновка споруд ГЕС.
5. Гідросилове обладнання.
6. Електротехнічне обладнання.
7. Економіка будівництва ГЕС.

Модуль 2. Вітроенергетичні установки (ВЕУ).

В модулі 2 розглядаються наступні питання:

1. Значення і техніко-економічна оцінка ГЕС.
2. Принципові схеми ГЕС.
3. Компонувальні рішення ГЕС.
4. Конструкції і компоновка споруд ГЕС.

5. Гідросилове обладнання.
6. Електротехнічне обладнання.
7. Економіка будівництва ГЕС.

На основі знань, отриманих при вивченні дисципліни “Гідроелектростанції та вітроенергетичні установки в АПК” базуються курси циклу професійної та практичної підготовки: “Електротехнології в сільському господарстві”, “Проектування систем електрифікації, автоматизації та енергопостачання”, “Моделювання технологічних процесів в АПК”, “Пристрої автоматики систем електропостачання”, “Малі електростанції в АПК”. Тому даний курс має підготувати студентів до розробки і аналізу різних за ступенем складності гідро- та вітроенергетичних систем. Згідно з освітньо-кваліфікаційною програмою підготовки фахівців спеціальностей 7.10010101, 8.10010101 “Енергетика аграрного виробництва” в результаті вивчення дисципліни “Гідроелектростанції та вітроенергетичні установки в АПК” студент повинен вміти:

- виконувати розрахунки та аналізувати технічні системи гідроелектростанцій;
- виконувати розрахунки та аналізувати технічні системи вітроенергетичних установок.

Складовою частиною засвоєння цих знань є практичні заняття. Якість засвоєння матеріалу великою мірою визначається саме аудиторними практичними заняттями. Практичні заняття з дисципліни передбачають попереднє опрацювання лекційного матеріалу за вказаними наприкінці посібника літературними джерелами. Розвинути практичні навички та закріпити теорію допомагає виконання практичних завдань, що полягає у вирішенні розрахункових задач та комп’ютерному моделюванні технічних систем гідроелектростанцій та вітроенергетичних установок.

2. Розподіл часу вивчення дисципліни

Навчальним планом спеціальностей 7.10010101, 8.10010101 “Енергетика аграрного виробництва” передбачається наступна структура розподілу часу для вивчення матеріалу з дисципліни “Гідроелектростанції та вітроенергетичні установки в АПК” (табл. 1).

Таблиця 1

Розподіл часу вивчення дисципліни “Гідроелектростанції та вітроенергетичні установки в АПК” (витяг з навчального плану)

Назва дисципліни	Форма контролю, семестр	Загальний обсяг годин	Обсяг аудиторних годин	Аудиторні заняття, годин		Самостійна робота, годин
	Іспит			Лекції	Практичні заняття	
Гідроелектростанції та вітроенергетичні установки в АПК	9-й	108	46	30	16	62

Таким чином, практичні заняття становлять лише 15 відсотків часу вивчення дисципліни (16 годин) протягом семестру. Цей час розподілено між 14 вищезазначеними розділами дисципліни. Два модулі дисципліни «Гідроелектростанції та вітроенергетичні установки в АПК» вивчаються протягом дев'ятого семестру.

3. Планування практичних занять

У плані практичних занять передбачається, згідно з календарним планом, аудиторне рішення типових завдань, проробка конспектів та навчальних

посібників. Частина часу відведена на виконання розрахунково-графічних завдань з використанням систем автоматизованого проектування, наприклад, AutoCAD, та імітаційного моделювання енергоефективних систем у програмному середовищі MatLAB Simulink, MathCAD, Ansys Maxwell.

Контроль над виконанням практичних занять здійснюється шляхом перевірки розрахунково-графічних завдань і опитування.

Рекомендоване планування часу практичних занять студентів з дисципліни “Гідроелектростанції та вітроенергетичній установки в АПК” наведено у табл. 2.

Таблиця 2

Рекомендований розподіл часу практичних завдань для засвоєння теоретичних знань та практичних навичок з дисципліни “Гідроелектростанції та вітроенергетичній установки в АПК”

№ з/п	Тема самостійної роботи за навчальним планом	Літературні джерела для загального опрацювання теми	Практичне завдання для засвоєння матеріалу	Література до виконання практичного завдання	Час опрацювання матеріалу, годин
Модуль 1. Гідроелектростанції (ГЕС).					
1	Значення і техніко-економічна оцінка ГЕС.	[1-9]	Розрахунок практичного завдання за поточною темою самостійної роботи.	[1-9]	1
2	Принципові схеми ГЕС.	[1-9]	Розрахунок практичного завдання за поточною темою самостійної роботи.	[1-9]	1

Продовження таблиці 2

Рекомендований розподіл часу самостійної роботи для засвоєння теоретичних знань та практичних навичок з дисципліни “Гідроелектростанції та вітроенергетичній установці в АПК”

3	Компонувальні рішення ГЕС.	[1-9]	Розрахунок практичного завдання за поточною темою самостійної роботи.	[1-9]	1
4	Конструкції і компоновка споруд ГЕС.	[1-9]	Розрахунок практичного завдання за поточною темою самостійної роботи.	[1-9]	1
5	Гідросилове обладнання.	[1-9]	Розрахунок практичного завдання за поточною темою самостійної роботи.	[1-9]	1
6	Електротехнічне обладнання.	[1-9]	Розрахунок практичного завдання за поточною темою самостійної роботи.	[1-9]	2
7	Економіка будівництва ГЕС.	[1-9]	Розрахунок практичного завдання за поточною темою самостійної роботи.	[1-9]	1
Модуль 2. Вітроенергетичні установки (ВЕУ).					
8	Значення і техніко-економічна оцінка ГЕС.	[1-9]	Розрахунок практичного завдання за поточною темою самостійної роботи.	[1-9]	1

Продовження таблиці 2

Рекомендований розподіл часу самостійної роботи для засвоєння теоретичних знань та практичних навичок з дисципліни “Гідроелектростанції та вітроенергетичній установці в АПК”

9	Принципові схеми ГЕС.	[1-9]	Розрахунок практичного завдання за поточною темою самостійної роботи.	[1-9]	1
10	Компонувальні рішення ГЕС.	[1-9]	Розрахунок практичного завдання за поточною темою самостійної роботи.	[1-9]	1
11	Конструкції і компоновка споруд ГЕС.	[1-9]	Розрахунок практичного завдання за поточною темою самостійної роботи.	[1-9]	1
12	Гідросилове обладнання.	[1-9]	Розрахунок практичного завдання за поточною темою самостійної роботи.	[1-9]	1
13	Електротехнічне обладнання.	[1-9]	Розрахунок практичного завдання за поточною темою самостійної роботи.	[1-9]	2
14	Економіка будівництва ГЕС.	[1-9]	Розрахунок практичного завдання за поточною темою самостійної роботи.	[1-9]	1
Усього по курсу:					16

4. Організація самостійної роботи

Шістнадцять годин практичних занять, які заплановані на весь час вивчення дисципліни протягом семестру, розподілені приблизно пропорційно до кількості тижнів навчання у дев'ятому семестрі (14). Тому у середньому на практичне заняття з дисципліни припадає приблизно 1 година на тиждень. Важливо, щоб цей час був використаний у режимі найвищої ефективності засвоєння матеріалу. У великій мірі цьому сприяє правильна організація практичних занять.

Для досягнення цього по-перше, необхідно заздалегідь подбати про наявність літератури для практичних занять; по-друге, лекційний матеріал має опрацьовуватися в день його подання в аудиторії або, у крайньому випадку, наступного дня; по-третє, бажано, щоб до практичних завдань студенти приступали через невеликий проміжок після лекційного заняття за відповідною тематикою. В такому разі з'ясується більшість питань і підготовка до практичних занять вимагає менше часу. Крім того, з'являється додаткова можливість вирішити незрозумілі питання підчас занять. Практичні завдання з розрахунку гідроелектростанцій та вітроенергетичних установок в АПК рекомендовано виконувати із застосуванням сучасного програмного забезпечення та обчислювальних пристроїв. Результати практичної роботи необхідно ретельно аналізувати. Результати опрацювання лекційного матеріалу занотовуються у вигляді тез, виписок з підручників та монографій. Найбільш складні питання розтлумачуються повністю у письмовому вигляді або у вигляді електронного набору. Практична робота з теми завершується відповіддю на питання для контролю знань. У подальшому весь матеріал, напрацьований під час практичних занять, використовується для підготовки до виконання звітів з лабораторних робіт, розрахунково-графічних завдань, заліку або іспиту з дисципліни.

