

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ПОГОДЖЕНО
Директор ІНІ енергетики,
автоматики і енергозбереження

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри
електротехніки, електромеханіки
та електротехнологій

проф., д.т.н. /КАПЛУН В.В./
вчене звання, науковий ступінь підпис

доц., к.т.н. /ОКУШКО О.В./
вчене звання, науковий ступінь підпис

» _____ 2025р.
число місяць рік

» _____ 2025 р.
число місяць рік

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**на тему: «ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКЦІЇ ТА КЕРУВАННЯ
НИЗЬКОШВИДКІСНИМ ГЕНЕРАТОРОМ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ДЛЯ
ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ»**

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(код і назва)

Освітня програма «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми

к.т.н., доцент Усенко С.М.
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ПІБ)

Керівник магістерської роботи

к.т.н., доцент Чуєнко Р.М.
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ПІБ)

Виконав _____ Глуховщенко Д.А.
(підпис) (ПІБ)

РЕФЕРАТ

Магістерська робота обсягом 82 сторінки (73 рис. і 4 табл.) включає вступ, 5 розділів, висновки, список використаних джерел з 26 найменувань.

Об'єкт дослідження – конструкції низькошвидкісних генераторів постійного струму з безобмотковим ротором торцевого та циліндричного типу.

Предмет дослідження – Розрахункові та експериментальні характеристики низькошвидкісних генераторів постійного струму з безобмотковим ротором.

Методи дослідження та апаратура: а) інформаційного пошуку та систематизації даних – при аналізі публікацій та патентів; б) аналітичні – при аналізі перетворення енергії, поперечної реакції якоря, магнітної провідності паза та геометричних співвідношень у генераторі постійного струму з безобмотковим ротором; в) чисельні – при вирішенні рівнянь теплового балансу, моделюванні електромагнітних та теплових процесів у генераторі постійного струму з безобмотковим ротором методом кінцевих елементів з використанням програми ELCUT; г) експериментальні – при випробуванні дослідного зразка генератора постійного струму з безобмотковим ротором.

Мета роботи - розробка генератора постійного струму з безобмотковим ротором електромагнітним збудженням та малим моментом інерції номінальною швидкістю обертання 300 або 600 об/хв для роботи в складі вітроенергетичної установки на швидкостях вітру від 5 до 8 м/с.

В магістерській кваліфікаційній роботі проводиться аналіз сучасного стану вітрової енергетики, який показав доцільність розробки генераторів постійного струму з безобмотковим ротором для роботи у складі ВЕУ. Показано, що для отримання високого ККД конструктивна схема низькошвидкісної електричної машини постійного струму повинна бути по типу індукторної електричної машини із загальною для всіх полюсів обмоткою збудження.

Показано, що у бііндукторних ГПСБР частота перемагнічування у два рази більше, ніж в одноіндукторних ГПСБР, що необхідно враховувати в процесі проектування генераторів для ВЕУ.

Показано, що ВЕУ з ГПСБР за рахунок більш повного використання вітрового потенціалу дозволяє при меншій потужності отримати більшу кількість електричної енергії.

Ключові слова: генератор постійного струму, електрорушійна сила, коефіцієнт корисної дії, безобмотковий ротор, стаціонарне теплове поле, електромагнітне поле генератора.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ.....	7
ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ГЕНЕРАТОРІВ У ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВКАХ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ	10
1.1 Перспективи розвитку вітроенергетики.....	10
1.2 Типи генераторів у складі ВЕУ.....	15
1.3 Енергетичні показники високошвидкісних та низькошвидкісних безредукторних електричних генераторів.....	23
РОЗДІЛ 2 КОНСТРУКЦІЇ ГЕНЕРАТОРІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З БЕЗОБМОТКОВИМ РОТОРОМ.....	27
2.1 Особливості конструктивних схем генераторів постійного струму з безобмотковим ротором.....	27
2.2 Порівняння основних показників торцевих і циліндричних ГПСБР	34
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОПЕРЕЧНОЇ РЕАКЦІЇ ЯКОРЯ НА МАГНІТНЕ ПОЛЕ ГЕНЕРАТОРА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З БЕЗОБМОТКОВИМ РОТОРОМ.....	40
3.1 Потоки розсіювання у ГПСБР.....	40
3.2 Поперечна реакція якоря та засоби зменшення її впливу на основне магнітне поле.....	46
РОЗДІЛ 4 ОСНОВИ ПРОЕКТУВАННЯ ГЕНЕРАТОРІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З БЕЗОБМОТКОВИМ РОТОРОМ.....	52
4.1 Вибір геометричних співвідношень у циліндричних генераторах ...	52
4.2 Методика проектування низькошвидкісних генераторів	55

РОЗДІЛ 5 ДОСЛІДЖЕННЯ СТАЦІОНАРНОГО ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ В ОБМОТКАХ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ВИПРОБУВАННЯ ГЕНЕРАТОРА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З БЕЗОБМОТКОВИМ РОТОРОМ	59
5.1 Розрахунки стаціонарного теплого поля	59
5.2 Дослідження робочих характеристик експериментального генератора.....	66
5.3 Технологія виготовлення ГПСБР	75
ВИСНОВКИ	79
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	80

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ,
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ**

Скорочення:

ПДЕ – Поновлювані джерела енергії

ВЕУ – Вітроенергетична установка

LCOE – Levelized cost of electricity

ГПСБР – Генератор постійного струму з безобмотковим ротором

REE – Rare earth elements

РЗМ – Рідкісноземельні метали

ЕРС – Електрорушійна сила

ККД – Коефіцієнт корисної дії

МРС – Магніторушійна сила

МПС – Машина постійного струму

Символи:

% - відсотки; ÷ - обелюс

Одиниці:

°С; В; А; Вт; кВт квар; мм; км; об/хв; Ом; кг

ВСТУП

Актуальність - аналіз вітрового потенціалу України показує, що малі ВЕУ потужністю 1÷5 кВт, розраховані на номінальну швидкість вітру 10÷12 м/с, будуть ефективно працювати тільки в Карпатах і ряді приморських регіонів України, що сумарно складає не більш 5% від усієї території країни.

