

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



МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

ДО ВИКОНАННЯ
розрахунково-графічної роботи
з навчальної дисципліни

«СПЕЦІАЛЬНІ ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ»

*(для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
всіх форм навчання зі спеціальності
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка,
освітня програма
«Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії»)*

Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2022

Методичні рекомендації до виконання розрахунково-графічної роботи з навчальної дисципліни «Спеціальні електричні машини» (для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти всіх форм навчання спеціальності 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, Я. Б. Форкун; Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2022. – 31 с.

Укладачі: канд. техн. наук, доц. М. Л. Глебова,
канд. техн. наук, доц. О. Б. Єгоров,
канд. техн. наук, доц. Я. Б. Форкун

Рецензент

О. В. Сенецький, доктор технічних наук, доцент кафедри альтернативної електроенергетики та електротехніки Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

Рекомендовано кафедрою альтернативної електроенергетики та електротехніки, протокол № 3 від 18 жовтня 2022 р.

ЗМІСТ

Вступ.....	4
Загальні рекомендації.....	6
1 Вихідні дані до розрахунково-графічної роботи.....	8
2 Визначення основних розмірів синхронного генератора.....	9
3 Розрахунок обмотки та магнітопровода статора	11
4 Визначення розмірів ротора.....	19
5 Розрахунок провідностей розсіювання індуктора.....	20
6 Розрахунок магнітного кола та побудова робочої діаграми магнітів.....	21
7 Визначення маси активних матеріалів, втрат та ККД генератора.....	25
Список рекомендованих джерел.....	30

ВСТУП

Нині у різних галузях техніки широке застосування отримали генератори зі збудженням від постійних магнітів. Цьому значною мірою сприяв досягнутий за останні роки прогрес у галузі промислового освоєння виробництва висококоерцетивних сплавів та з'єднань для постійних магнітів, що дозволило створити електричні машини з покращеними енергетичними та масогабаритними показниками.

Основні переваги електричних машин зі збудженням від постійних магнітів:

а) простота конструкції, що пояснюється відсутністю обмотки збудження, а в машинах з роторним збудженням відсутністю ковзного контакту;

б) менші габаритні розміри та маса. Ця перевага збільшується зі зменшенням потужності машини. Дійсно, енергія, що створюється постійним магнітом, пропорційна обсягу магніту;

в) менші втрати, а, отже, більш високий ККД за рахунок зменшення втрат на збудження та втрат на тертя в ковзному контакті (для машин з роторним збудженням);

г) підвищена надійність, внаслідок відсутності ковзного контакту та обмотки збудження;

д) сталість магнітного потоку – незалежність його від коливань температури, напруги мережі, частоти обертання;

е) відсутність необхідності в джерелі постійного струму;

ж) мале нагрівання та краще умови охолодження.

До недоліків постійних магнітів слід віднести:

а) складність обробки більшості магнітів;

б) дефіцитність ряду матеріалів, що йдуть на виготовлення постійних магнітів (кобальт, вольфрам, титан і ін.);

в) складність регулювання магнітного потоку;

г) висока вартість деяких магнітотвердих матеріалів для постійних магнітів.

Метою розрахунково-графічної роботи є поглиблене вивчення матеріалу за розділом «Синхронні генератори з постійними магнітами», знайомство з елементами сучасної інженерної методики розрахунку синхронного генератора з постійними магнітами, підготовка здобувачів до самостійного вирішення завдань при проектуванні, виготовленні та експлуатації синхронного генератора з постійними магнітами.

У процесі виконання і захисту розрахунково-графічної роботи здобувачі повинні показати:

– знання конструктивних елементів синхронних генераторів з постійними магнітами, електротехнічних матеріалів для їхнього виготовлення, методики їх теоретичного дослідження, основних електромагнітних і конструктивних параметрів, навантажувальних характеристик, послідовності розрахунку синхронного генератора з постійними магнітами;

– уміння правильно і обґрунтовано вибрати навантаження, робити розрахунки магнітопроводу, обмоток, ізоляції, визначати основні розміри в подовжньому і поперечному перерізі й одержувати уточнені характеристики розрахунковим шляхом;

– навички застосування навчальної літератури, що рекомендують, і конспектів лекцій для обґрунтування окремих розрахунків і самостійно прийнятих рішень.

Розрахунково-графічну роботу здобувач виконує за індивідуальним завданням, що видає викладач. Терміни виконання окремих розділів і всієї роботи в цілому зазначені в навчальному графіку. Робота, виконана відповідно до дійсних методичних указівок, оформляється у виді розрахунково-пояснювальної записки на стандартних аркушах білого паперу для письма формату А4 обсягом до 30 сторінок рукописного тексту. Як у чорновому, так і в чистовому варіанті формули за кожним пунктом повинні бути надані як у буквенному вираженні (загальному виді), так і в цифровому, де буквені значення параметрів замінені їх числовими значеннями.

Компонують розрахунково-пояснювальну записку в такому порядку: перший аркуш – титульний, другий аркуш – завдання на виконання розрахунково-графічної роботи, яке повинне бути підписане керівником. Третій аркуш пояснювальної записки – «Зміст», у якому наводиться перелік основних розділів. Далі йде «Вступ», а після нього – змістовна частина. Наприкінці наводяться висновок і список літератури.

ЗАГАЛЬНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

Об'єктом розрахунково-графічної роботи «Розрахунок синхронного генератора з постійними магнітами» є генератор, який приводиться у обертання від регульованого приводу з постійною частотою обертання n (об/хв) і має такі вихідні дані: активна номінальна потужність P (Вт); номінальна напруга 220 В; напруга на виході U (В); частота змінної напруги генератора f_1 (Гц) з можливістю переходу на f_2 (Гц); кількість фаз $m = 1$ (з резервом переходу на $m = 3$); охолодження генератора здійснюється шляхом самовентиляції.

При проектуванні виникає низка питань, що потребують вирішення на початковій стадії розробки.

Розглянемо спосіб переходу з частоти f_1 (Гц) на більшу частоту f_2 (Гц). Здійснити такий перехід в одному генераторі суто електромагнітним шляхом є нераціональним через низьку частоту обертання. Тому пропонується перехід на частоту f_2 проводити за допомогою електронного перетворювача зі ланкою постійного струму. Як перетворювач, може бути застосований напівмостовий інвертор або інвертор типу «Мак-Морі». На думку розробників, переважно використовувати інвертор «Мак-Морі», що має стійку комутацію при інвертуванні і дозволяє регулювання напруги на виході. Як ланку постійного струму, можна використовувати трифазну схему випрямлення, відому під назвою «схема Ларіонова». Критичним моментом для можливості застосування інвертора «Мак-Морі» є форма напруги на виході інвертора, яка буде практично прямокутною. Приведення напруги перетворювача до форми, близької до синусоїдальної, суттєво ускладнить пристрій та зменшить його надійність.

У разі допустимості прямокутної форми вихідної напруги на обох частотах (f_1 і f_2) можливий варіант із застосуванням перетворювача на частоті 50 Гц, що дає можливість застосування основного генератора у трифазному виконанні.

Трифазне виконання генератора представляється більш вигідним через зменшення розрахункової потужності, габаритів і втрат від зворотного обертового поля.

Друге питання виникає про вибір матеріалу постійного магніту. Найбільш перспективним є застосування сучасних матеріалів на основі самарію і кобальту, а також неодиму, заліза і бору. Теоретично можливо застосування і більш дешевих магнітів на основі феритів, але при цьому істотно зростає розмір генератора через необхідність застосування концентраторів магнітного потоку через маленьку залишкову індукцію феритів. Зважаючи на сказане основний

варіант генератора приймається однофазним на базі трифазного, що в перспективі забезпечує можливість переходу на трифазну систему.

Після виготовлення дослідного зразка необхідно провести спеціальні випробування в різних умовах та режимах для визначення надійності системи збудження від постійних магнітів на основі неодим – залізо– бору.