5. Приклад розрахунку синхронного генератора з постійними магнітами для вітроенергетичної установки

5.1 Визначення головних розмірів

Головними розмірами синхронної машини є внутрішній діаметр статора D і розрахункова довжина l_δ . Вони визначаються із основного розрахункового рівняння електричної машини. Машинна постійна Арнольда:

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

де P' – розрахункова потужність;

a_δ – розрахунковий коефіцієнт полюсного перекриття;

k_ϕ – коефіцієнт форми поля;

k_0 – обмотувальний коефіцієнт обмотки статора;

A – лінійне навантаження статора;

B_δ – максимальне значення індукції в повітряному зазорі при номінальному навантаженні.

Розрахункова потужність визначається по формулі:

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

де $k_e = \frac{E_i}{U_n}$ – коефіцієнт, який характеризує внутрішню ЕРС якірної

обмотки.

Згідно даним розрахункової практики для синхронних генераторів з постійними магнітами величина коефіцієнта k_e вибирається в межах $k_e=1,2\dots1,4$, причому $k_e=1,2$.

Вихідні дані для розрахунку:

- номінальна потужність $P=5000$ Вт;
- номінальна напруга $U=220$ В;

- номінальна частота обертання $n=250$ об/хв;
- номінальна частота струму $f_1=50$ Гц;
- кількість фаз $m=1$ (с можливістю переходу на $m=3$).

Головні розміри розраховуються виходячи з трифазного виконання. Співвідношення потужностей при однофазному та трифазному живленні можна прийняти як:

$$P_{1\phi} = 0,7P_{3\phi},$$

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

При струмі, що відстає, для генераторів зазвичай приймається $\cos \varphi=0,8$.

Тоді:

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

Значення розрахункового коефіцієнта полюсного перекриття залежить від числа пар полюсів p . Число пар полюсів розраховується по формулі:

$$p = \frac{60f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{250} = 12.$$

Приймаємо $\alpha_\delta=0,8$, а коефіцієнт форми поля $k_\phi=1,11$.

Обмотковий коефіцієнт k_0 в випадку використання двояркової обмотки з відносним кроком укорочення в межах $y=0,8\dots0,87$ попередньо обирається в межах $k_0 = 0,9\dots0,92$. Приймаємо $k_0=0,92$.

Значення лінійного навантаження A задається виходячи з режимів роботи, умов охолодження та номінальної потужності синхронного генератора. Для тривалого режиму роботи при продувному виконанні обирається $A = 2,2 \cdot 10^4$ А/м.

Значення магнітної індукції в повітряному зазорі обмежується, головним чином, насиченням магнітного кола. Приймаємо $B_\delta=0,8$ Тл.

Між головними розмірами синхронного генератора існує співвідношення:

$$\lambda = \frac{l_\delta}{\tau}, \quad (5.3)$$

$$\text{де } \tau = \frac{\pi D}{2p} \text{ – полюсний тиск.} \quad (5.4)$$

Підставивши вираз t в (3), отримаємо:

$$\lambda = \frac{2l_{\delta} p}{\pi D} \quad (5.5)$$

Параметр λ залежить від числа пар полюсів; для синхронних машин, які випускаються нині зазвичай знаходиться в межах $\lambda=1,2\dots2,3$. Прийmemo $\lambda=1,5$, тоді розрахункова довжина l_{δ} виражена з (5.5), буде:

$$l_{\delta} = \frac{\lambda \pi D}{2p}. \quad (5.6)$$

Підставляючи вираз (5.6) в формулу машинної постійної Арнольда, отримаємо формулу для розрахунку діаметру розточення статора:

$$D = \sqrt[3]{\frac{6,1 \cdot 2p \cdot P'}{\lambda \cdot \pi \cdot a_{\delta} \cdot k_{\phi} \cdot k_0 \cdot A \cdot B_{\delta} \cdot n}}. \quad (5.7)$$

Підставивши вихідні дані отримаємо:

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

Приймаємо $D=0,45$ м.

Визначаємо по формулі (5.4) полюсний тиск:

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

Знаходимо розрахункову довжину статора, виражаючи її з формули (5.3):

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

Для контролю вибору головних розмірів використаємо метод універсальної машинної постійної, запропонованої І.М. Постніковим:

$$C_s = (K_w \cdot K_{\phi} \cdot \gamma \cdot B_z)^{-\frac{1}{4}}, \quad (5.8)$$

де C_s – універсальна машинна постійна для статора;

K_w – обмотковий коефіцієнт;

K_ϕ – повний коефіцієнт заповнення;

λ – густина струму в обмотці статора;

B_z – середня магнітна індукція в зубцях статора.

Приймаємо величину обмотувального коефіцієнта $K_w=0,92$, величину повного коефіцієнта заповнення приймаємо $K_\phi=0,1$.

Середня рекомендована густина струму для малих синхронних генераторів приймаємо $6 \text{ А/мм}^2 = 6 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$.

Величину середньої магнітної індукції в зубцях статора приймаємо на основі досвіду проектування малощумних синхронних генераторів $B_z=1,4 \text{ Тл}$.

Величину C_s отримаємо, використовуючи прийняті величини, які входять в формулу (5.8) :

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

Визначаємо величину полюсного тиску:

$$\tau = C_s \cdot 4 \sqrt{\frac{P_w \cdot \beta}{2p \cdot f \cdot \sqrt{2} \cdot \lambda_1}}, \quad (5.9)$$

де P_w – розрахункова потужність;

$\beta = \frac{\tau}{l_1} = \frac{1}{1,5} = 0,66$ – розрахунковий коефіцієнт;

$f=50 \text{ Гц}$ – частота мережі;

$\lambda_1 = \frac{h \cdot n}{\tau}$ – відносна глибина пазу, $\lambda_1 \approx 0,4$.

Для наших вихідних даних:

$$\tau = 0,0337 \cdot 4 \sqrt{\frac{10714,2 \cdot 0,66}{24 \cdot 50 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,4}} = 0,06 \text{ м.}$$

Діаметр розточення статора:

$$D_i = \frac{2p \cdot \tau}{\pi} = \frac{24 \cdot 0,06}{3,14} = 0,45 \text{ м.}$$

Отримано результат розрахунку, який цілком співпадає з діаметром, отриманим на основі методу машинної постійної Арнольда.

5.2 Розрахунок обмотки і магнітопровода статора

В статорі використовується двошарова петльова обмотка. Використання таких обмоток дозволяє зменшити витрати міді і ізоляційних матеріалів, а також покращити форму кривої ЕРС.

Розрахункова величина магнітного потоку полюса в режимі холостого ходу:

$$\Phi_{\delta 0} = B_{\delta 0} \cdot l \cdot \tau \cdot a_i = 1,07 \cdot 0,08 \cdot 0,0589 \cdot 0,716 = 0,0036 \text{ Вб}$$

(5.10)

ЕРС холостого ходу, обчислювана при звичайній стабілізації напруги і підмагнічування спинки якоря:

$$E_0 = k_e \cdot U_{\phi} = 1,14 \cdot 127 = 145 \text{ В.}$$

(5.11)

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

Попереднє число витків в фазі обмотки якоря:

$$w_{\phi} = \frac{E_0}{4k_b \cdot k_0 \cdot f \cdot \Phi_{\delta 0}} = \frac{145}{4 \cdot 1,11 \cdot 0,906 \cdot 50 \cdot 0,0036} = 200,26.$$

(5.12)

Приймаємо $w_{\phi} = 200$.

Номінальний струм фази:

$$I_{\text{нф}} = \frac{P_{\text{н}}}{m \cdot U_{\phi} \cdot \cos \varphi} = \frac{7142,8}{3 \cdot 127 \cdot 0,8} = 23,4 \text{ А.}$$

(5.13)

Число пазів статора:

$$Z = 2ptq,$$

(5.14)

де q – число пазів на полюс і фазу.

Якщо $2p > 8$ і незначному полюсному тиску q обирають дробовим. При дробовому q зменшується негативний вплив вищих гармонік на ЕРС.

Приймаємо $q = 1\frac{1}{4}$, тоді

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

Число ефективних провідників в пазі:

$$N_n = \frac{w_\phi \cdot a}{q \cdot p}, \quad (5.15)$$

де a – число паралельних гілок обмотки фази.

При виборі числа паралельних гілок необхідно, щоб струм в паралельній галці знаходився в межах 50...150 А.

В нашому випадку $a=1$, тоді:

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

Приймаємо $N_n=12$. Уточнюємо число витків в фазі:

$$w_\phi = \frac{N_n \cdot q \cdot p}{a} = \frac{12 \cdot 1\frac{1}{4} \cdot 12}{1} = 180. \quad (5.16)$$

Перевіряємо умови симетрії двошарової якірної обмотки.

Для виконання поставлених вимог(симетрії двошарової якірної обмотки) повинні виконуватися наступні умови:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{Z}{mt} - \text{ціле число;} \\ \frac{2p}{d} - \text{ціле число.} \end{array} \right. \quad (5.17)$$

де t – найбільший спільний дільник z та p ;

d – знаменник простого дробового числа q .