На інших територіях України середньорічна швидкість вітру не перевищує 5м/с, а це означає, що п'яти кіловатний ВЕУ, розрахована на номінальну швидкість вітру 10м/с, при швидкості вітру 5м/с забезпечить лише 10% від своєї номінальної потужності. Подібна ситуація не є унікальною і властивою лише для України, низький вітровий потенціал 5÷6 м/с має до 50% земної поверхні.

В даний час на малих ВЕУ, для перетворення механічної енергії обертання валу вітроколеса в електричну енергію практично всюди використовуються безредукторні багатополосні синхронні генератори з магнітоелектричним збудженням. Вони мають достатньо високу надійність та ККД.

Однак такі генератори мають високу ціну через постійно зростаючу вартість рідкісноземельних металів, застосовуваних для виготовлення постійних магнітів. За оцінкою експертів, вартість постійних магнітів у загальній вартості синхронного генератора з магнітоелектричним збудженням становить від 30 до 50%. Тільки за один 2018 рік вартість рідкісноземельних металів виросла на 20%. Очікується, що в подальшому їх вартість буде тільки зростати, збільшившись що найменше в два рази до кінця 2026 року.

Крім того, більшість низькообертових ВЕУ належать до групи електричних машин торцевого (аксіального) типу. Такі машини при відносно малій масі й габаритах мають великий момент інерції. Початкова швидкість вітру для таких машин становить 2,5÷3м/с, відповідно при швидкості вітру 1,5÷2,5м/с такі електричні машини не здатні працювати належним чином.

Тому розробка й впровадження у виробництво нових типів дешевих та енергоефективних низькообертових ВЕУ є актуальною науково-практичною задачею.

Мета - розробка генератора постійного струму з безобмотковим ротором

електромагнітним збудженням та малим моментом інерції номінальною швидкістю обертання 300 або 600 об/хв для роботи в складі вітроенергетичної установки на швидкостях вітру від 5 до 8 м/с.

Об'єкт дослідження – конструкції низькошвидкісних генераторів постійного струму з безобмотковим ротором торцевого та циліндричного типу.

Предмет дослідження – Розрахункові та експериментальні характеристики низькошвидкісних генераторів постійного струму з безобмотковим ротором.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ГЕНЕРАТОРІВ У ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВКАХ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ

1.1 Перспективи розвитку вітроенергетики

Аналіз літератури, присвяченої розвитку сучасної електроенергетики показує, що в цьому секторі світової економіки відбуваються глобальні зміни, прямо пов'язані з поновлюваними джерелами енергії (ПДЕ).

По даним незалежної інформаційно-консалтингової компанії Enerdata (статистичний щорічник світової енергетики), в 2018 році за рахунок ПДЕ забезпечується 36% енергоспоживання в Європі, 26% у Китаї й близько 18% у Сполучених Штатах, Індії і Японії.

В 2015 році вперше в історії загальносвітова потужність введених в експлуатацію генеруючих установок на ПДЕ досягла 55% від всіх введених у дію енергетичних потужностей. Тим самим був зафіксований новий тренд розвитку галузі: поновлювана енергетика починає витіснити традиційну енергетику.

Причина цього полягає в тому, що нова сонячна або вітрова станція практично безкоштовно виробляє електроенергію (витрати на паливо дорівнюють нулю), у той час як для традиційної енергетики, заснованої на спалюванні викопного палива, необхідно це паливо добувати. Додатковим стимулом у розвитку вітрової та сонячної енергетики є значне зниження ціни на устаткування. За останні десять років ціна на сонячні батареї знизилася в п'ять раз, а ціни на вітроенергетичні установки зменшилися більш ніж на 50%. Витрати на будівництво гідроелектростанцій, навпаки, постійно зростають.

Для оцінки витрат на експлуатацію енергопотужностей різного типу, як правило, використовують показник наведеної вартості електроенергії Levelized cost of electricity (LCOE). Даний показник визначається як відношення середніх

сукупних витрат на спорудження й експлуатацію генеруючої установки до загального обсягу виробленої нею електроенергії.

У дослідженні інвестиційного банку Lazard приводяться значення LCOE для різних способів одержання електроенергії:

- вітроенергетика – $32\div 77$ \$/МВт·г;
- сонячна енергетика – $50\div 70$ \$/МВт·г;
- вугільна генерація – $65\div 150$ \$/МВт·г;
- газо-турбінна генерація – $68\div 101$ \$/МВт·г;
- ядерна енергетика – $97\div 136$ \$/МВт·г.

Тому для енергетичних компаній стає вигідним інвестувати в сонячну й вітрову енергетику, головна перевага яких - швидка окупність і невеликі терміни введення потужностей в експлуатацію.

Як показує досвід експлуатації вітроенергетичних установок (ВЕУ), що працюють на єдину енергетичну мережу, економічно доцільно, щоб їх потужність була вище 1000 кВт. Тому у вітрогенерації застосовують переважно великі ВЕУ мегаваттного класу, але є й окремий клас малих вітроустановок.

У своєму звіті за 2017 р, присвяченому розвитку малої вітроенергетики, Всесвітня вітроенергетична асоціація (WWEA) прогнозувала різкий ріст загальної встановленої потужності малих ВЕУ з 0,755 ГВт в 2013 р. до 2 ГВт в 2020 р. Там же наведені наступні показники, що характеризують малу світову вітроенергетику:

- основні ринки збуту: – Китай (74%), США (16%), Великобританія(7%);
- середня потужність однієї ВЕУ, що купується: – Китай (0,56 кВт),
США (1,4 кВт), Великобританія (5,1 кВт);
- тип ВЕУ, пропонуваній виробниками: – горизонтальна вісь обертання 74% ;
- вертикальна вісь обертання 18%.