Незважаючи на прийняту з розрахунку обмотку статора з дробовим числом пазів на полюс і фазу, у разі недостатності цього заходу доведеться зробити скіс пазів на статорі на один зубцевий поділ статора і, можливо, збільшити повітряний зазор.

1 ВИХІДНІ ДАНІ ДО РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ

Таблиця 1.1 – Завдання для виконання розрахунково-графічної роботи

Варіант	Активна потужність, Вт	Напруга на виході СГ, В	Частота змінної напруги, Гц	Частота обертання вітроколеса, об/хв
1	5 500	127	50	1 000
2	1 700	150	60	1 200
3	2 000	180	70	1 400
4	2 300	220	40	800
5	2 700	280	50	750
6	2 800	330	60	900
7	6 000	380	70	1 050
8	3 200	127	40	500
9	3 300	150	50	600
10	3 400	180	60	720
11	3 700	220	70	840
12	4 000	280	40	480
13	4 200	330	50	500
14	4 500	380	60	600
15	4 800	127	70	700
16	5 000	150	40	400
17	6 500	180	50	1 000
18	5 700	220	60	1 200
19	2 000	280	70	1 400
20	2 300	330	40	800
21	2 700	380	50	600
22	2 800	127	60	720
23	3 000	150	70	840
24	3 200	180	40	480
25	3 300	220	50	500
26	3 400	280	60	600
27	3 700	330	70	700
28	6 000	380	40	800
29	4 200	180	50	750
30	4 500	220	60	900

Примітка: $\cos \varphi = 0,8$; число фаз обмотки генератора $m = 1$.

2 ВИЗНАЧЕННЯ ГОЛОВНИХ РОЗМІРІВ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Головними розмірами синхронної машини є внутрішній діаметр статора D і його розрахункова довжина l_δ .

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

$$C_a = \frac{D^2 l_\delta n}{P'} = \frac{6,1}{\alpha_i k_\phi k_{обм} B_{\delta max} A},$$

де P' – розрахункова потужність (Вт);

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

K_ϕ – коефіцієнт форми поля, приймають $K_\phi = 1,11$;

$B_{\delta max}$ – максимальна індукція в повітряному зазорі.

Значення магнітної індукції у повітряному зазорі обмежується, головним чином, насиченням магнітного ланцюга. Приймаємо, $B_{\delta max} = 0,8$ Тл;

A – лінійне навантаження статора.

Значення лінійного навантаження A задаємо виходячи з режимів роботи, умов охолодження та номінальної потужності синхронного генератора.

Для тривалого режиму роботи при охолодженні продувом вибираємо $A = 220 \cdot 10^2$ А/м;

α_i – розрахунковий коефіцієнт полюсного перекриття.

$$\alpha_i = \frac{b_p}{\tau} \cdot K_\alpha = \alpha \cdot K_\alpha,$$

де b_p – довжина полюсної дуги, м;

τ – полюсний розподіл, м;

K_α – 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 $2p > 4$.

2.1. Для синхронних генераторів:

$$P' = \frac{k_e P_H}{\cos \varphi}, \quad (2.1)$$

де $\cos \varphi$ – коефіцієнт потужності;

K_e – коефіцієнт, що характеризує внутрішню ЕРС якірної обмотки (відношення ЕРС в якорі при номінальній напрузі до номінальної напруги).

Згідно з даними розрахункової практики для синхронних генераторів з постійними магнітами величину коефіцієнта K_e вибираємо в межах 1,2...1,4.

2.2. Головні розміри розраховуємо, виходячи з потужності при трифазному живленні. Співвідношення потужностей при однофазному та трьохфазному живленні наступні, Вт:

$$P_{3\Phi} = \frac{P_{1\Phi}}{0,7}. \quad (2.2)$$

Зазвичай при відстаючому струмі для генераторів приймають $\cos\varphi = 0,8$.

$$P_w = P'. \quad (2.3)$$

2.3. Значення розрахункового коефіцієнта полюсного перекриття залежить від кількості пар полюсів p , яке визначається із співвідношення:

$$p = \frac{60f}{n}. \quad (2.4)$$

2.4. Формула для визначення діаметра розточки статора:

$$D = \sqrt[3]{\frac{6,1 \cdot 2pP'}{\lambda\pi\alpha_\delta k_\Phi k_{обм} AB_{\delta max} n}}. \quad (2.5)$$

2.5. Між головними розмірами синхронного генератора існує співвідношення:

$$\lambda = l_\delta / \tau. \quad (2.6)$$

Полюсне ділення, м:

$$\tau = \frac{\pi D}{2p}. \quad (2.7)$$

Тоді маємо

$$\lambda = \frac{2l_\delta p}{\pi D}. \quad (2.8)$$

2.6. Розрахункова довжина статора, м:

$$l_\delta = \frac{\lambda \pi D}{2p}. \quad (2.9)$$

Визначаємо величину полюсного ділення, м:

$$\tau = C_s \sqrt[4]{\frac{P_w \beta}{2pf\sqrt{2}\lambda_1}}. \quad (2.10)$$

2.7. Для контролю вибору основних розмірів скористаємося методом на основі універсальної машинної постійної І. М. Постнікова:

$$C_S = (K_W K_\varphi \rho B_Z)^{-\frac{1}{4}}, \quad (2.11)$$

де C_S – універсальна машинна постійна ім. І. М. Постнікова для статора;

K_W – обмотковий коефіцієнт;

K_φ – повний коефіцієнт заповнення;

ρ – густина струму в обмотці статора;

B_Z – середня магнітна індукція в зубцях статора.

Приймаємо обмотувальний коефіцієнт $K_W = 0,92$, повний коефіцієнт заповнення приймаємо $K_\varphi = 0,1$.

Середню щільність струму, що рекомендується для малих синхронних генераторів, приймаємо 6 А/мм^2 ($6 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$).

Середню магнітну індукцію в зубцях статора приймаємо на підставі досвіду проектування малошумних синхронних генераторів $B_Z = 1,4 \text{ Тл}$.

2.8. Діаметр розточки статора, м:

$$D_i = \frac{2p\tau}{\pi} \quad (2.12)$$

Діаметр розточки статора повинен узгоджуватися з діаметром, отриманим на основі методу машинної постійної Арнольда.

3 РОЗРАХУНОК ОБМОТКИ ТА МАГНІТОПРОВОДА СТАТОРА

У статорі застосовуємо двошарову петлеву обмотку. Використання таких обмоток дозволяє зменшити витрати міді та ізоляційних матеріалів, а також покращити форму кривої ЕРС.

3.1. Розрахункова величина магнітного потоку полюсу в режимі холостого ходу:

$$\Phi_{\delta 0} = B_{\delta 0} l \tau \alpha_i \text{ (Вб)}. \quad (3.1)$$

3.2. ЕРС холостого ходу, розрахована при природній стабілізації напруження та підмагнічування спинці якоря:

$$\begin{aligned} E_0 &= k_e U_\phi \text{ (В)}. \\ U_\phi &= \frac{U}{\sqrt{3}} \text{ (В)}. \end{aligned} \quad (3.2)$$

3.3. Попередня кількість витків в фазі обмотки якоря:

$$w_{\phi} = \frac{E_0}{4k_{\phi}k_0f\Phi_{\delta 0}}. \quad (3.3)$$

Значення округляємо до найближчого цілого числа.

3.4. Номінальний струм фази, А:

$$I_{н\phi} = \frac{P_n}{mU_{\phi}\cos\varphi}. \quad (3.4)$$

3.5. Кількість пазів статора:

$$Z = 2prtq, \quad (3.5)$$

де q – число пазів на полюс і фазу (приймаємо $q=2$).

При числі полюсів $2p > 8$ та малому полюсному поділі q вибираємо дробовим (приймаємо $q = 1 \frac{1}{4}$). При дробовому зменшується негативний вплив вищих гармонік ЕРС.

3.6. Кількість ефективних провідників у пазу:

$$N_n = \frac{w_{\phi}a}{qp}. \quad (3.6)$$

Уточнюємо кількість витків в фазі:

$$w_{\phi} = \frac{N_n qp}{a},$$

де a – число паралельних віток обмотки фази.