Перевіряємо виконання умови (5.17) для наших параметрів:

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

Таким чином, умови симетрії двошарової якірної обмотки дотриманні.

Зубцеве ділення:

$$\tau = \frac{\pi D}{Z} = \frac{3,14 \cdot 0,45}{90} = 0,0157 \text{ м.}$$

Уточнюємо лінійне навантаження:

$$A = \frac{Z \cdot N_n \cdot I_{нф}}{\pi \cdot D \cdot a} = \frac{90 \cdot 12 \cdot 23,4}{3,14 \cdot 0,45 \cdot 1} = 17885,4 \frac{\text{А}}{\text{м}}$$

Величина магнітного потоку в режимі холостого ходу:

$$\Phi_{\delta 0} = \frac{E_0}{4k_b \cdot k_0 \cdot f \cdot w_{\phi}} = \frac{145}{4 \cdot 1,11 \cdot 0,91 \cdot 50 \cdot 180} = 0,00399 \text{ Вб.}$$

Мінімальна ширина зубця. Для зменшення опору повітряного зазору и зниження зубцевих пульсацій пази статора виробляють напіввідкритими. При виготовленні обмотки якоря із проводу прямокутного розрізу, пази теж прямокутні, а зубці трапецеїдальні:

$$b_{z \min} = \frac{B_{\delta 0} \cdot t \cdot Z}{B_{z \max} \cdot k_c}, \quad (5.18)$$

де

$$B_{\delta 0} = \frac{\Phi_{\delta 0}}{l \cdot \tau \cdot a_i} = \frac{0,00399}{0,08 \cdot 0,0589 \cdot 0,716} = 1,18 \text{ Тл}; \quad (5.19)$$

$B_{z \max}$ – допустиме значення індукції в зубці, $B_{z \max} = 1,6 \dots 1,9$ Тл (для сталі 1411);

k_c – коефіцієнт заповнення сталлю магнітопровода;

$k_c = 0,95$ при товщині листа $\Delta_l = 3,5 \cdot 10^{-4}$ м.

Для отриманих результатів маємо:

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

Попереднє значення ширину пазу:

$$b_{\Pi} = \frac{\pi(D + 2h_k)}{Z} - b_{Z \min}, \quad (5.20)$$

де h_k – висота коронки зубця, $h_k = (1,3 \dots 1,5)10^{-3}$ м.

З урахуванням цих параметрів отримаємо:

$$b_{\Pi} = \frac{3,14(0,45 + 2 \cdot 0,0014)}{90} - 0,0102 = 0,0056 \text{ м.}$$

Переріз ефективного провідника обмотки статора:

$$q_{\text{еф}} = \frac{I_{\text{н}}}{a \cdot j_1}, \quad (5.21)$$

де j_1 – допустима густина струму.

Густина струму в провідниках обмотки якоря при тривалому режимі роботи і при самовентиляції $j_1 = (5 \dots 12)10^6$ А/м².

Приймаємо $j_1 = 5$ А/мм², тоді:

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

Розрахункова ширина ізолюваного провідника:

$$a_{\text{из}} = \frac{b_n - 2 \cdot \Delta n}{n_{\text{ш}}} = \frac{0,0056 - 2 \cdot 0,0002}{4} = 0,0017 \text{ м.} \quad (5.22)$$

де $n_{\text{ш}}$ – число ефективних провідників по ширині паза;

Δn – товщина пазової ізоляції.

В якості пазової ізоляції використовують склослюдинити і поліамідну плівку. В такому випадку сумарна товщина ізоляції на сторону $\Delta n = (0,18 \dots 0,22)10^{-3}$ м.

Розрахункова ширина неізолюваного проводу:

$$a_{\text{низ}} = a_{\text{из}} - \Delta_{\text{из}} = 0,0017 - 0,0003 = 0,0014 \text{ м.} \quad (5.21)$$

де $\Delta_{\text{из}}$ – товщина ізоляції проводу по обидві сторони.

Для обмотки статора використовується проводи ПНСДК та ПНСДКТ ($t_p = 250 \dots 400$ °С) с двосторонньою ізоляцією $\Delta_{\text{из}} = (0,2 \dots 0,3)10^{-3}$ м.

Стандартні розміри неізольованих проводів, що серійно випускаються:

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

Уточнена ширина пазу:

$$b_n = n_{ш}(a + \Delta_{із}) + 2\Delta_n = 3(1,32 + 0,3) + 2 \cdot 0,2 = 5,26\text{ мм}.$$

Приймаємо $b_n = 5,3\text{ мм}$.

Висота пазу:

$$\begin{aligned} h_n &= n_b(b + \Delta_{із}) + 3 \cdot \Delta_n + h_k + h_{кл} = \\ &= 4(3,55 + 0,3) + 3 \cdot 0,2 + 1,5 + 0,6 = 18,1\text{ мм}, \end{aligned} \quad (5.23)$$

де n_b – число провідників по висоті паза;

$h_{кл}$ – висота клину, $h_{кл}=(5\dots 8)10^{-4}\text{ м}$.

Ширина щілини напіввідкритого пазу:

$$b_{ш} = a + \Delta_{із} + \Delta_{ш} = 1,32 + 0,3 + 0,8 = 2,22\text{ мм}. \quad (5.24)$$

де $\Delta_{ш}$ – припуск по ширині щілини, $\Delta_{ш}=(7\dots 8)10^{-4}\text{ м}$.

Ескіз паза приведений на рис. 5.1.

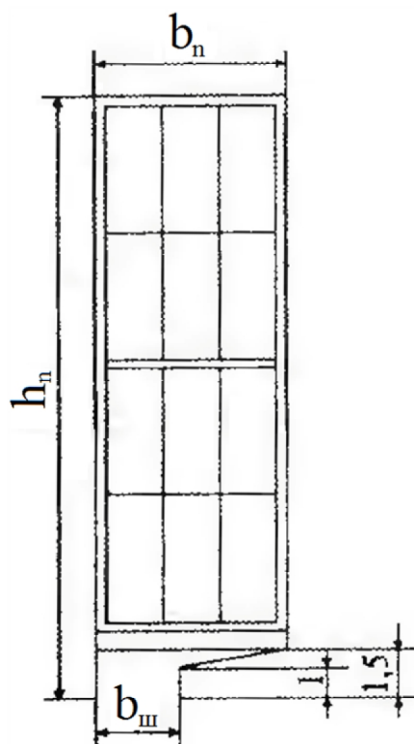


Рис. 5.1 – Ескіз статорного паза синхронного генератора

Уточнена густина струму:

$$j_a = \frac{I_{нф}}{q_a} = \frac{23,4}{4,471} = 5,23 \text{ А/мм}^2. \quad (5.25)$$

Уточнена мінімальна ширина зубця:

$$b_{Z \min} = \frac{\pi(D + 2h_k)}{Z} - b_n = \frac{3,14(0,45 + 2 \cdot 0,0015)}{90} - 0,0053 = 0,0105 \text{ м.} \quad (5.26)$$

Уточнена індукція в вузькому перерізі зубця:

$$B_{Z \max} = \frac{B_{\delta 0} \cdot t_z}{b_{Z \min} \cdot k_c} = \frac{1,18 \cdot 0,0157}{0,0105 \cdot 0,95} = 1,86 \text{ Тл.} \quad (5.27)$$

Висота спинки статора:

$$h_a = \frac{\Phi_{\delta 0}}{2l \cdot k_c \cdot B_d} = \frac{0,00399}{2 \cdot 0,08 \cdot 0,95 \cdot 1,5} = 0,521 \text{ м.} \quad (5.28)$$

де B_d – допустима індукція в спинці якоря. Для сталі 1411 $B_d \leq 1,5$ Тл.

Зовнішній діаметр статора:

$$D_d = D + 2h_n + 2h_a = 0,45 + 2 \cdot 0,0181 + 2 \cdot 0,0175 = 0,521 \text{ м.} \quad (5.29)$$

Отримане значення округляємо до найближчого нормалізованого діаметру $D_{dcc} = 0,52 \text{ м.}$

Уточнена висота спинки статора:

$$h_a = \frac{D_d - D - 2h_n}{2} = \frac{0,52 - 0,45 - 2 \cdot 0,0181}{2} = 0,0169 \text{ м.} \quad (5.30)$$

Уточнена індукція в спинки статора:

$$B_d = \frac{\Phi_{\delta 0}}{2 \cdot l \cdot k_c \cdot h_a} = \frac{0,00399}{2 \cdot 0,08 \cdot 0,95 \cdot 0,0169} = 1,55 \text{ Тл.} \quad (5.31)$$

Крок обмотки статора. Двошарові обмотки статора, як правило, виконують с укороченим шагом:

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

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

$$\text{Тоді } y_1 = (0,8 \dots 0,86) 3,75 = 3 \dots 3,225$$

Приймаємо $y_1=3$ і маємо:

$$\beta = \frac{y_1}{\tau_n} = \frac{3}{3,75} = 0,8.$$

Коефіцієнт укорочення:

$$k_y = \sin \frac{\pi \cdot \beta}{2} = \sin \frac{3,14 \cdot 0,8}{2} = 0,95. \quad (5.32)$$

Коефіцієнт розподілу:

$$k_p = \frac{0,5}{(b \cdot d + c) \sin \left(\frac{30^\circ}{b \cdot d + c} \right)}, \quad (5.33)$$

Відомо, що для обмотки с дробовим q

$$q_1 = b + \frac{c}{d},$$

де b – ціле число;

$\frac{c}{d}$ – правильний нескоротний дріб.