Україна також активно розбудовує свою малу вітроенергетику, займаючи 12 місце у світі по кількості встановлених малих ВЕУ(1740) й 6 місце по загальній установленій потужності (14723 кВт).

Незважаючи на загальний підхід до конструювання великих і малих ВЕУ, ці два класи установок суттєво відрізняються по географії установки й ефективності, під якою розуміється кількість електроенергії, виробленої протягом певного часу (день, місяць, рік).

Ефективність великих ВЕУ прямо залежить від висоти установки вітрогенератора. На великих висотах (100 і більш метрів) швидкість вітру вище, повітряні потоки більш рівномірні й менш турбулентні ніж у поверхні землі (рис.1.1).



Рис.1.1. Тенденції збільшення висоти ВЕУ й зменшення LCOE

Висота малих ВЕУ 10÷20 метрів, тому вони працюють у середовищі більш пульсуючого, рвучкого вітру, що знижує їх ефективність. Одна із причин полягає в тому, що найбільш популярні малі ВЕУ з горизонтальною віссю обертання не можуть миттєво розвернутися по новому зміненому напрямку вітру й на час повороту втрачають частину своєї потужності.

Географічно великі ВЕУ встановлюють тільки в місцях із середньорічною швидкістю вітру не менш 10÷12м/с. Як видно з карти вітрового потенціалу світу й України (рис.1.2 коричневі зони на карті), таких регіонів не дуже багато. Зокрема, в Україні цій вимозі відповідає тільки 5% території країни.

На іншій території України середньорічна швидкість вітру не перевищує 5м/с. Такий низький вітровий потенціал не представляє інтересу для великих ВЕУ, але може з успіхом реалізовуватися на малих установках, якщо вони будуть розраховані на номінальну швидкість вітру 5÷8 м/с. Однак на практиці реалізовувати такий підхід досить затратно.

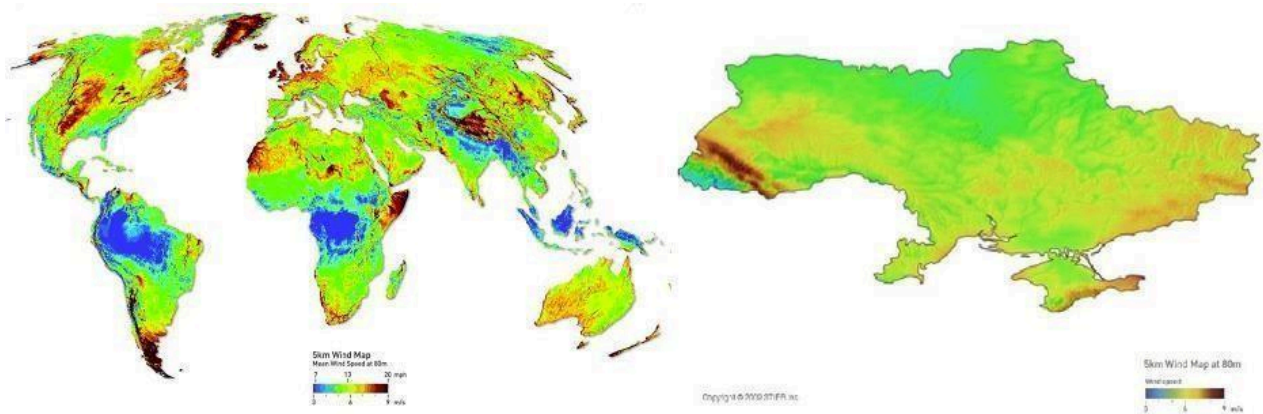


Рис.1.2. Вітровий потенціал світу й України

Потужність ВЕУ змінюється пропорційно кубу швидкості вітру

$$P = C_p \frac{\rho \cdot V^3 \pi \cdot D^2}{2 \cdot 4} \eta_{el} \cdot \eta_{mex} [Вт],$$

де: C_p – коефіцієнт використання енергії вітру; ρ – густина повітря; V – швидкість вітру, м/с; D – діаметр вітроколеса, м; η_{el} – ККД електричного генератора; η_{mex} – ККД механічної частини ВЕУ.

Це означає, що при зменшенні швидкості вітру у два рази потужність ВЕУ зменшиться у вісім разів.

Тому на практиці більшість виробників малих ВЕУ пропонують високообертові вітрогенератори, розраховані на номінальну швидкість вітру 10÷12м/с. Такий підхід дозволяє значно знизити вартість ВЕУ, але при цьому суттєво знижує її ефективність.

Аналіз даних моніторингу роботи ВЕУ й кривих залежності потужності від швидкості вітру показує:

1. Велика ВЕУ (рис.1.3) працює в регіоні із середньорічною швидкістю вітру 10-11м/с. Тому крива потужності, заявлена виробником для

$V_n=13\text{ м/с}$, практично повністю збігається з даними моніторингу роботи установки.



Рис.1.3. Крива потужності великої ВЕУ $P=1650$ кВт, $V_n=13$ м/с

2. Мала ВЕУ (рис.1.4) працює в регіоні із середньорічною швидкістю вітру 5-8 м/с. Тому крива потужності, заявлена виробником для $V_n=12$ м/с, різко відрізняється від даних моніторингу роботи установки.