Для високовольтних синхронних машин (3...6 кВ) потужністю менше 5 000 кВА звичайно прагнуть брати $a = 1$. При виборі числа паралельних віток струм у паралельній вітці має бути в межах 50...150 А. Якщо це неможливо виконати при $a = 1$, то розглядають варіанти $a = 2; 3$ чи 4 .

3.7. Перевірка умов симетрії обмотки при дробовому q_1 .

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

$$\frac{z_1}{t} = \frac{2p \cdot m \cdot q_1}{t} = \frac{2p \cdot m}{d} \text{ дорівнює цілому числу;} \quad (3.7)$$

$$\frac{2p}{a \cdot d} \text{ дорівнює цілому числу,}$$

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 віток.

3.8. Зубцеве ділення:

$$t = \frac{\pi D}{Z}. \quad (3.8)$$

3.9. Уточнюємо лінійне навантаження, А/м:

$$A = \frac{ZN_n I_{нф}}{\pi D a}. \quad (3.9)$$

3.10. Уточнюємо величину магнітного потоку в режимі холостого ходу, Вб:

$$\Phi_{\delta 0} = \frac{E_0}{4k_b k_0 f w_{\phi}}. \quad (3.10)$$

3.11. Мінімальна ширина зубця, м:

$$b_{Z \min} = \frac{B_{\delta 0} t Z}{B_{Z \max} k_c}, \quad (3.11)$$

де $B_{\delta 0}$ – величина магнітної індукції у повітряному зазорі в режимі холостого ходу, Тл;

$$B_{\delta 0} = \frac{\Phi_{\delta 0}}{l \tau a_i} B_{\delta 0},$$

$B_{Z \max}$ – допустиме значення індукції в зубці вибираємо в межах 1,6...1,9 Тл (для сталі 1411);

k_c – коефіцієнт заповнення магнітопроводу сталлю, $k_c = 0,95$ при товщині листа $\Delta_{л} = 3,5 \cdot 10^{-4}$ м.

Для зменшення опору повітряного зазору та зниження зубцевих пульсацій пази статора виконують напіввідкритими. При виготовленні обмотки якоря з проводу прямокутного перерізу пази виявляються прямокутними, а зубці – трапецієподібними.

3.12. Попереднє значення ширини паза, м:

$$b_n = \frac{\pi(D+2h_k)}{Z} - b_{Z \min}, \quad (3.12)$$

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

3.13. Переріз ефективного провідника обмотки статора мм²:

$$q_{\text{еф}} = \frac{I_{\text{н}}}{a j_1}, \quad (3.13)$$

де j_1 – допустима щільність струму.

Щільність струму в провідниках обмотки якоря при тривалому режимі роботи залежить від умов охолодження. При самовентиляції $j_1 = (5 \dots 12) \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$

3.14. Розрахункова ширина ізолюваного провода, м:

$$a_{\text{із}} = \frac{b_n - 2\Delta n}{n_{\text{ш}}}, \quad (3.14)$$

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

Δn – товщина пазової ізоляції.

Як пазова ізоляція використовують склослюдинити та поліамідну плівку. У цьому випадку сумарна товщина ізоляції набік, $\Delta n = (0,18 \dots 0,22) \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

3.15. Розрахункова ширина неізолюваного провода, м:

$$a_{\text{неіз}} = a_{\text{із}} - \Delta_{\text{із}}, \quad (3.15)$$

де $\Delta_{\text{із}}$ – товщина ізоляції проводу на обидві сторони.

Для обмотки статора застосовують проводи ПНСДК та ПНСДКТ ($t_p = 250 \dots 400 \text{ }^\circ\text{C}$) з двосторонньою товщиною ізоляції $\Delta_{\text{із}} = (0,2 \dots 0,3) \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

3.16. Стандартні розміри неізолюваних проводів, що серійно випускаються, такі:

$$a = 1,32 \text{ мм}; b = 3,55 \text{ мм}; q_a = 4,471 \text{ мм}^2. \quad (3.16)$$

3.17. Уточнена ширина паза, мм:

$$b_n = n_{\text{ш}} (a + \Delta_{\text{із}}) + 2\Delta n \quad (3.17)$$

3.18. Висота пазу, мм:

$$h_n = n_b (b + \Delta_{\text{із}}) + 3\Delta n + h_{\text{кл}}, \quad (3.18)$$

де n_b – число провідників по висоті паза;

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

3.19. Ширина щелини напіввідкритого пазу, мм:

$$b_{\text{щ}} = a + \Delta_{\text{із}} + \Delta_{\text{щ}}, \quad (3.19)$$

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

3.20. Уточнена щільність струму, $\text{А} / \text{мм}^2$:

$$j_a = \frac{I_{H\phi}}{q_a} = \frac{I_{H\phi}}{4,471}. \quad (3.20)$$

3.21. Уточнена мінімальна ширина зубця, м:

$$b_{z \min} = \frac{\pi(D+2h_k)}{z} - b_n. \quad (3.21)$$

3.22. Уточнена індукція у вузькому перерізу зубця, Тл:

$$B_{z \max} = \frac{B_{\delta_0} t_z}{b_{z \min} \cdot k_c}. \quad (3.22)$$

3.23. Висота спинки статора, м:

$$h_a = \frac{\Phi_{\delta_0}}{2lk_c B_d}, \quad (3.23)$$

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

3.24. Зовнішній діаметр статора, м:

$$D_d = D + 2h_n + 2h_a. \quad (3.24)$$

Отримане значення округляємо до найближчого нормалізованого діаметра D_{dcm} .

3.25. Уточнюємо висоту спинки статора, м:

$$h_a = \frac{D_{dcm} - D - 2h_n}{2}. \quad (3.25)$$

3.26. Уточнюємо індукцію в спинці якоря, Тл:

$$B_d = \frac{\Phi_{\delta_0}}{2lk_c h_a}. \quad (3.26)$$

3.27. Шаг обмотки статора:

Двошарові обмотки статора, як правило, виконують з укороченим кроком: $y_1 = (0,8 \dots 0,86) \tau_n$, де $\tau_n = 3q_1$:

$$\beta = \frac{y_1}{\tau_n}. \quad (3.27)$$

3.28. Коефіцієнт скорочення:

$$k_y = \sin \frac{\pi\beta}{2}. \quad (3.28)$$

3.29. Коефіцієнт розподілу обмотки :
при дробовому q_1 :

$$k_p = \frac{0,5}{(bd+c) \sin\left(\frac{30^\circ}{bd+c}\right)}, \quad (3.29)$$

для цілого значення q_1 :

$$K_p = \frac{\sin \frac{q_1 \cdot \alpha}{2}}{q_1 \cdot \sin \frac{\alpha}{2}},$$

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

3.30. Обмотковий коефіцієнт:

$$k_a = k_y \cdot k_p. \quad (3.30)$$

При розрахунках значення синуса треба обчислювати в радіанах.

3.31. Коефіцієнт повітряного зазора:

$$k_\delta = \frac{t_Z + \frac{(5t_Z\delta)}{b_{\text{ш}}}}{t_Z + \left(\frac{(5t_Z\delta)}{b_{\text{ш}}}\right) - b_{\text{ш}}}, \quad (3.31)$$

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

3.32. Активний опір фази обмотки якоря, Ом:

$$R_d = \rho_0 \frac{l_{\text{cp}} \omega_\phi}{q_d a} k_t, \quad (3.32)$$

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

l_{cp} – середня довжина витка;

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

Середня довжина витка, м :

$$l_{\text{cp}} = 2(l + l_l).$$

Довжина лобової частини витка ,м:

$$l_l = 1,4\tau.$$

3.33. Індуктивний опір розсіювання фази обмотки якоря , Ом:

$$x_\sigma = 4\pi\mu_0 f \frac{\omega_\phi^2}{pq} [(\lambda_n + \lambda_d)l + \lambda_l l_l]. \quad (3.33)$$

де $\lambda_n, \lambda_d, \lambda_l$ – питомі провідності пазового, диференціального та лобового розсіювання відповідно.