Звідси маємо, що

$$b \cdot d + c = 1 \cdot 4 + 1 = 5,$$

Тоді

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

Обмотковий коефіцієнт:

$$k_a = k_y \cdot k_p = 0,95 \cdot 0,958 = 0,91. \quad (5.34)$$

Коефіцієнт повітряного зазору:

$$k_\delta = \frac{t_z + \frac{5t_z \cdot \delta}{b_{\text{ш}}}}{t_z + \frac{5t_z \cdot \delta}{b_{\text{ш}}} - b_{\text{ш}}} = \frac{15,77 + \frac{5 \cdot 15,7 \cdot 0,6}{2,22}}{15,77 + \frac{5 \cdot 15,7 \cdot 0,6}{2,22} - 2,22} = 1,064, \quad (5.35)$$

де δ – величина повітряного зазору, $\delta=0,6$ мм.

Схеми трифазної обмотки представленні на рис. 5.2-5.3.

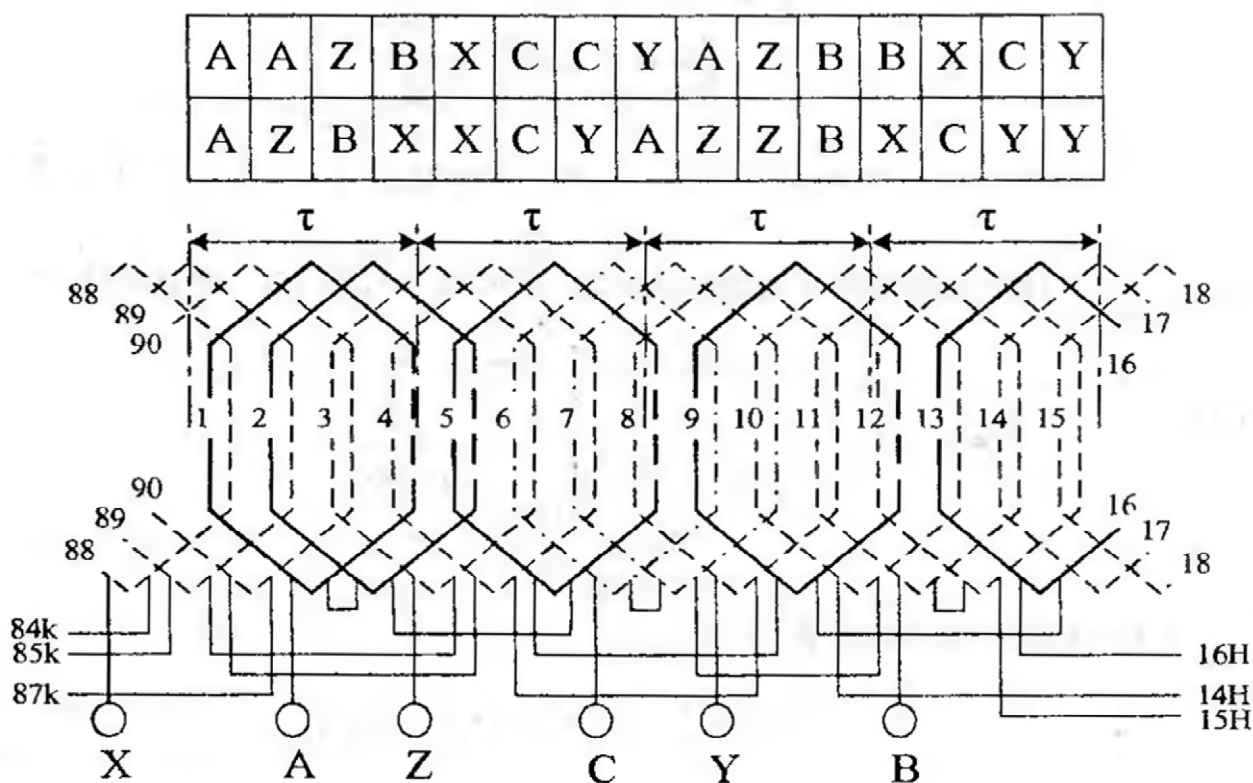


Рис. 5.2 – Схема обмотки статора

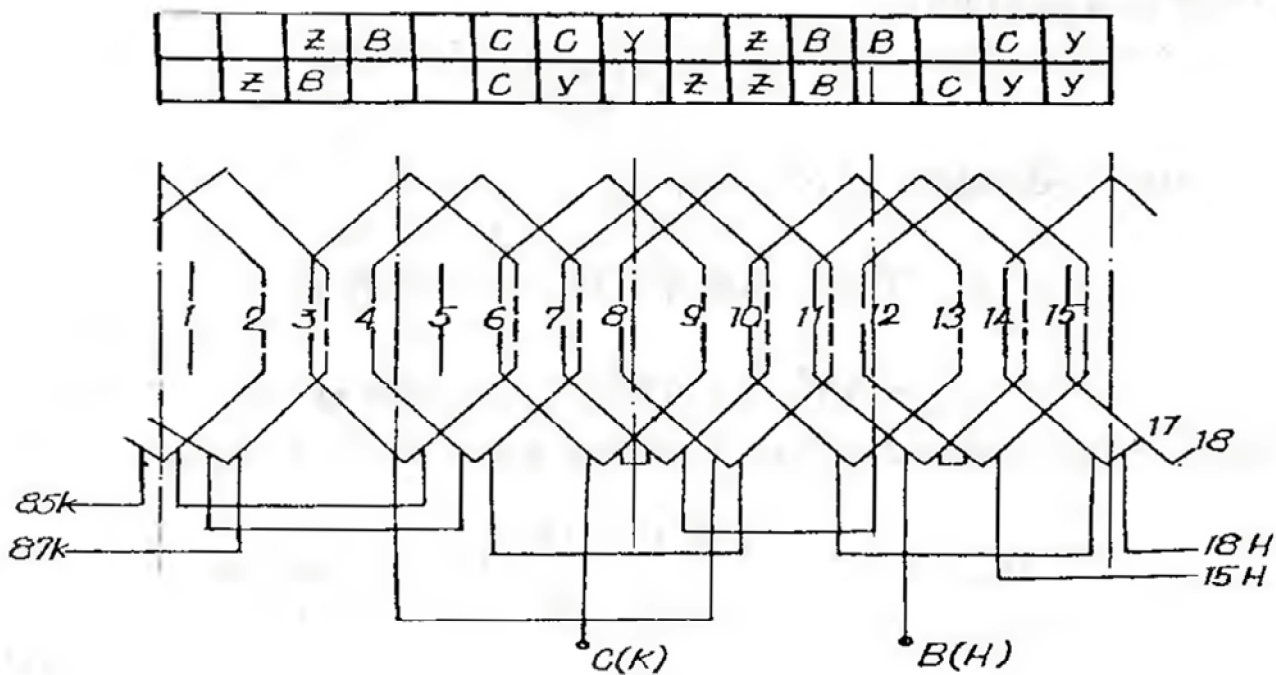


Рис. 5.3 – Схема обмотки на одне чередування

5.3 Параметри схеми заміщення

Активний опір фази обмотки якоря:

$$R_d = \rho_0 \frac{l_{cp} \omega_\phi}{q_d \cdot a} k_t, \quad (5.36)$$

де ρ_0 – питомий опір при $t=20$ °C, $\rho_0=1,75 \cdot 10^{-8}$ Ом·м;

l_{cp} – середня довжина витка;

k_t – температурний коефіцієнт опору, $k_t=1,22$

Середня довжина витка:

$$l_{cp} = 2(l + l_\pi), \quad (5.37)$$

де l_π - довжина лобової частини витка,

$$l_\pi = 1,4\tau = 1,4 \cdot 0,0589 = 0,08246 \text{ м.}$$

тоді

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

Значення активного опору фази обмотки якоря:

$$R_d = 1,75 \cdot 10^{-8} \frac{0,325 \cdot 180}{4,471 \cdot 10^{-6}} 1,22 = 0,28 \text{ Ом.} \quad (5.38)$$

Індуктивний опір розсіювання фази обмотки якоря:

$$x_\sigma = 4\pi \cdot \mu_0 \cdot f \frac{\omega_\phi^2}{p \cdot q} [(\lambda_\pi + \lambda_d) l + \lambda_\pi \cdot l_\pi], \quad (5.39)$$

де $\lambda_\pi, \lambda_d, \lambda_\pi$ – питомі провідності лобового, диференційного, пазового розсіювання відповідно.