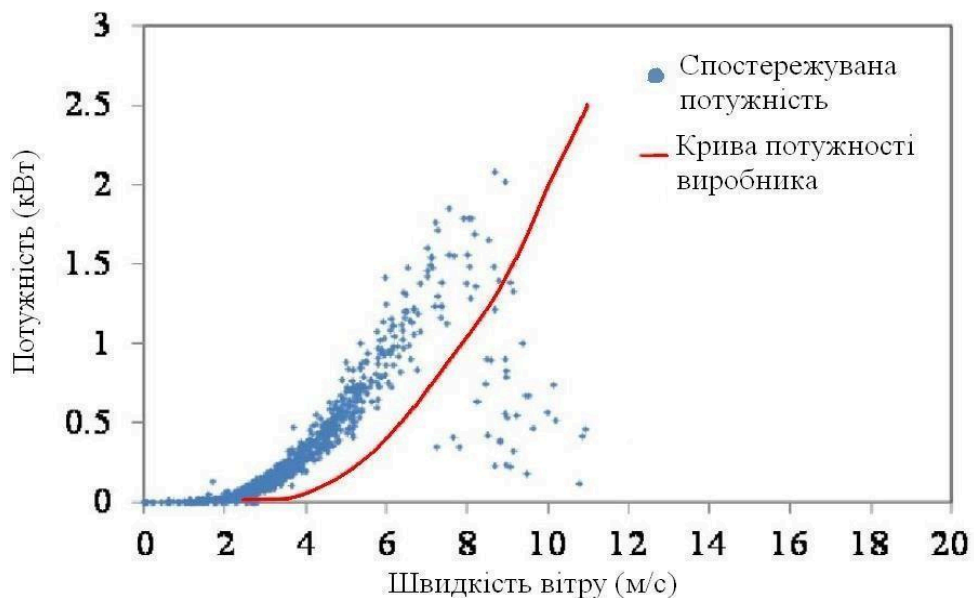


Рис.1.4. Крива потужності малої ВЕУ $P=2,5$ кВт, $V_n=12$ м/с

Ряд виробників, прагнучи підвищити ефективність своїх малих ВЕУ, знижують їх робочу номінальну швидкість вітру з 12 м/с до 10÷8 м/с, що очікувано призводить до різкого зростання вартості такої установки.

Наприклад, вартість високошвидкісної вертикальної ВЕУ WPG500 $P=680\text{Вт}$, $V_n=12\text{м/с}$ компанії «Альт-Энерго» (Україна) 800\$, а вартість низькошвидкісної безредукторної ВЕУ VAWT $P=1000\text{Вт}$, $V_n=9\text{м/с}$ компанії «DPV» (Україна) 2800\$.

Не краще ситуація в горизонтальних ВЕУ. Високошвидкісна ВЕУ Ista Breeze (Німеччина) $P=1000\text{Вт}$, $V=12\text{м/с}$, коштує 744\$, а низькошвидкісна безредукторна ВЕУ СВ-3.1 $P=800\text{Вт}$, $V_n=8\text{м/с}$ компанії «Світ Вітру» (Україна) коштує 2216\$.

Слід зазначити, що зазначені ціни містять у собі тільки вартість електрогенератора та вітроколеса. Решта устаткування (інвертор, щогла, акумулятор) однакові за ціною як для високошвидкісних, так і для низькошвидкісних рішень. Вітроколесо для ВЕУ потужністю 1-5 кВт не є складним високотехнологічним виробом (немає змінюваної геометрії крила) і не вимагає дорогих матеріалів і комплектуючих (приводів повороту крила, датчиків і контролерів). Тому вартість вітроколеса приблизно однакова як для високошвидкісних, так і для низькошвидкісних ВЕУ.

Таким чином, вартість електричного генератора є основним чинником, що впливає на дорожнечу або дешевизну тієї або іншої ВЕУ.

1.2 Типи генераторів у складі ВЕУ

Електричні генератори, що працюють у складі ВЕУ, мають свою специфіку роботи, пов'язану зі змінною швидкістю обертання, та мають забезпечити наступні вимоги:

- генератор повинен виконувати певні функції зі стабілізації й регулювання параметрів, що характеризують якість виробленої електроенергії;
- необхідність роботи в широкому діапазоні швидкостей обертання часто призводить до збільшення габаритів і маси генератора.

Виходячи із цих вимог, виділяють наступні типи генераторів для застосування у складі ВЕУ:

1. Асинхронні генератори з короткозамкненим ротором (АГ КР). Переваги – простий та надійний, дешевий.

Недоліки – для автономного режиму потрібно незалежне джерело реактивної потужності.

Застосування – у великих ВЕУ мегаваттного класу, працюючих на єдину енергетичну мережу, з використанням підвищувального редуктора (мультиплікатора).

2. Синхронні генератори з електромагнітним збудженням (СГ ЕЗ). Переваги:

- можливість одержати низький склад гармонік у струмі й поліпшення динамічних властивостей генератора;
- можливість керування реактивною потужністю з генераторної сторони.

Недоліки:

- висока вартість, складна конструкція;
- наявність ковзного контакту;
- необхідність окремого джерела енергії для обмотки збудження;
- тверда залежність частоти ЕРС від швидкості обертання.

Застосування :

- великий ВЕУ мегаваттного класу, що працюють на єдину енергетичну мережу, низькошвидкісні, безредукторні;
- малі ВЕУ.

3. Асинхроннізовані синхронні генератори (АСГ). Переваги:

- можливість використовувати в автономних системах у комбінації з іншими електричними машинами.
- висока стабільність підтримки параметрів електроенергії (частота, амплітуда, форма та симетрія напруги).

Недоліки:

- наявність на роторі ковзного контакту;

- необхідна наявність перетворювача частоти для регулювання напруги збудження;
- при відхиленні швидкості від синхронної потрібно значне збільшення реактивної потужності й напруги в обмотці збудження.

Застосування – знаходять одиничне застосування у великих ВЕУ мегаваттного класу, що працюють на єдину енергетичну мережу. Є предметом подальших досліджень.