Питома провідність пазового розсіювання для прямокутного паза:

$$\lambda_n = \frac{k_{y1}(h_n - h_k)}{3b_n} + \frac{k_{y2}h_k}{b_{щ}}. \quad (3.34)$$

Коефіцієнти, що враховують скорочення обмотки:

$$k_{y1} = \frac{1 + 3\beta}{4},$$

$$k_{y2} = \frac{1 + 3k_{y1}}{4}.$$

Питома провідність диференційного розсіювання:

$$\lambda_d = \frac{\delta_p \alpha_i}{b_{щ} + 0,8\delta_p} (0,25 + 0,75\beta), \quad (3.35)$$

де α_i – розрахунковий коефіцієнт полюсного перекриття:

$$\alpha_i = \alpha_p + \frac{4}{\frac{\tau}{\delta_p} + \frac{6}{1 - \alpha_p}}.$$

Довжини силової лінії у зазорі δ_p , мм:

$$\delta_p = k_\delta \delta.$$

Питома провідність лобового розсіювання:

$$\lambda_l = \frac{0,34q(l_l - 0,64\beta\tau)}{l}. \quad (3.36)$$

3.34. Індуктивний опір якоря по повздовжній X_{ad} та поперечній X_{aq} осям розраховується за наступними формулами, Ом:

$$x_{ad} = \frac{4\mu_0}{\pi p} m f(\omega_\phi k_0)^2 \Lambda_{ad}, \quad (3.37)$$

$$x_{aq} = \frac{4\mu_0}{\pi p} m f(\omega_\phi k_0)^2 \Lambda_{aq}, \quad (3.38)$$

де $\Lambda_{ad}, \Lambda_{aq}$ – коефіцієнти провідності машини по повздовжній і поперечній осях відповідно.

Коефіцієнт провідності машини по повздовжній осі:

$$\Lambda_{ad} = k_b k_{ad} \frac{\Lambda_{\delta d} \Lambda_{nd}}{\Lambda_{\delta d} + \Lambda_{nd}}, \quad (3.39)$$

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

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

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

Λ_{nd} – коефіцієнт магнітної провідності полюса в подовжньому напрямку.

Розраховуємо коефіцієнт реакції якоря по поздовжній осі:

$$k_{ad} = \frac{\alpha_p \pi + \sin(\alpha_p \pi)}{4 \sin\left(\frac{\alpha_p \pi}{2}\right)}. \quad (3.40)$$

Коефіцієнт магнітної провідності повітряного зазору по поздовжній осі:

$$\Lambda_{\delta d} = \frac{\tau l}{k_{\mu d} \delta_p}, \quad (3.41)$$

де $k_{\mu d}$ – коефіцієнт, що враховує насичення магнітного ланцюга машини по поздовжньої осі ($k_{\mu d} = 1,1 \dots 1,3$).

Коефіцієнт магнітної провідності полюса в поздовжньому напрямку:

$$\Lambda_{nd} = \frac{\mu_{b_{nM}} b_M l_M}{h_M}, \quad (3.42)$$

де $\mu_{b_{nM}}$ – магнітна проникність повернення матеріалу постійного магніту, для магніту з матеріалу $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$; $\mu_{b_{nM}} = 1,23$; b_M, l_M, h_M – відповідно ширина, довжина і висота магніту.

Провідність машини по поперечній осі:

$$\Lambda_{aq} = k_b k_{aq} \frac{\Lambda_{\delta q} \Lambda_{nq}}{\Lambda_{\delta q} + \Lambda_{nq}}, \quad (3.43)$$

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.

Визначаємо коефіцієнт реакції якоря по поперечній осі:

$$k_{aq} = \frac{\alpha_p \pi + \sin(\alpha_p \pi) + \frac{2}{3} \cos\left(\alpha_p \frac{\pi}{2}\right)}{4 \sin\left(\frac{\alpha_p \pi}{2}\right)}. \quad (3.44)$$

Коефіцієнт магнітної провідності повітряного зазору по поперечній осі:

$$\Lambda_{\delta q} = \frac{\tau l}{k_{\mu q} \delta_p}, \quad (3.45)$$

де $k_{\mu q}$ – коефіцієнт, що враховує насичення магнітного ланцюга машини по поперечній осі ($k_{\mu q} = 1,2...1,4$).

Розраховуємо коефіцієнт магнітної провідності полюса в поперечному напрямку:

$$\Lambda_{nq} = \frac{2\mu b_{nM} b_M l_M}{h_M} . \quad (3.46)$$

3.35. Визначаємо відповідні повні індуктивні опори обмотки якоря по повздовжній та поперечній осях, Ом:

$$x_d = x_{ad} + x_{\sigma}; \quad (3.47)$$

$$x_q = x_{aq} + x_{\sigma}. \quad (3.48)$$

4 ВИЗНАЧЕННЯ РОЗМІРІВ РОТОРА

Відповідно до чинного стандарту постійні магніти на основі рідкісноземельних матеріалів випускаються призматичної форми. У зв'язку з цим практично і під час проектування широке застосування знайшли збірні конструкції роторів (індукторів) синхронних генераторів з порушенням від постійних магнітів. У проєктованому синхронному генераторі застосовано ротор із призматичними магнітами типу «зірочка». І тут застосовують магніти з радіальним намагнічуванням. Конструкція збірного ротора типу «зірочка» містить намагнічені в радіальному напрямку постійні магніти, які своїми внутрішніми торцями примикають до магнітом'якої втулки, закріпленої на валу генератора.

4.1. Розраховуємо зовнішній діаметр ротора, м:

$$D_p = D - 2\delta , \quad (4.1)$$

де δ – повітряний зазор між статором і ротором , δ приймаємо рівним 0,6 мм.

4.2. Визначаємо розрахунковий коефіцієнт полюсного перекриття:

$$\alpha_i = \alpha_p + \frac{4}{\frac{\tau}{\delta_p} + \frac{6}{1-\alpha_p}} , \quad (4.2)$$

де α_p – конструктивний коефіцієнт полюсного перекриття , $\alpha_p = 0,7$.

4.3. Розраховуємо ширину полюса, м:

$$b_M = \alpha_p \tau . \quad (4.3)$$

4.4. Приймаємо висоту полюса $h_M = 0,038$ м.

4.5. Визначаємо довжину полюса, що дорівнює довжині статора, м:

$$l_M = l. \quad (4.4)$$

5 РОЗРАХУНОК ПРОВІДНОСТЕЙ РОЗСПОВАННЯ ІНДУКТОРА

Додаткові геометричні розміри індуктора, що використовуються в розрахунках, показані на рисунку 5.1.

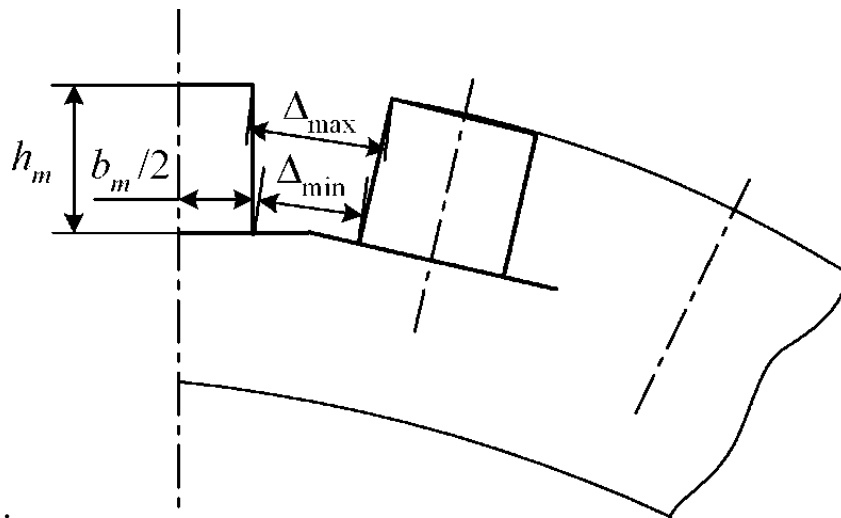


Рисунок 5.1 – До визначення провідностей розсіювання індуктора типу «збірна зірочка»

5.1. Провідність розсіювання магніта розраховується за формулою:

$$\Lambda_{SM} = K_\lambda \Lambda_{em}, \quad (5.1)$$

де K_λ – коефіцієнт послаблення потоку розсіювання;

Λ_{em} – провідність розсіювання.