Питомі провідність пазового розсіювання для прямокутного пазу:

$$\lambda_\pi = \frac{k_{y1} \cdot (h_n - h_k)}{3b_n} + \frac{k_{y2} \cdot h_k}{b_\pi}, \quad (5.40)$$

де k_{y1}, k_{y2} – коефіцієнти, які враховують укорочення обмотки:

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

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

Питома провідність пазового розсіювання:

$$\lambda_n = \frac{0,85(18,1 - 1,5)}{3 \cdot 5,3} + \frac{0,8875 \cdot 1,5}{2,22} = 1,487; \quad (5.41)$$

Питома провідність диференційного розсіювання:

$$\lambda_D = \frac{\delta_p \cdot a_i}{b_{\text{щ}} + 0,8\delta_p} (0,25 + 0,75\beta) = \frac{0,6384 \cdot 0,716}{2,22 + 0,8 \cdot 0,6384} \cdot (0,25 + 0,75 \cdot 0,8) = 0,142, \quad (5.42)$$

де a_i – розрахунковий коефіцієнт полюсного перекриття,

$$a_i = a_p + \frac{4}{\frac{\tau}{\delta_p} + \frac{6}{1 - a_p}} = 0,68 + \frac{4}{\frac{0,05899}{0,6384 \cdot 10^{-3}} + \frac{6}{1 - 0,68}} = 0,716, \quad (5.43)$$

А коефіцієнт δ_p розраховується по формулі:

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

Питома провідність лобового розсіювання:

$$\lambda_l = \frac{0,34q(l_l - 0,64\beta \cdot \tau)}{l} = \frac{0,34 \cdot \frac{5}{4} (0,08246 - 0,64 \cdot 0,8 \cdot 0,0589)}{0,08} = 0,278. \quad (5.44)$$

Таким чином:

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

Ом.

Індуктивний опір якоря по повздожній x_{ad} та поперечній осям

відповідно:

$$x_{ad} = \frac{4\mu_0}{\pi \cdot p} m \cdot f(\omega_\phi \cdot k_0)^2 \Lambda_{ad}; \quad (5.43)$$

$$x_{aq} = \frac{4\mu_0}{\pi \cdot p} m \cdot f(\omega_\phi \cdot k_0)^2 \Lambda_{aq}; \quad (5.44)$$

де Λ_{ad} , Λ_{aq} – коефіцієнти провідності машини по повздожній та поперечній осях відповідно.

Коефіцієнт провідності машини по повздожній:

$$\Lambda_{ad} = k_b \cdot k_{ad} \frac{\Lambda_{\delta d} \cdot \Lambda_{nd}}{\Lambda_{\delta d} + \Lambda_{nd}}, \quad (5.45)$$

де k_b – коефіцієнт форми поля збудження (при типовому співвідношенні розмірів індуктору та рівномірному повітряному зазорі, $k_b = 1,05 \dots 1,1$);

k_{ad} – коефіцієнт реакції якоря по повздожній осі;

$\Lambda_{\delta d}$ – коефіцієнт магнітної провідності повітряного зазору по повздожній осі;

Λ_{nd} – коефіцієнт магнітної провідності полюса в повздожньому напрямленні.

Коефіцієнт реакції якоря по повздожній осі:

$$k_{ad} = \frac{a_p \cdot \pi + \sin(a_p \cdot \pi)}{4 \sin\left(a_p \frac{\pi}{2}\right)} = \frac{0,68 \cdot 3,14 + \sin(0,68 \cdot 3,14)}{4 \sin\left(0,68 \frac{3,14}{2}\right)} = 0,85. \quad (5.46)$$

Коефіцієнт магнітної провідності повітряного зазору по повздожній осі:

$$\Lambda_{\delta d} = \frac{t \cdot l}{k_{ml} \cdot d_p}, \quad (5.47)$$

де k_{ml} – коефіцієнт, який враховую насичення магнітного кола машини по повздожній осі, $k_{ml} = 1,1 \dots 1,3$.

Таким чином, коефіцієнт магнітної провідності повітряного зазору по повздожній осі:

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

Коефіцієнт магнітної провідності полюса в повздожньому напрямленні:

$$\Lambda_{nd} = \frac{m_{bnM} \cdot h_M \cdot l_M}{h_M}, \quad (5.48)$$

де μ_{bnM} – магнітна проникність повернення матеріалу постійного магніту для магніту з матеріалу $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}_2$ $\mu_{bnM}=1,23$;

h_M, l_M, b_M – довжина, висота і ширина магніту відповідно.

В нашому випадку $b_M=40\text{мм}$; $h_M=6\text{мм}$; $l_M=80\text{мм}$.

Таким чином, коефіцієнт магнітної провідності полюса в повздовжньому напрямленні:

$$\Lambda_{nd} = \frac{1,26 \cdot 0,04 \cdot 0,08}{0,006} = 0,0672.$$

Розраховуємо коефіцієнт провідності машини по повздовжній осі:

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

Тепер розраховуємо провідність машини по поперечній осі:

$$\Lambda_{aq} = k_b \cdot k_{aq} \frac{\Lambda_{\delta q} \cdot \Lambda_{nq}}{\Lambda_{\delta q} + \Lambda_{nq}},$$

де k_{aq} – коефіцієнт реакції якоря по поперечній осі;

$\Lambda_{\delta q}$ – коефіцієнт магнітної провідності повітряного зазору по поперечній осі;

Λ_{nq} – коефіцієнт магнітної провідності полюса в поперечному напрямку.

Коефіцієнт реакції якоря по повздовжній осі:

$$k_{ad} = \frac{a_p \cdot \pi + \sin(a_p \cdot \pi) + \frac{2}{3} \cos\left(a_p \frac{\pi}{2}\right)}{4 \sin\left(a_p \frac{\pi}{2}\right)} = \frac{0,68 \cdot 3,14 + \sin(0,68 \cdot 3,14) + \frac{2}{3} \cos\left(0,68 \frac{3,14}{2}\right)}{4 \sin\left(0,68 \frac{3,14}{2}\right)} = 0,46. \quad (5.49)$$

Коефіцієнт магнітної провідності повітряного зазору по поперечній осі:

$$\Lambda_{\delta q} = \frac{\tau \cdot l}{k_{\mu q} \cdot \delta_p}, \quad (5.50)$$

де $k_{\mu q}$ – коефіцієнт, який враховує насиченість магнітного кола машини по поперечній осі, $k_{\mu q} = 1, 2 \dots 1, 4$.

Таким чином, коефіцієнт магнітної провідності повітряного зазору по поперечній осі:

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

Коефіцієнт магнітної проникності полюса в поперечному напрямку:

$$\Lambda_{nq} = \frac{2\mu_{bnM} \cdot h_M \cdot l_M}{h_M} = \frac{2 \cdot 1,26 \cdot 0,038 \cdot 0,08}{0,04} = 0,194. \quad (5.51)$$

Таким чином, коефіцієнт магнітної провідності полюса в поперечному напрямі:

$$\Lambda_{aq} = 1,11 \cdot 0,46 \frac{5,86 \cdot 0,194}{5,86 + 0,194} = 0,09588. \quad (5.52)$$

Індуктивний опір якоря по повздовжній x_{ad} та поперечній x_{aq} осям:

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

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

Повні індуктивні опори обмотки якоря по повздовжній та поперечній осям відповідно дорівнюють:

$$x_d = x_{ad} + x_{\sigma} = 0,0527 + 0,261 = 0,313 \text{ Ом}; \quad (5.53)$$

$$x_q = x_{aq} + x_{\sigma} = 0,0514 + 0,261 = 0,3124 \text{ Ом}; \quad (5.54)$$

5.4 Визначення розмірів ротора

В відповідності з існуючим стандартом промисловістю випускаються постійні магніти призматичної форми на основі рідкоземельних матеріалів. В зв'язку з цим на практиці і при проектуванні широкого застосування набули

збірні конструкції роторів (індукторів) синхронних генераторів с збудженням від постійних магнітів. В проектному генераторі застосований ротор з призматичними магнітами типу «зірка». В таких роторах використовують магніти з радіальним намагнічуванням.

Конструкція збірного ротора типу «зірка» в своєму складі має намагнічені в радіальному напрямі постійні магніти, які своїми внутрішніми торцями примикають до магнітної втулки, закріпленої на валу генератора.

Повітряний зазор між статором і ротором приймаємо $\delta = 0,6$ мм.