4. Асинхронні генератори з фазним ротором (АГ ФР). Переваги:

- можливість використовувати в автономних системах у комбінації з іншими електричними машинами;
- простота в обслуговуванні й надійність;
- мають порівняно малі коливання генеруючої потужності при паралельній роботі, при змінній швидкості вітру та його поривах.

Недоліки:

- в автономному режимі необхідне автономне джерело реактивної потужності;
- наявність ковзного контакту;
- обмеження в промисловому застосуванні через спотворення форми вихідної напруги та незадовільних динамічних властивостях.

Застосування:

- великі ВЕУ мегаваттного класу, що працюють на єдину енергетичну мережу.
- малі ВЕУ знаходять одиничне застосування.

5. Генератори постійного струму з електромагнітним збудженням (ГПС ЕЗ). Переваги:

- малі коливання генеруючої потужності при змінній

- швидкості вітру та його поривах;
- відсутня необхідність в окремому джерелі енергії для обмотки збудження;
- немає необхідності у випрямлячі.

Недоліки:

- висока вартість, складна конструкція;
- наявність ковзного контакту;

Застосування – одиничне, практично не застосовуються.

6. Синхронні генератори з магнітоелектричним збудженням (СГ МЗ).

Переваги:

- відсутність ковзного контакту;
- висока надійність роботи;
- високе значення ККД.

Недоліки:

- сталість магнітного потоку збудження, неможливість його регулювати;
- висока вартість.

Застосування – великі та малі ВЕУ.

Якщо у великих ВЕУ мегаваттного класу, що працюють на єдину енергетичну мережу, в основному, використовують асинхронні генератори, синхронні генератори з магнітоелектричним збудженням (Vestas, Siemens) та синхронні генератори з електромагнітним збудженням (Enercon), то в малих ВЕУ практично завжди використовуються синхронні генератори з магнітоелектричним збудженням. Дані генератори не вимагають сервісного обслуговування й високоефективні. Проведений порівняльний аналіз асинхронних і синхронних генераторів для малих ВЕУ показав перевагу синхронних генераторів (рис. 1.5).

Однак у синхронних генераторів з магнітоелектричним збудженням є один істотний недолік – висока вартість виготовлення.

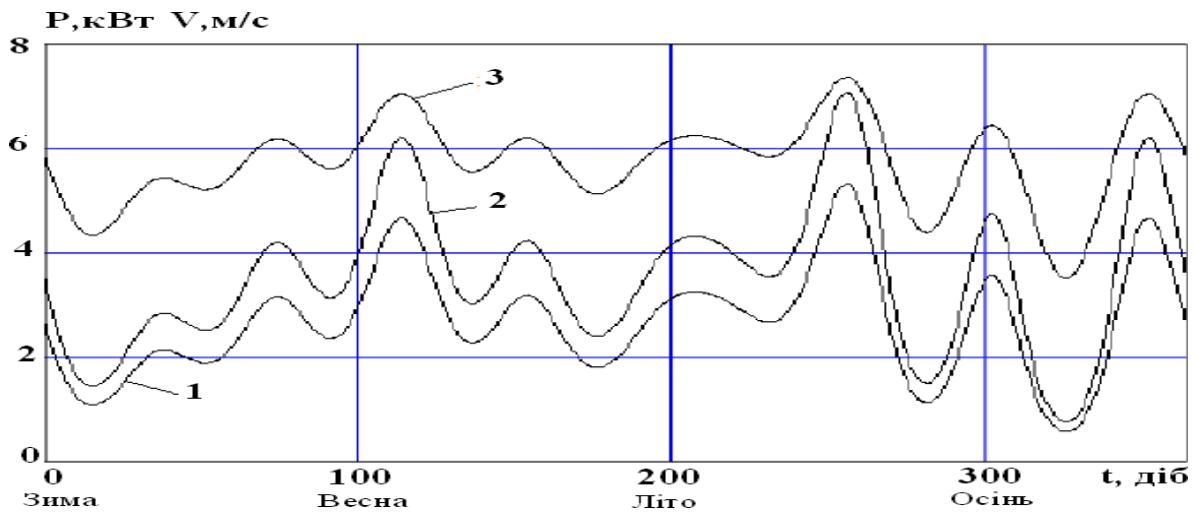


Рис. 1.5. Потужність, що виробляється генераторами залежно від зміни швидкості вітру протягом року: 1 – Асинхронний з короткозамкненим ротором; 2 – Синхронний з магнітоелектричним збудженням; 3 – зміна швидкості вітру

Такі генератори мають високу ціну внаслідок постійно зростаючої вартості рідкісноземельних металів (РЗМ) (rare earth elements (REE)) (рис.1.6) (неодиму – Nd, празеодиму – Pr, диспрозію – Dy), що застосовуються для виготовлення високоенергетичних постійних магнітів (неодим-залізо-бор NdFeB, Nd (20%), Pr (5%), Dy (5%)).