5.2. Провідність розсіювання:

$$\Lambda_{em} = \left(5l_m \frac{h_m}{\Delta_{max}} \varphi_\alpha + 1,6h_v \varphi_\beta \right) 10^{-6}, \quad (5.2)$$

$$\varphi_\alpha = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_{max} - \Delta_{min}} \left[1 - \frac{\Delta_{min}}{\Delta_{max} - \Delta_{min}} \ln \left(\frac{\Delta_{max}}{\Delta_{min}} \right) \right], \quad (5.3)$$

$$\varphi_\beta = \frac{\pi b_m}{2\Delta_{max}} + \ln \left(1 + \frac{\pi b_m}{2\Delta_{max}} \right) - \left(\frac{\pi b_m}{2\Delta_{max}} \right)^2 \ln \left(1 + \frac{2\Delta_{max}}{\pi b_m} \right). \quad (5.4)$$

де Δ_{max} та Δ_{min} – приймаємо відповідно рівними 21 мм та 9 мм, (рис. 5.1).

Значення коефіцієнта K_λ залежить від конфігурації міжполюсного простору коефіцієнта магнітної проникності магніту та визначається за графіками в залежності від відношення $\Delta_{min} / \Delta_{max}$ та величини ξ :

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

$$\xi = \sqrt{\frac{h_m \Delta_{em}}{\rho_b l_m b_m}} \quad (5.5)$$

$$S_b \cong \frac{B_R}{H_C} = \frac{1,23}{880 \cdot 10^3} = 1,4 \cdot 10^{-3}$$

$$k_\lambda = 0,15$$

6 РОЗРАХУНОК МАГНІТНОГО КОЛА ТА ПОБУДОВА РОБОЧОЇ ДІАГРАМИ МАГНІТІВ

6.1. Розраховуємо МРС повітряного зазора , А:

$$F_{\delta_0} = 0,8 B_{\delta_0} \delta_p 10^6, \quad (6.1)$$

де B_{δ_0} – величина магнітної індукції у повітряному зазорі, Тл:

$$B_{\delta_0} = \frac{\Phi_{\delta_0}}{l \alpha_i}, \quad (6.2)$$

де Φ_{δ_0} – розрахункова величина магнітного потоку полюсу в режимі холостого ходу ,Вб:

$$\Phi_{\delta_0} = \frac{E_0}{4k_b k_0 f \omega_\phi} \quad (6.3)$$

6.2. Розрахункова індукція в зубцях, Тл:

$$B_{z_0} = \frac{B_{\delta_0} t_z}{b_z k_{zc}}, \quad (6.4)$$

де b_z – розрахункова ширина зубця, для трапецевидної його форми, мм:

$$b_z = \frac{\pi(D+2h_n) - b_n + 2b_{z \min}}{3}, \quad (6.5)$$

де $b_{z \min}$ – мінімальна ширина зубців, м:

$$b_{z \min} = \frac{\pi(D+2h_k)}{z} - b_n . \quad (6.6)$$

6.3. Напруженість поля в зубці H_Z визначається по кривій намагнічування сталі 1411 (рис 6.1) .

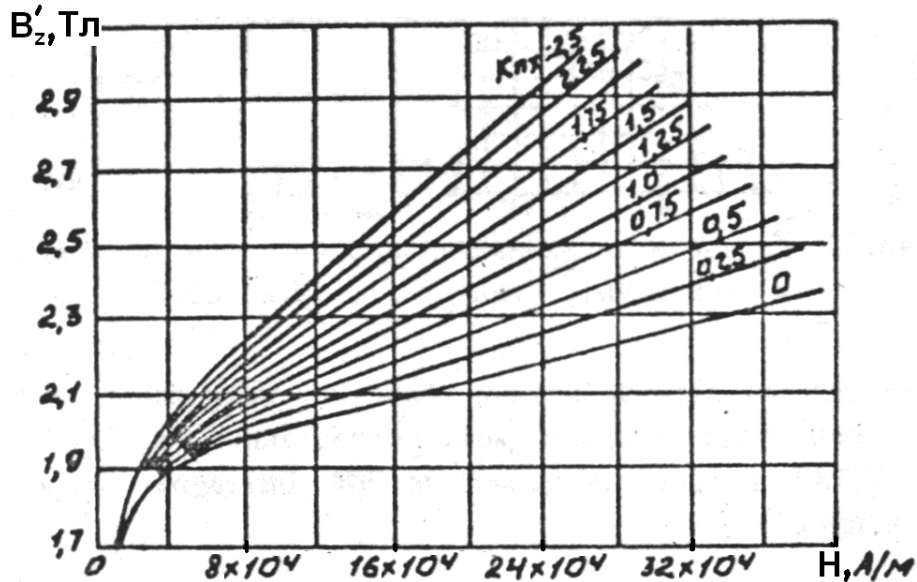


Рисунок 6.1 – Криві намагнічування сталі 1411

6.4. Розраховуємо МРС, необхідної для проведення потоку через зубцеву зону, А :

$$H_{z0} = h_n H_Z . \quad (6.7)$$

6.5. Знаходимо розрахункову індукцію в спинці якоря, Тл:

$$B_{d0} = \frac{\Phi_{\delta 0}}{2lh_d k_{зс}} . \quad (6.8)$$

6.6. Напруженність поля в спинці якоря H_a визначасмо по кривій намагнічування сталі 1411 (рис 6.1) .

6.7. МРС, витрачаємої на проведення потоку через спинку якоря, А:

$$F_{da} = L_a H_a , \quad (6.9)$$

де L_a – середня довжина силової лінії в спинці якоря, м:

$$L_a = \frac{\pi(D+2h_n+2h_a)}{2p} . \quad (6.10)$$

6.8. Розраховуємо сумарну МРС на пару полюсів, необхідну для проведення потоку через магнітне коло якоря, А:

$$F_{ha} = 2F_{\delta a} + 2F_{z a} + F_{da} . \quad (6.11)$$

6.9. Індукція в тілі ротора, Тл:

$$B_{dp} = \frac{\Phi_{\sigma 0} \sigma}{2S_{ap}}, \quad (6.12)$$

де S_{ap} – переріз спинки ротора;

σ – коефіцієнт розсіяння магніту.

Переріз спинки ротора, м²:

$$S_{ap} = h_{ap} l_{ap}, \quad (6.13)$$

де l_{ap} – довжина спинки ротора, $l_{ap} = l$;

h_{ap} – висота спинки ротора.

Висота спинки ротора, м :

$$h_{ap} = (D_p - 2h_m - d_b)/2, \quad (6.14)$$

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

Коефіцієнт розсіювання магніту:

$$\sigma = 1 + \frac{\Phi_{sm}}{\Phi_{\delta 0}}, \quad (6.15)$$

де Φ_{sm} – потік розсіювання магніту, Вб:

$$\Phi_{sm} = 0,5F_{ha}\Lambda_{sm}. \quad (6.16)$$

6.10. Напруженість магнітного поля в спинці ротора H_{ap} визначаємо по кривій намагнічування сталі 1411 (рис 6.1) .