Розраховуємо зовнішній діаметр ротора:

$$D_p = D - 2\delta = 0,45 - 2 \cdot 0,0006 = 0,4488 \text{ м.} \quad (5.55)$$

Приймаємо конструктивний коефіцієнт полюсного перекриття: $a_p = 0,68$.

Визначаємо розрахунковий коефіцієнт полюсного перекриття:

$$a_i = a_p + \frac{4}{\frac{\tau}{\delta_p} + \frac{6}{1 - a_p}} = 0,68 + \frac{4}{\frac{0,05899}{0,6384 \cdot 10^{-3}} + \frac{6}{1 - 0,68}} = 0,716. \quad (5.56)$$

Розраховуємо ширину полюса:

$$b_m = a_p \cdot \tau = 0,68 \cdot 0,0589 = 0,04 \text{ м.} \quad (5.57)$$

Приймаємо висоту полюса $h_M = 0,006$ м.

Визначаємо довжину полюса рівній довжині статора, тобто:

$$l_M = l = 0,08 \text{ м.}$$

Ескіз магнітної системи генератора зображено на рис. 5.4.

Позначення рис. 5.4:

b_M, h_M – ширина та висота полюса відповідно;

D_i – діаметр розточки статора;

D_d – зовнішній діаметр ротора;

D_p – зовнішній діаметр ротора.

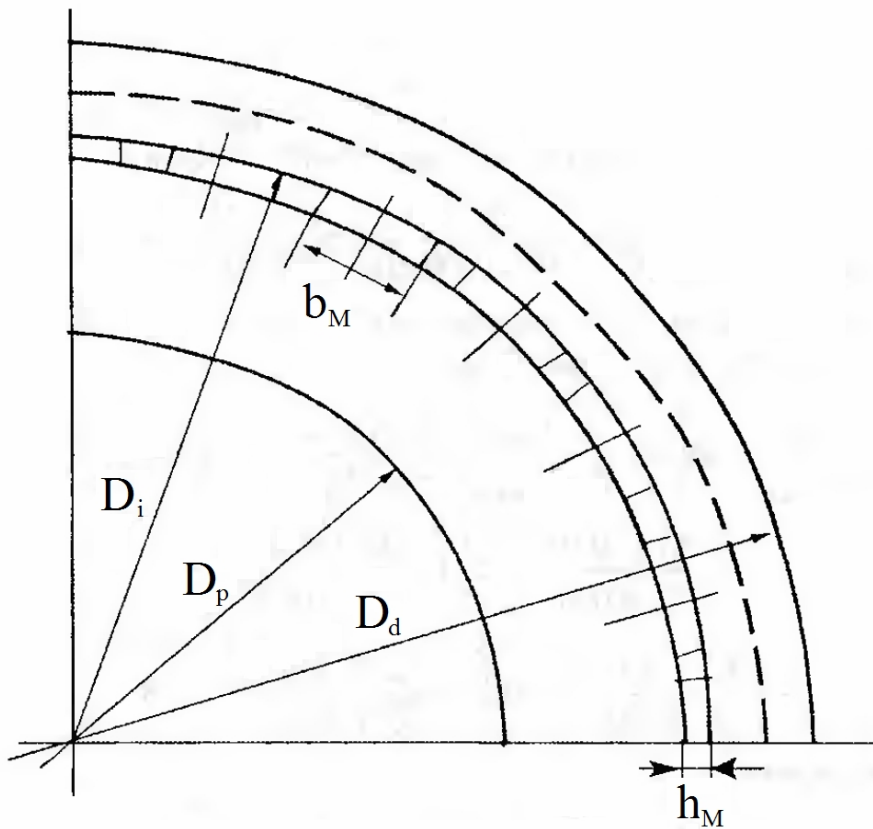


Рис. 5.4 – Ескіз магнітної системи синхронного генератора з постійними магнітами

5.5 Розрахунок провідності розсіювання індуктора

Використанні в розрахунках додаткові геометричні розміри індуктора показані на малюнку.

Провідність розсіювання магніту розраховується по формулі:

$$A_{SM} = K_{\lambda} \cdot \Lambda_{em}, \quad (5.58)$$

де K_{λ} – коефіцієнт послаблення потоку розсіювання;

Λ_{em} – провідність розсіювання.

Провідність розсіювання Λ_{em} можна розрахувати по формулі:

$$\Lambda_{em} = \left(5l_M \frac{h_M}{\Delta_{max}} \cdot \varphi_a + 1,6h_v \cdot \varphi_{\beta} \right) 10^{-6}, \quad (5.59)$$

$$\begin{aligned} \Phi_a &= \frac{\Delta_{\max}}{\Delta_{\max} - \Delta_{\min}} \left[1 - \frac{\Delta_{\min}}{\Delta_{\max} - \Delta_{\min}} \ln \left(\frac{\Delta_{\max}}{\Delta_{\min}} \right) \right] = \\ \text{де} & \\ &= \frac{0,021}{0,021 - 0,009} \left[1 - \frac{0,009}{0,021 - 0,009} \ln \left(\frac{0,021}{0,009} \right) \right] = 0,634. \end{aligned} \quad (5.60)$$

Δ_{\max} і Δ_{\min} відповідно приймаємо рівними 21 і 9 мм.

$$\begin{aligned} \Phi_\beta &= \frac{\pi \cdot b_m}{2 \cdot \Delta_{\max}} + \ln \left(1 + \frac{\pi \cdot b_m}{2 \cdot \Delta_{\max}} \right) - \left(\frac{\pi \cdot b_m}{2 \cdot \Delta_{\max}} \right)^2 \ln \left(1 + \frac{2 \cdot \Delta_{\max}}{\pi \cdot b_m} \right) = \\ &= \frac{3,14 \cdot 0,04}{2 \cdot 0,021} + \ln \left(1 + \frac{3,14 \cdot 0,04}{2 \cdot 0,021} \right) - \left(\frac{3,14 \cdot 0,04}{2 \cdot 0,021} \right)^2 \cdot \ln \left(1 + \frac{2 \cdot 0,021}{3,14 \cdot 0,04} \right) = 1,78. \end{aligned} \quad (5.61)$$

Таким чином:

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

Значення коефіцієнта k_λ залежить від конфігурації між полюсного простору, коефіцієнта магнітної проникності магніту та визначається по графікам, наведених в рис., в залежності від співвідношення $\frac{\Delta_{\min}}{\Delta_{\max}}$ та величини ξ :

$$\frac{\Delta_{\min}}{\Delta_{\max}} = \frac{9}{21} = 0,428.$$

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

$$S_b = \frac{B_R}{H_C} = \frac{1,23}{880 \cdot 10^3} = 1,4 \cdot 10^{-3} - \text{для } Nd_{15}Fe_{11}B_8);$$

$$k_\lambda = 0,15 \text{ (із рис.)}; A_{SM} = 0,15 \cdot 0,5671 \cdot 10^{-6}.$$

5.6 Розрахунок магнітного кола і побудова робочих діаграм магнітів.

МДС повітряного зазору:

$$F_{\delta 0} = 0,8 B_{\delta 0} \cdot \delta_p \cdot 10^6 = 0,8 \cdot 1,18 \cdot 0,6384 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6 = 603 \text{ А.} \quad (5.62)$$

$$B_{\delta 0} = \frac{\Phi}{l \tau a_i} = \frac{0,00399}{0,08 \cdot 0,0589 \cdot 0,716} = 1,18 \text{ Тл.} \quad (5.63)$$

$$\Phi_{\delta 0} = \frac{E_0}{4k_b \cdot k_0 \cdot f \cdot \omega_\phi} = \frac{150}{4 \cdot 1,11 \cdot 0,91 \cdot 240 \cdot 50} = 0,00309 \text{ Вб} \quad (5.64)$$

Розрахункова індукція в зубцях:

$$B_{Z0} = \frac{B_{\delta 0} \cdot t_z}{b_z \cdot k_{zc}}, \quad (5.65)$$

де b_z – розрахункова ширина зубця,

$$b_z = \frac{\frac{\pi(D + 2h_n)}{Z} - b_n + 2b_{z\min}}{3}, \quad (5.66)$$

де $b_{z\min}$ – мінімальна ширина зубця,

$$b_{z\min} = \frac{\pi(D + 2h_k)}{Z} - b_n = \frac{3,14(0,45 + 2 \cdot 0,0015)}{90} - 5,3 \cdot 10^{-3} = 0,0105 \text{ м.} \quad (5.67)$$

Таким чином:

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

$$B_{Z0} = \frac{1,18 \cdot 0,0157}{0,0109 \cdot 0,95} = 1,79 \text{ Тл.}$$

Напруженість поля в зубці визначається по кривій намагнічування сталі 1411: $H_z = 17100 \text{ А/м.}$

МРС, необхідна для проведення потоку через зубцеву зону:

$$H_{z0} = h_n \cdot H_z = 0,0101 \cdot 17100 = 309,5 \text{ А.} \quad (5.68)$$

Розрахункова індукція в спинці якоря:

$$B_{do} = \frac{\Phi_{\delta 0}}{2l \cdot h_d \cdot k_{zc}} = \frac{0,00399}{2 \cdot 0,08 \cdot 0,0169 \cdot 0,95} = 1,55 \text{ Тл.} \quad (5.69)$$

Напруженість поля в спинці якоря визначається по кривій намагнічування сталі 1411: $H_d = 4420$ А/м.