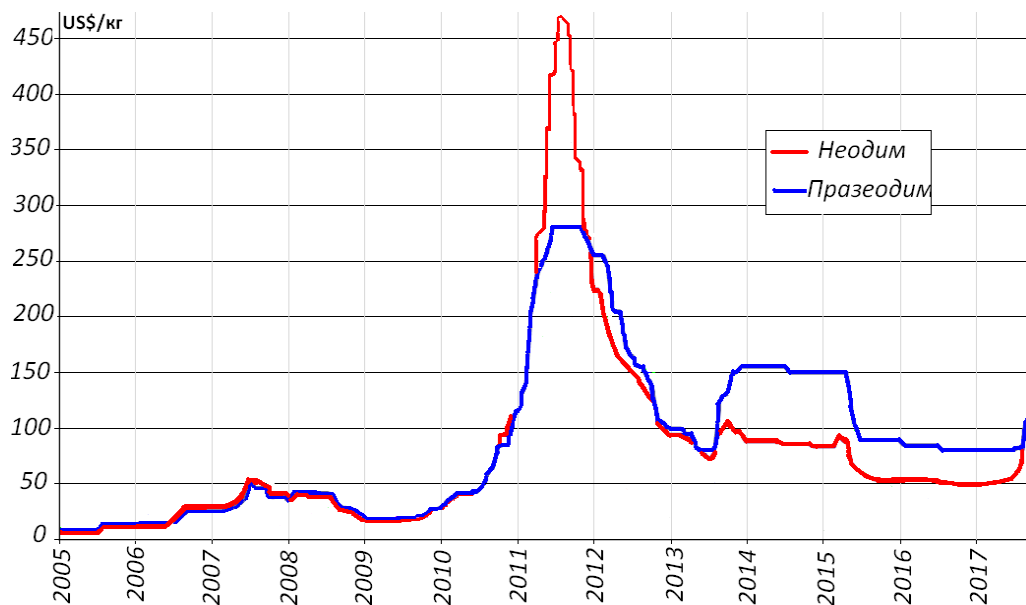


Рис.1.6. Динаміка цін на рідкісноземельні метали з 2005 по 2018 рік

Основними споживачами РЗМ є дві галузі: автомобілебудування (електричні двигуни й акумулятори) і вітроенергетика (генератори з магнітоелектричним збудженням). Електричний двигун з магнітоелектричним збудженням, що приводить у рух мотор гібрида Toyota Prius, містить 1 кг неодиму, а ВЕУ з номінальною потужністю 1 МВт містить у собі 600 кг неодимових магнітів, у яких міститься 200 кг неодиму й 30 кг диспрозію.

У звіті незалежної дослідницької й консультаційної фірми Adamas Intelligence, що спеціалізується на аналізі ринку металів, зафіксована тенденція по перевищенню глобального річного попиту на оксид неодиму над його глобальним річним виробництвом до 2030 року. Така тенденція може привести до вичерпання накопичених запасів РЗМ і їх дефіциту.

Тільки за один 2018 рік вартість рідкісноземельних металів виросла на 20%.

Для рішення цієї проблеми існує кілька шляхів:

- розширення виробництва РЗМ;
- розробка нових магнітних матеріалів;
- вторинна переробка постійних магнітів;
- розробка нових конструкцій електричних машин без постійних магнітів.

Розширення виробництва РЗМ зустрічається із двома проблемами: географічними й екологічними. Географічно 60% світових запасів РЗМ зосереджено в Китаї, який і є основним постачальником (90%) цих матеріалів на світовий ринок. При цьому Китай обмежує виробництво РЗМ, вводячи квоти на видобуток руди, а більшість готової продукції реалізує на внутрішньому ринку, проводячи великі інфраструктурні проекти. За даними 2018 р. за межами Китаю працює лише один рідкісноземельний рудник у Маунт-Уелд в Австралії. Введення в експлуатацію рудників у США і Євросоюзі ускладнюється потужним протестним рухом екологічних організацій. За статистикою, при збагаченні однієї тонни рідкісноземельних елементів утворюється одна тонна радіоактивних відходів та 75 тонн забрудненої кислотами води. Тому,

швидше за все, основним постачальником РЗМ на світовий ринок у найближчі роки, як і раніше, буде Китай.

Розробка нових матеріалів розвивається за двома напрямками.

1. Подальший розвиток і вдосконалення постійних магнітів на основі неодиму, зокрема, заміна дорогого диспрозію (застосовується для збереження магнітних властивостей матеріалу при високих температурах) на більш дешевий аналог. У цьому напрямку досягнуті значні успіхи.

2. Нові магнітні матеріали. У вересні 2011 р. ARPA-E (*Advanced Research Projects Agency-Energy - Агентство передових досліджень в області енергетики міністерства енергетики США*) почало фінансувати програму REACT (*Rare Earth Alternatives in Critical Technologies - Альтернатива рідкісноземельним елементам у критичних технологіях. Під критичними технологіями розуміється автомобілебудування й вітроенергетика*).

У програмі взяли участь 14 університетів і національних лабораторій США, а також 27 університетів і корпорацій у якості партнерів програми. Учасниками програми були такі великі наукові центри й корпорації, як Національна лабораторія аерокосмічного агентства імені Еймса, Массачусетський інститут, General Motors, General Electric, ABB, і т.і.

У рамках програми проводилися дослідження зі створення постійних магнітів без рідкісноземельних елементів (*Rare-Earth-Free Permanent Magnets*) на основі церію, нітриду заліза, вуглецю, марганцю й ряду інших елементів.

В 2016 р. ARPA-E визнала комерційно успішним тільки два проекти. Обидва пов'язані з темою суперпровідників. Усі проекти по створенню постійних магнітів без рідкісноземельних елементів залишилися на рівні лабораторних досліджень.

Роботи зі створення постійних магнітів без рідкісноземельних елементів ведуться не тільки в США, але й у Євросоюзі, де існує програма «EURARE» (Європейський рідкісноземельний проект).

Аналіз сучасного стану робіт зі створення постійних магнітів без рідкісноземельних елементів приводить до висновку, що на сьогодні не

існує промислових технологій, що дозволяють виготовляти дешеві магніти без рідкісноземельних елементів, що не поступаються за характеристиками неодимовим магнітам. Отримані нові магнітні матеріали або дешеві, але не ефективні, або ефективні як неодимові магніти, але дорогі. Ціна таких магнітів порівняна з вартістю неодимових магнітів.