6.11. МРС, що витрачається на проведення потоку через спинку ротора, А:

$$F_{ap} = H_{ap} L_{ap}, \quad (6.17)$$

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

Розраховуємо середню довжину силової лінії в спинці ротора, м:

$$L_{ap} = \frac{\pi(D_p - 2h_m - h_{ap})}{2p}. \quad (6.18)$$

6.12. Розраховуємо індукцію у стику магніта, Тл :

$$B_{ст.м} = \frac{\Phi_{\sigma a} \sigma}{b_m l_m}. \quad (6.19)$$

6.13. Падіння МРС в стиках магніта на один полюс, А:

$$F_{\text{ст.м}} = 1,6 \cdot B_{\text{ст.м}} \cdot \delta_{\text{ст.м}} \cdot 10^6, \quad (6.20)$$

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

6.14. Знаходимо МРС магніта на пару полюсів, А :

$$F_{\text{ма}} = F_{10} + 2F_{\text{ст.м}} + F_{\text{ар}}. \quad (6.21)$$

6.15. З даних, отриманих під час розрахунку магнітної ланцюга машини, будемо робочу діаграму магніту $\Phi = f(F_c)$ (рис. 6.2).

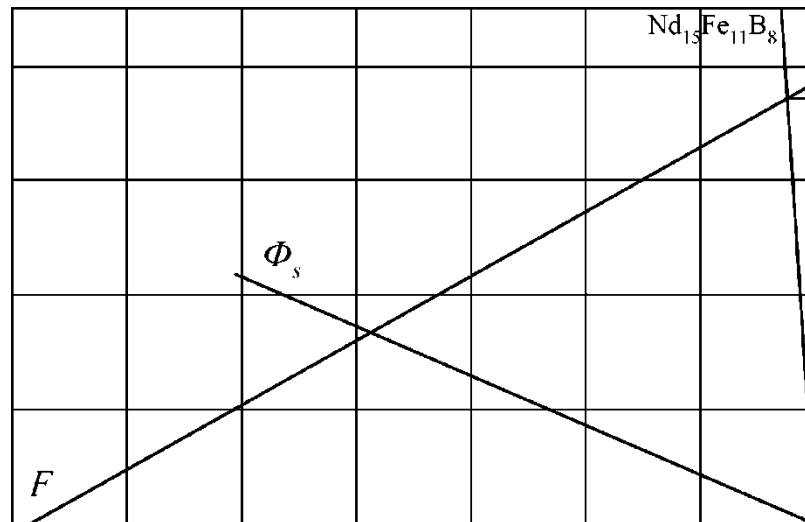


Рисунок 6.2 – Робоча діаграма магніту $\Phi = f(F_c)$

У разі застосування магнітів з рідкісноземельних матеріалів і кобальту крива розмагнічування збігається з прямою повернення. Її отримують за двома точками: залишковому потоку Φ_r (Вб) та коерцитивній МДС F_c (А).

Для конструкції індуктора типу «збірна зірочка»:

$$\Phi_r = B_r S_M = B_r b_M l_M, \quad (6.22)$$

де B_r – залишкова індукція в матеріалі магніту.

Для сплаву $Nd_{15}Fe_{11}B_8$ $B_r = 1,23$ Тл.

Коерцитивна МРС, А:

$$F_c = 2h_M H_c, \quad (6.23)$$

де H_c – коерцитивна сила, для сплаву $Nd_{15}Fe_{11}B_8$ $H_c = 880$ кА/м.

Крива розмагнічування $\Phi_r = f(F_c)$ повторює у певних масштабах криву розмагнічування матеріалу магніту $B_r = f(H_c)$.

Далі на діаграмі будуємо пряму сумарного розсіювання $\Phi_{SM} = 0,5F_{10}\Lambda_{sm}$. Віднімаючи графічно цю характеристику з прямої розмагнічування, отримуємо лінію $\Phi_r = f(M)$ поздовжнього (корисного) потоку Φ_d .

Магнітна характеристика при холостому ході $\Phi_{ma} = f(F_{ma})$ визначається характеристикою зовнішнього магнітного ланцюга та за відсутності насичення в сталевих ділянках магнітопроводу має вигляд прямої лінії.

Потік магніту, Вб:

$$\Phi_{ma} = \Phi_{\delta a} + \Phi_{SM}, \quad (6.24)$$

де Φ_{SM} – потік розсіювання магніту:

$$\Phi_{SM} = 0,5F_{10}\Lambda_{sm}. \quad (6.25)$$

7 ВИЗНАЧЕННЯ МАСИ АКТИВНИХ МАТЕРІАЛІВ, ВТРАТ ТА ККД ГЕНРАТОРА

7.1. Розраховуємо масу міді обмотки якоря, кг:

$$M_{0a} = m\omega_{\phi}l_{cp}q_a\gamma_M. \quad (7.1)$$

7.2. Визначаємо масу зубців якоря, кг:

$$M_z = \left\{ \frac{\pi}{4} [(D + 2h_n)^2 - D^2] - Zb_n h_n \right\} lk_{zc}\gamma_{ст}. \quad (7.2)$$

7.3. Знаходимо масу спинки якоря, кг:

$$M_{a_1} = \pi(D + 2h_n + h_a)h_a lk_{zc}\gamma_{ст}. \quad (7.3)$$

7.4. Розраховуємо масу активних матеріалів статора, кг:

$$M_1 = M_{0a} + M_z + M_{a_1}. \quad (7.4)$$

7.5. Визначаємо масу постійних магнітів, кг:

$$M_{nM} = 2\rho b_M h_M l_M \gamma_{nM}. \quad (7.5)$$

7.6. Знаходимо масу ярма індуктора, кг:

$$M_{a_2} = \frac{\pi}{4} [(D_{a_2} + 2h_{ap})^2 - D_{a_2}^2] lk_{am}\gamma_{ст}. \quad (7.6)$$

7.7. Розраховуємо масу активних матеріалів ротора, кг:

$$M_2 = M_{nM} + M_{a_2}. \quad (7.7)$$

7.8. Знаходимо масу активних матеріалів генератора, кг:

$$M_{ам} = M_1 + M_2. \quad (7.8)$$

7.9. Розраховуємо повну масу генератора, кг:

$$M_{\Gamma} = K_{\text{коп}} \cdot M_{\text{ам}}, \quad (7.9)$$

де $K_{\text{коп}} = 1,5 \dots 1,7$.

7.10. Розраховуємо втрати в міді якоря, Вт:

$$P_M = m \cdot I_{\text{нф}}^2 \cdot K_a. \quad (7.10)$$

7.11. Визначаємо втрати в сталі зубців якоря, Вт:

$$P_Z = p_0 k_{Tz} B_z^2 (f/50)^{1,5} M_z, \quad (7.11)$$

де $k_{Tz} = 2,0 \dots 2,2$.

7.12. Знаходимо втрати в сталі ярма якоря, Вт:

$$P_d = p_0 k_{Td} B_d^2 (f/50)^{1,5} M_{a1}, \quad (7.12)$$

де $k_{Td} = 1,4 \dots 1,6$.

7.13. Розраховуємо механічні втрати, Вт:

$$P_{\text{мех}} = 0,02 \cdot S_N \cdot \cos \varphi. \quad (7.13)$$

7.14. Визначаємо додаткові втрати, Вт:

$$P_{\text{доб}} = 0,01 \cdot S_N \cos \varphi. \quad (7.14)$$

7.15. Знаходимо сумарні втрати, Вт:

$$\sum P = P_M + P_Z + P_d + P_{\text{мех}} + P_{\text{доб}}. \quad (7.15)$$

7.16. Визначаємо ККД генератора:

$$\eta = \frac{S_N}{S_N + \sum P}. \quad (7.16)$$

Кінцевим етапом роботи є проведення електромагнітного розрахунку у програмі ANSYS Maxwell та побудова графіків характеристик генератора.