МРС на проведення струму через спинку якоря:

$$F_{da} = L_a \cdot H_a, \quad (5.70)$$

де L_a – середня лінія силової лінії в спинці якоря,

$$L_a = \frac{\pi(D + 2h_n + 2h_a)}{2p} = \frac{3,14(0,45 + 2 \cdot 0,0181 + 0,0169)}{24} = 0,0658 \text{ м.} \quad (5.71)$$

Таким чином:

$$F_{da} = 0,0853 \cdot 4420 = 290,8 \text{ А.}$$

Сумарна МРС на пару полюсів, необхідна для проведення магнітного потоку:

$$F_{ha} = 2F_{\delta a} + 2F_{za} + F_{da} = 2 \cdot 603 + 2 \cdot 309,5 + 290,8 = 2115,8 \text{ А.} \quad (5.72)$$

Індукція в тілі ротора:

$$B_{dp} = \frac{\Phi_{\sigma 0} \cdot \sigma}{2S_{ap}}, \quad (5.73)$$

де S_{ap} – переріз спинки ротора;

σ – коефіцієнт розсіювання магніту.

Переріз спинки ротора:

$$S_{ap} = h_{ap} \cdot l_{ap}. \quad (5.74)$$

де l_{ap} – довжина спинки ротора, $l_{ap} = l = 0,08$ м.;

h_{ap} – висота спинки ротора,

$$h_{ap} = \frac{D_p - 2h_m - d_b}{2}, \quad (5.75)$$

де d_b – внутрішній діаметр росточки спинки ротора, $d_b = 0,3$ м.

Висота та переріз спинки ротора:

$$h_{ap} = \frac{0,4488 - 2 \cdot 0,38 - 0,31}{2} = 0,0314 \text{ м.}$$

$$S_{ap} = 0,0314 \cdot 0,08 = 0,002512 \text{ м}^2.$$

Коефіцієнт розсіювання магніту:

$$\sigma = 1 + \frac{\Phi_{sm}}{\Phi_{\delta 0}}, \quad (5.76)$$

де Φ_{sm} – потік розсіювання магніту,

$$\Phi_{sm} = 0,5 F_{10} \cdot \Lambda_{SM} = 0,5 \cdot 2115,8 \cdot 0,85 \cdot 10^{-6} = 0,0000399 \text{ Вб.} \quad (5.77)$$

$$\sigma = 1 + \frac{0,0000899}{0,0039} = 1,03,$$

$$B_{dp} = \frac{0,00399 \cdot 1,03}{2 \cdot 0,00022512} = 0,818 \text{ Тл.}$$

Напруженість магнітного поля в спинці ротора визначається по кривій намагнічування сталі 1411: $H_{ap} = 137 \text{ А/м.}$

МРС, затрачена на проведення потоку через спинку ротора:

$$F_{ap} = H_{ap} \cdot L_{ap}, \quad (5.78)$$

де L_{ap} – середня лінія силової лінії спинці ротора.

$$L_{ap} = \frac{\pi(D_p - 2h_n - h_{ap})}{2p} = \frac{3,14(0,4488 + 2 \cdot 0,038 + 0,0314)}{24} = 0,0448 \text{ м.}$$

(5.79)

Таким чином:

$$F_{ap} = 197 \cdot 0,0448 = 6,14 \text{ А.}$$

Індукція на стику магніту:

$$B_{СТ.М} = \frac{\Phi_{\delta a} \cdot \sigma}{b_M \cdot l_M} = \frac{1,03 \cdot 0,00399}{0,041 \cdot 0,081} = 1,284 \text{ Тл.} \quad (5.80)$$

Падіння МРС в стиках магніту на один полюс:

$$F_{СТ.М} = 1,6 B_{СТ.М} \cdot \delta_{СТ,М} \cdot 10^6, \quad (5.81)$$

де $\delta_{CT,M}$ – розрахунковий розмір стиків магнітів з магнітопровідною втулкою, $\delta_{CT,M} = 5 \cdot 10^{-5}$ м.

Тоді

$$F_{CT,M} = 1,6 \cdot 1,284 \cdot 10^{-5} \cdot 5 \cdot 10^6 = 102,7 \text{ А.} \quad (5.82)$$

МРС магніту на пару полюсів:

$$F_{MA} = F_{10} + 2F_{CT,M} + F_{ap} = 2115,8 + 2 \cdot 102,7 + 6,14 = 2327,34 \text{ А.} \quad (5.83)$$

В випадку застосування магнітів з рідкоземельних матеріалів і кобальту крива розмагнічування співпадає з прямою повернення. Її отримують по двом точкам: залишковому потоці Φ_r та коерцитивній силі МРС F_c .

Для конструкції індуктора типу «збірної зірки»

$$\Phi_r = B_r \cdot S_M = B_r \cdot b_M \cdot l_M = 1,23 \cdot 0,08 \cdot 0,04 = 0,003936 \text{ Вб.} \quad (5.84)$$

де B_r – залишкова індукція в матеріалі магніту.

Для сплаву $\text{Nd}_{15}\text{Fe}_{11}\text{B}_8$

$$B_r = 1,23 \text{ Тл.}$$

$$F_c = 2h_M \cdot H_c = 2 \cdot 0,038 \cdot 880 \cdot 10^3 = 66880 \text{ А.} \quad (5.85)$$

де H_c – коерцитивна сила. Для сплаву $\text{Nd}_{15}\text{Fe}_{11}\text{B}_8$ $H_c = 880 \text{ кА/м}$.

Потік магніту визначається по формулі:

$$\Phi_{ma} = \Phi_{\delta a} + \Phi_{SM}, \quad (5.86)$$

де Φ_{SM} – потік розсіювання магніту.

$$\Phi_{SM} = 0,5F_{10} \cdot \Lambda_{SM} = 0,5 \cdot 2115,8 \cdot 0,085 \cdot 10^{-6} = 0,0000899 \text{ Вб.} \quad (5.87)$$

$$\Phi_{ma} = 0,00399 + 0,0000899 = 0,00408 \text{ Вб.}$$

5.7 Визначення маси активних матеріалів, втрат и ККД генератора

Маса міді обмотки якоря

$$M_{od} = m \cdot \omega_{\phi} \cdot l_{cp} \cdot q_a \cdot \gamma_M = 3 \cdot 380 \cdot 0,325 \cdot 4,471 \cdot 7,8 \cdot 10^3 \cdot 10^{-6} = 6,12 \text{ кг.}$$

(5.88)

Маса зубців якоря:

$$M_Z = \left\{ \frac{\pi}{4} \left[(D + 2h_n)^2 - D^2 \right] - z \cdot b_n \cdot h_n \right\} \cdot l \cdot k_{3C} \cdot \gamma_{CT} =$$
$$\left\{ \frac{3,14}{4} \left[(0,45 + 2 \cdot 0,0181)^2 - 0,45^2 \right] - 90 \cdot 5,3 \cdot 18,1 \cdot 10^{-6} \right\} \cdot$$
$$\cdot 0,08 \cdot 0,95 \cdot 8 \cdot 10^3 = 10,9 \text{ кг.} \quad (5.89)$$

Маса спинки якоря:

$$M_{a1} = \pi(D + 2h_n + h_a)h_a \cdot l \cdot k_{3C} \cdot \gamma_{CT} \quad (5.90)$$

$$M_{a1} = 3,14(0,45 + 2 \cdot 0,0181 + 0,0169)0,0169 \cdot 0,08 \cdot 0,95 \cdot 8 \cdot 10^3 = 16,2 \text{ кг.}$$

Маса активних матеріалів статора:

$$M_1 = M_{od} + M_Z + M_{a1} = 6,12 + 10,9 + 16,2 = 33,22 \text{ кг.} \quad (5.91)$$

Маса постійних магнітів:

$$M_{nM} = 2\rho \cdot b_M \cdot h_M \cdot l_M \cdot \gamma_{nM} =$$
$$= 24 \cdot 0,04 \cdot 0,006 \cdot 0,08 \cdot 8,4 \cdot 10^3 = 3,87 \text{ кг.} \quad (5.92)$$

Маса ярма індуктора:

$$M_{a2} = \frac{\pi}{4} \left[(D_{a2} + 2h_{ap})^2 - D_{a2}^2 \right] \cdot k_{am} \cdot \gamma_{CT} =$$
$$= \frac{3,14}{4} \left[(0,31 + 2 \cdot 0,0314)^2 - 0,31^2 \right] 0,08 \cdot 1,2 \cdot 8 \cdot 10^3 = 25,9 \text{ кг.} \quad (5.93)$$

Маса активних матеріалів:

$$M_2 = M_{nm} + M_{a2} = 3,87 + 25,9 = 29,8 \text{ кг.} \quad (5.94)$$

Повна маса генератора:

$$M_{\Gamma} = K_{КОП} \cdot M_{am} = 1,7 \cdot 63 = 107 \text{ кг,} \quad (5.95)$$

де $K_{КОП} = 1,5 \dots 1,7$.