Вторинна переробка постійних магнітів. Середній термін експлуатації ВЕУ рівний двадцяти рокам, по закінченню яких генератор як складова ВЕУ повинен бути розібраний, а постійні магніти відправлені на вторинну переробку. Якщо прийняти обсяг старих відпрацьованих магнітів за 100%, то після відновлення буде отримано тільки 40% нових «вторинних» магнітів, інші 60% необхідно додавати новими «первинними» магнітами, закупленими в тому ж Китаї

Розробка нових конструкцій електричних машин без постійних магнітів. У цей час це найбільш перспективний шлях вирішення проблеми РЗМ. Роботи в цьому напрямку активно ведуться як державами, так і великими корпораціями.

1) Державна програма США «Alternative Motor Design. Program designing motors without rare earth permanent magnets» (Альтернативний двигун. Програма проектування двигунів без рідкісноземельних постійних магнітів) реалізована в Oak Ridge National Lab.

2) Програми ABB і Siemens по синхронно-реактивним та вентильно-індукторним двигунам.

За оцінкою експертів, вартість постійних магнітів у загальній вартості синхронного генератора з магнітоелектричним збудженням становить від 30 до 50%.

Тому створення низькошвидкісного електричного генератора з електромагнітним збудженням, порівнянного за ціною з високошвидкісними генераторами для ВЕУ, а за ефективністю з безредукторними низькошвидкісними генераторами ВЕУ, є важливим науково-практичним завданням. Розв'язання даної задачі дозволяє за рахунок більш повного

використання вітрового потенціалу, зменшити потужність і вартість ВЕУ, зберігши незмінним кількість вироблюваної ними електричної енергії.

З метою визначення кращої технологічності виготовлення, умов тепловідводу та генерації електроенергії запропоновано розглянути два типи ГПСБР: циліндричного та торцевого виконання.

1.3 Енергетичні показники високошвидкісних та низькошвидкісних безредукторних електричних генераторів

Визначальним параметром, що характеризують показники високошвидкісних та низькошвидкісних безредукторних електричних машин, є коефіцієнт корисної дії. У роботі докладно розглядається питання одержання високого ККД у низькошвидкісному приводі.

Аналізуючи вираз

$$\frac{1-\eta_a}{\eta_a} = \frac{j_a \cdot \rho_r \cdot K_{лч}}{B_\delta \cdot V}, \quad (1.1)$$

де η_a – частковий ККД, що враховує лише втрати в міді;

j_a – густина струму провідника;

ρ_r – питомий опір міді при звичайних температурах нагрівання;

$K_{лч} = \frac{\ell_\delta + \ell_{лч}}{\ell_\delta}$ – відношення повної довжини витка до довжини його

активної частини;

B_δ – магнітна індукція в робочому повітряному проміжку;

V – лінійна швидкість ротора,

зроблено висновок, що для збереження високого ККД необхідно збільшувати масу обмотки. Для можливості обґрунтування істотних висновків відносно енергетичних показників низькошвидкісних машин, вираз (1.1) представлено у вигляді

$$\frac{A \cdot j_a}{A \cdot B_\delta} = V \cdot \frac{1-\eta_a}{\eta_a} \cdot \frac{1}{\rho_r \cdot K_{лч}},$$

звідки
$$A \cdot j_a = K \cdot V \cdot \frac{1 - \eta_a}{\eta_a} \cdot F', \quad (1.2)$$

де $A \cdot j_a \left(\frac{A}{M} \cdot \frac{A}{MM^2} \right)$ – фактор нагріву електричної машини;

$F' = \alpha \delta \cdot B_\delta \cdot A$ (Н/м²) – питоме зусилля якоря

$K = \frac{1}{\rho_r \cdot K_{лч}}$ – зведений коефіцієнт.

З виразу (1.2) зроблено висновок, що при однаковій густині зусиль на поверхні ротора, однаковому відношенні активної частини витка до його повної довжини, однаковому матеріалі обмотки й однаковому нагріванні для збереження того самого значення ККД меншим значенням лінійної швидкості на поверхні якоря повинні відповідати в стільки ж раз менші значення фактора нагрівання.

Однак зменшення густини струму обмотки якоря призводить до збільшення маси міді. Але для торцевої електричної машини, що має велике відношення діаметра до довжини, збільшення маси обмотки якоря та, відповідно, висоти паза магнітопроводу призводить до незначного збільшення довжини торцевої електричної машини, мало позначаючись на її діаметрі. Тому збільшення маси такої машини відносно невелике. При цьому зменшення густини струму призводить до меншого фактичного нагрівання обмотки, що суттєво підвищує її надійність і довговічність.

Подавши лінійну швидкість ротора як $V = \omega \cdot R$ після перетворень виразу (1.2) радіус R у функції частоти обертання ω визначається формулою

$$R = A \cdot j_a \cdot \frac{\eta_a}{(1 - \eta_a)} \cdot \frac{K_{лч} \cdot \rho_r}{\omega \cdot F'}$$

або
$$R = A \cdot j_a \cdot \frac{\eta_a}{(1 - \eta_a)} \cdot \frac{K_{лч} \cdot \rho_r}{0.145 \cdot n \cdot F'} \quad (1.3)$$

Аналізуючи вираз (1.3), можна зробити висновок, що при однаковій густині зусиль на поверхні ротора, однаковій величині фактора нагріву, однаковому матеріалі обмотки, однаковому відношенні активної частини витка до його повної довжини для збереження того самого значення ККД величина

діаметра низькошвидкісної машини повинна бути зворотно пропорційна швидкості обертання.

На рис.1.7 показана залежність Aj_a ($\text{А/см}\cdot\text{А/мм}^2$) від лінійної швидкості ротора V (м/с) генератора постійного струму при ККД не менш 80%, питомому зусиллі $F'=2,8\cdot 10^4\text{Н/м}^2$, відношенні повної довжини витка до довжини його активної частини $K_{л.ч}=2,5$, індукції в робочому повітряному проміжку $B_\delta=0,8$ Тл, коефіцієнті полюсного перекриття $\alpha_\delta=0,8$ для швидкостей обертання $n=200, 500, 750$ і 1000 об/хв.