Необхідно у ході проведення електромагнітного розрахунку отримати наступні характеристики:

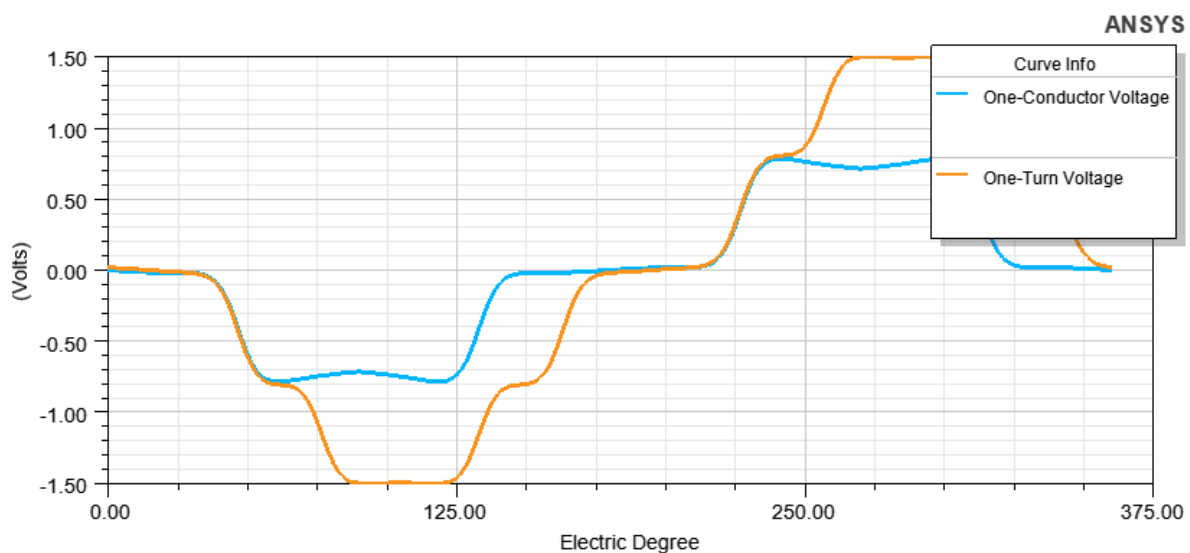


Рисунок 7.1 – Індукована напруга котушки при номінальній швидкості

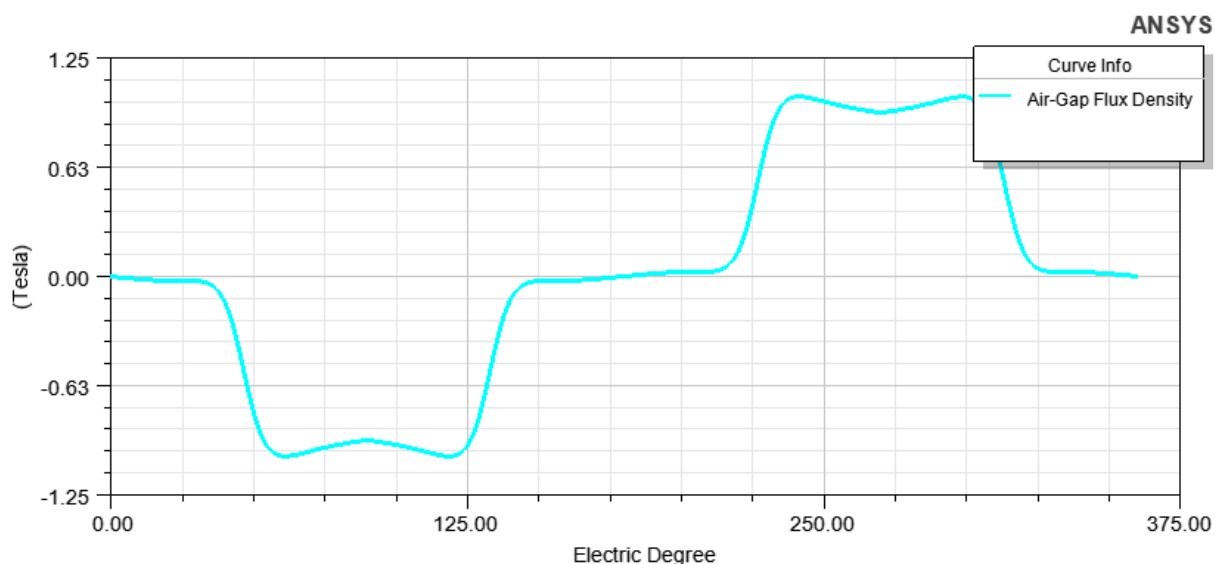


Рисунок 7.2 – Щільність потоку повітряного зазору

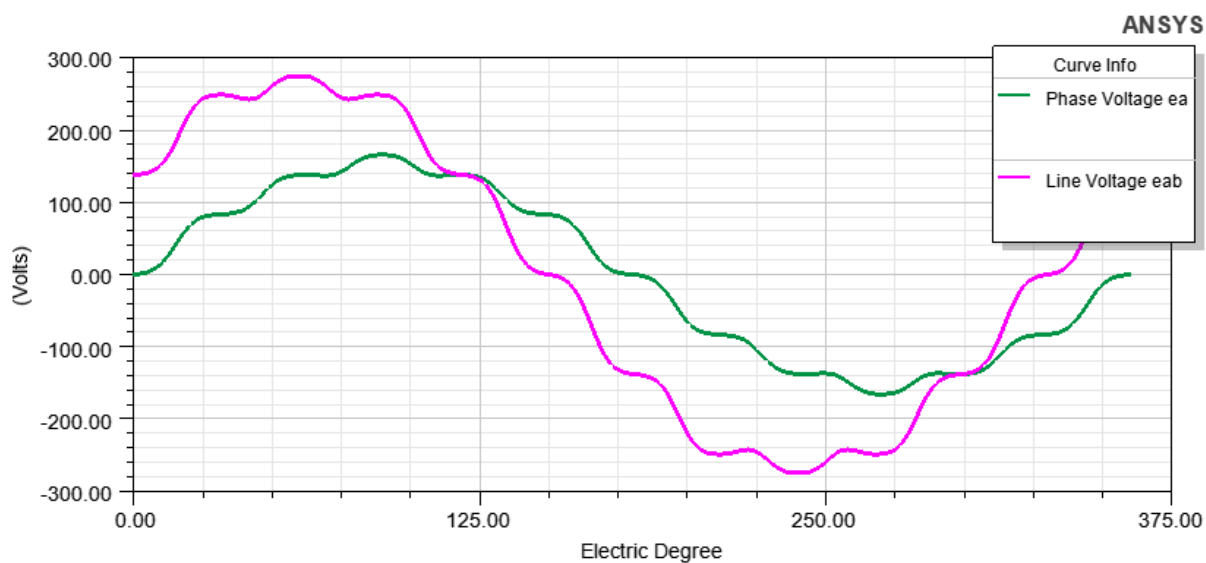


Рисунок 7.3 – Індукована напруга обмотки при номінальній швидкості

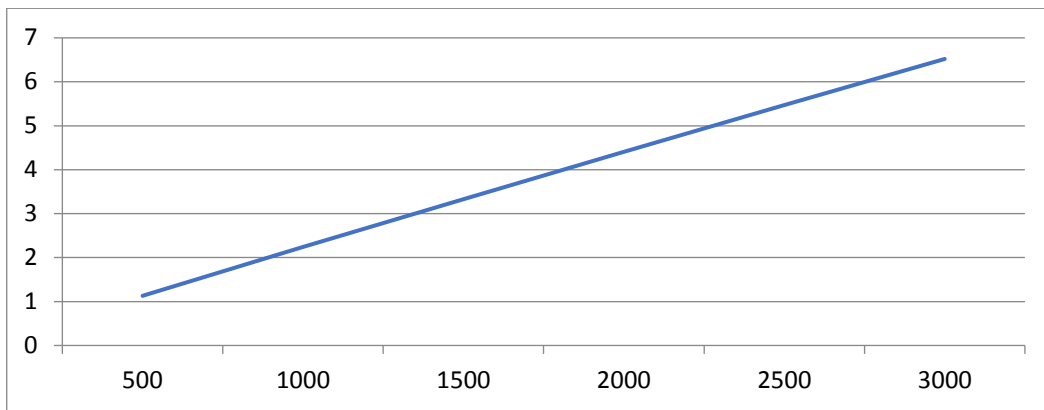


Рисунок 7.4 – Залежність фазного струму від корисної потужності генератора

За допомогою програми ANSYS Maxwell здобувач повинен розрахувати декілька точок механічної характеристики та самостійно побудувати залежності струму, напруги, ККД, коефіцієнту потужності та моменту від корисної потужності генератору.