Втрати в міді якоря:

$$P_M = m \cdot I_{\text{ндф}}^2 \cdot K_a = 3 \cdot 23,4^2 \cdot 0,28 = 460 \text{ Вт.} \quad (5.96)$$

Втрати в сталі зубців якоря:

$$P_Z = p_0 \cdot k_{Tz} \cdot B_Z^2 \left(\frac{f}{50} \right)^{1,5} M_Z = 2 \cdot 2,1 \cdot 1,79^2 \left(\frac{50}{50} \right)^{1,5} 10,9 = 146,7 \text{ Вт,} \quad (5.97)$$

де $k_{Tz} = 2 \dots 2,2$.

Втрати в сталі ярма якоря:

$$P_d = p_0 \cdot k_{Td} \cdot B_d^2 \left(\frac{f}{50} \right)^{1,5} M_{a1} = 2 \cdot 1,5 \cdot 1,55^2 \left(\frac{50}{50} \right)^{1,5} 16,2 = 116,8 \text{ Вт,} \quad (5.98)$$

де $k_{Td} = 1,4 \dots 1,6$.

Механічні втрати:

$$P_{MEH} = 0,02 S_n \cdot \cos \varphi = 0,02 P_n = 0,02 \cdot 5000 \cdot 0,8 = 80 \text{ Вт.} \quad (5.99)$$

Додаткові втрати:

$$P_{\text{доод}} = 0,01 S_n \cdot \cos \varphi = 0,01 P_n = 0,01 \cdot 5000 \cdot 0,8 = 40 \text{ Вт.} \quad (5.100)$$

Сумарні втрати:

$$\begin{aligned} \Sigma P &= P_M + P_Z + P_d + P_{\text{мех}} + P_{\text{доод}} = \\ &= 460 + 146,7 + 116,8 + 80 + 40 = 843,4 \text{ Вт.} \end{aligned} \quad (5.101)$$

ККД генератора:

$$\eta = \frac{S_N \cdot \cos \varphi}{S_N \cdot \cos \varphi + \Sigma P} = \frac{5000}{5000 + 843,5} = 0,856. \quad (5.102)$$

Основні типи постійних магнітів, які можуть бути застосовані в синхронному генераторі вітряка – NdFeB, SmCo, AlNiCo, ЮНДК.

Магніти неодим-залізо-бор найпотужніші з існуючих сьогодні постійних магнітів (рис. 5.5).



Рис. 5.5 – Постійні магніти з неодим-залізо-бору (Nd-Fe-B)

Основні переваги цих магнітів:

1. Чудова здатність до опору розмагнічування (термін експлуатації більше 50 років.)
2. Широкий діапазон робочих температур.
3. Хороша ціна для магнітів з високими магнітними властивостями.
4. Можливість провести магніти NdFeB практично будь-яких розмірів і форм. Залишкова індукція (B_r) – від 1,14 Тл (N33 матеріал) до 1,48 Тл (N52 матеріал). Діапазон робочих температур від - 60 до + 240 ° С. Антикоровізне покриття – нікель, цинк, епоксидне.

6. Питання для контролю знань під час практичних занять

1. Енергія та потужність водного потоку. Гідроенергетичні ресурси.
2. Основні способи створення напору. Створення напору за допомогою греблі.
3. Основні способи створення напору. Дериваційний спосіб створення напору.
4. Поясніть принцип роботи приливних електростанцій5. Поясніть принцип роботи гідроакumuлюючих електростанцій.
6. Принцип роботи гідроелектростанції. Визначення потужності гідроелектростанції.
7. Класифікація гідровузлів. Основні типи гідровузлів.
8. Основні групи обладнання ГЕС. Електротехнічне обладнання.
9. Принцип роботи гідрогенератора та його основні параметри.
10. Гідроагрегати ГАЕС. Основні типи гідроагрегатів ГАЕС.
11. Електричне обладнання ГЕС. Блочна та групова електричні схеми ГЕС.
12. Допоміжне обладнання ГЕС.
13. Водосховища та характеристики б'єфів ГЕС.
14. Гідравлічні турбіни ГЕС. Потужність гідротурбіни.
15. Гідравлічні турбіни ГЕС. Активні гідротурбіни.
16. Гідравлічні турбіни ГЕС. Реактивні гідротурбіни.
17. Гідравлічні турбіни ГЕС. Турбіни Френсіса.
18. Робота ГЕС в енергосистемі.
19. ГЕС без регулювання. ГЕС з добовим регулюванням.
20. ГЕС з річним (сезонним) регулюванням. ГЕС з багаторічним регулюванням.
21. Стан і перспективи розвитку вітроенергетики. Вітроенергетичні ресурси.
22. Вітроенергетичні установки з горизонтальною віссю обертання.
23. Вітроенергетичні установки з вертикальною віссю обертання.
24. Основі характеристики вітру. Залежність потужності вітру від його швидкості та висоти над рівнем моря.
25. Використання енергії вітру в енергосистемах. Схеми генерування електроенергії при ізольованій роботі вітроенергетичної установки.

26. Використання енергії вітру в енергосистемах. Схеми генерування електроенергії при роботі вітроенергетичної установки в енергосистемі.
27. Генерування вітроенергетичною установкою змінної напруги постійної частоти.
28. Роль вітроенергетичних установок в енергосистемах.
29. Економічна оцінка використання енергії вітру. Гарантована потужність.
30. Гідроакумулювання енергії вітроенергетичних установок.
31. Вимоги до вітроенергетичної установки при підключенні до енергосистеми.
32. Вітроенергетичні установки постійного струму.
33. Вітроенергетичні установки змінного струму.
34. Синхронізація ВЕС з енергосистемою.
35. Вибір розрахункової потужності вітроагрегату.
36. Динамічні процеси при роботі ВЕС в електричній системі.
37. Ізольовані вітроенергетичні установки.
38. Засоби вимірювання швидкості вітру.
39. Область використання вітроенергетичних установок.
40. Базисна та пульсуюча потужність ВЕС.

Рекомендована література

1. Васильев Ю. С. Основное энергетическое оборудование гидроэлектростанций / Ю. С. Васильев, И. С. Саморуков, С. Н. Хлебников. – СПб. : СПбГТУ, 2002. – 134 с.
2. Золотухін В. І. Водноенергетичні розрахунки при проектуванні ГЕС / В. І. Золотухін, В. В. Лутаєв. – Рівне : НУВГП, 2005. – 204 с.
3. Ильиных И. И. Гидроэлектростанции / И. И. Ильиных. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 248 с.
4. Кривцов В. С. Неисчерпаемая энергия. – в 2 кн. – Кн. 2. Ветроэнергетика / В. С. Кривцов, А. М. Олейников, А. И. Яковлев. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т»; Севастополь : Севаст. нац. техн. ун-т, 2004. – 519 с.
5. Непорожний П. С. Введение в специальность. Гидроэнергетика / П. С. Непорожний, В. И. Обрезков. – М. : Энергоиздат, 1982. – 304 с.
6. Рензо Д. Ветроэнергетика / Д. Рензо; [пер. с англ. Я.И. Шефтер]. – М. : Энергоатомиздат, 1982. – 272 с.
7. Янсон Р. А. Ветроустановки / Р. А. Янсон. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. – 36 с.
8. Брызгалов В. И. Гидроэлектростанции / В. И. Брызгалов, Л. А. Гордон. – Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2002. – 541 с.
9. Ясинский В. А. Современное состояние и перспективы развития малой гидроэнергетики в странах СНГ / В. А. Ясинский, А. П. Мироненков, Т. Т. Сарсембеков. – Алматы, 2011. – 36 с.

Для нотаток

Навчальне видання

ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ТА ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНІ УСТАНОВКИ

Методичні рекомендації

Укладач: **Кириченко** Олександр Сергійович

Формат 60×84 1/16. Ум. друк. арк. 3.

Тираж ___ прим. Зам. № ___

Надруковано у видавничому відділі
Миколаївського національного аграрного університету
54029, м. Миколаїв, вул. Паризької комуни, 9

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4490 від 20.02.2013 р.