Таблиця 7.1 – Розрахункові точки механічної характеристики генератора

P_2 , Вт	Фазний струм (А)	Фазна напруга (В)	ККД (%)	Коефіцієнт потужності	крутний момент (Н.м)
500	1,13	108,9	84,6	0,94	4,9
1000	2,24	108,2	90,88	0,97	9,26
1500	3,33	107,47	92,69	0,98	13,56
2000	4,41	106,72	93,29	0,986	17,8
2500	5,47	105,99	93,42	0,988	21,98
3000	6,52	105,26	93,29	0,99	26,1

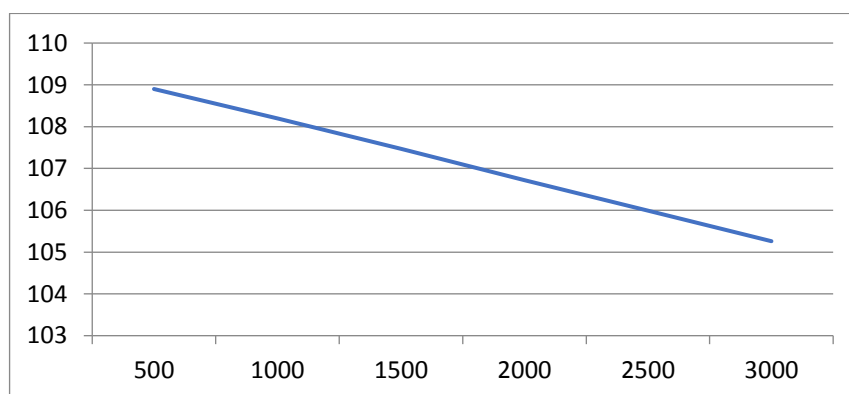


Рисунок 7.5 – Залежність фазної напруги від корисної потужності генератора

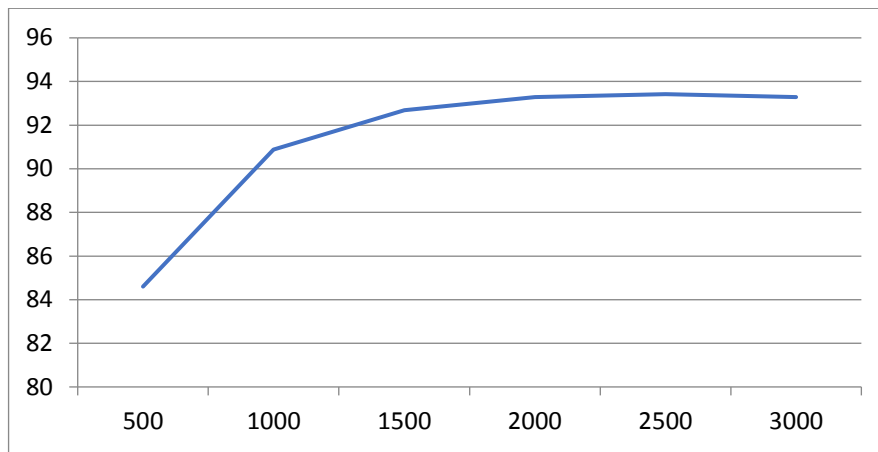


Рисунок 7.6 – Залежність ККД від корисної потужності генератора

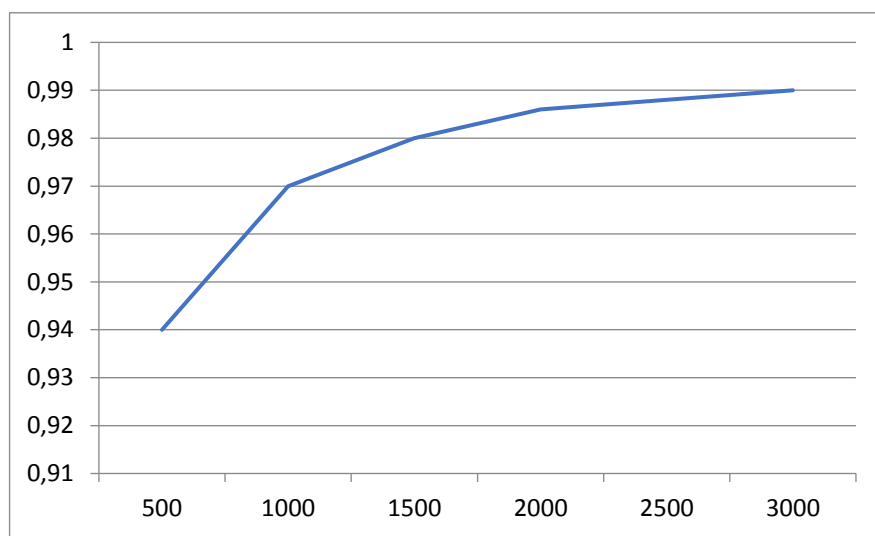


Рисунок 7.7 – Залежність коефіцієнта потужності від корисної потужності генератора

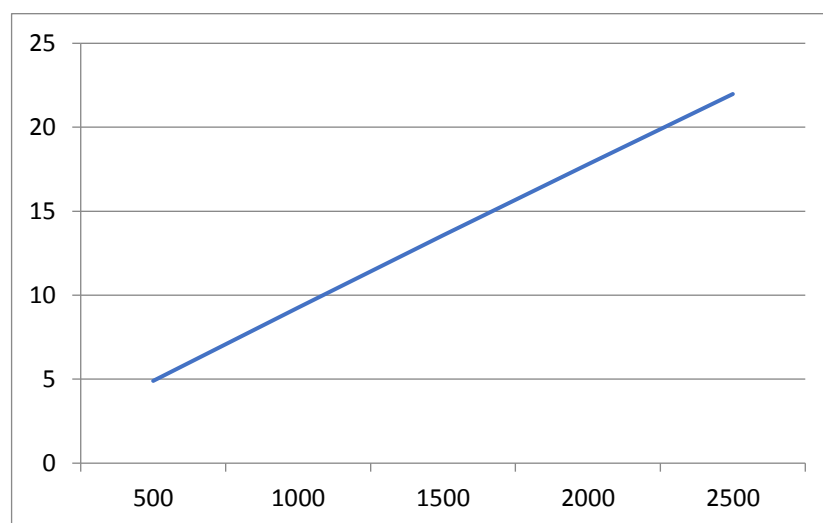


Рисунок 7.8 – Залежність номінального крутного моменту від корисної потужності генератора

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Яцун М. А. Електричні машини / М. А. Яцун. – Львів : Вид. Нац. університету «Львівська політехніка», 2001. – 428 с.
2. Бардик Є. І. Експлуатація та режими роботи електростанцій: нормальні, допустимі і аномальні режими синхронних генераторів / Є. І. Бардик. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 73 с.
3. Загірняк М. В. Електричні машини: підручник / М. В. Загірняк, Б. І. Невзлін. – Київ : Знання, 2009. – 399 с.
4. Електричні машини : підручник / Б. Т. Кононов, Г. І. Лагутін, О. Б. Котов та ін.; за заг. ред. Б.Т. Кононова. – Харків : ХУПС, 2015. – 493 с.

Виробничо-практичне видання

Методичні рекомендації
до виконання
розрахунково-графічної роботи
з навчальної дисципліни

«СПЕЦІАЛЬНІ ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ»

*(для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
всіх форм навчання зі спеціальності
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка,
освітня програма
«Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії»)*

Укладачі: **ГЛЄБОВА** Марина Леонідівна,
ЄГОРОВ Олексій Борисович,
ФОРКУН Яна Борисівна

Відповідальний за випуск *М. Л. Глебова*
За авторською редакцією
Комп'ютерне верстання *М. Л. Глебова*

План 2022, поз. 228М

Підп. до друку 11.11.2022. Формат 60 × 84/16.
Електронне видання. Ум. друк. арк. 1,7.

Видавець і виготовлювач:
Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002.
Електронна адреса: office@kname.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
ДК № 5328 від 11.04.2017.