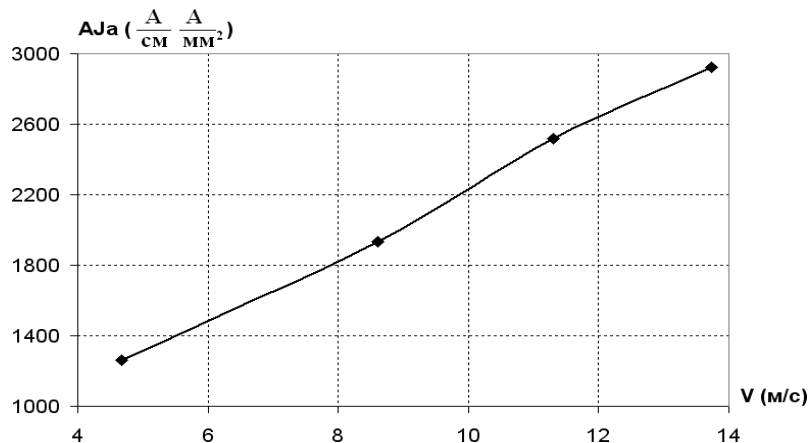


Рис. 1.7. Залежність фактора нагріву від лінійної швидкості

На рис.1.8 показана залежність D (м) від швидкості обертання (n об/хв) генератора постійного струму з ККД не менш 80%, питомому зусиллі $F'=2,8\cdot 10^4\text{Н/м}^2$, факторові нагріву $Aj_a=2880\text{А/см}\cdot\text{А/мм}^2$, відношенні повної довжини витка до довжини його активної частини $K_{л.ч}=2,5$ для швидкості обертання $n=200, 500, 750$ і 1000 об/хв.

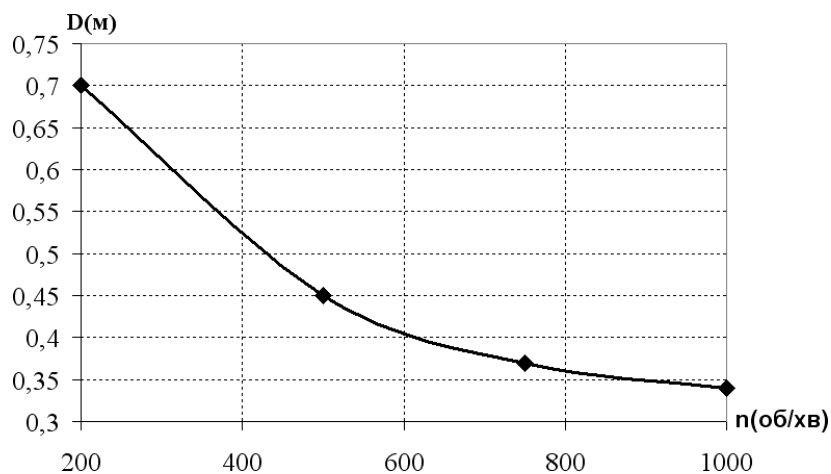


Рис.1.8. Залежність діаметра від швидкості обертання

Для одержання високого значення ККД низькошвидкісні машини вимагають великої кількості полюсів тому що, частота обертання ротора, згідно з виразом (1.4), обернено пропорційна числу пар полюсів p при сталих U , a , N , Φ .

$$n = \frac{U}{C_e \cdot \Phi} = \frac{U \cdot 60 \cdot a}{p \cdot N \cdot \Phi} \quad (1.4)$$

Однак спроби встановити велику кількість полюсів у генераторі постійного струму класичної конструкції з відносно невеликим діаметром пов'язані зі значними конструкторсько-технологічними труднощами. Як приклад можна розглянути конструкцію статора (рис. 1.9) генератора постійного струму з одним полюсним наконечником на кожному полюсі, виготовленого на початку 20 століття. Тому конструкція генератора невеликої потужності з електромагнітним збудженням і явно вираженими полюсами масло підходить для низьких обертів.

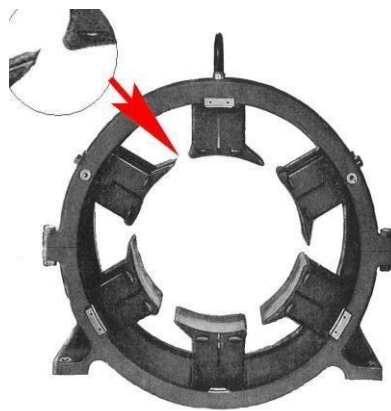


Рис. 1.9. Генератор з одним полюсним наконечником на кожному полюсі

Найбільш прийнятною конструктивною схемою для такої низькошвидкісної машини є схема індукторного одноіменнополюсного генератора без явно виражених полюсів із загальною для всіх полюсів (зубців) обмоткою збудження.

РОЗДІЛ 2

КОНСТРУКЦІЇ ГЕНЕРАТОРІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З БЕЗОБМОТКОВИМ РОТОРОМ

2.1 Особливості конструктивних схем генераторів постійного струму з безобмотковим ротором

В класичних електричних машинах конструкторська думка відштовхувалась від обертових конструкцій до лінійних. У випадку з генератором постійного струму з безобмотковим ротором (ГПСБР) відбулося зворотне топологічне перетворення. Дослідження лінійних машин постійного струму проводилися в Одеському національному політехнічному університеті (ОНПУ) починаючи з 1969 р., де зусиллями ряду вчених, були розроблені, досліджені й впроваджені цілий ряд конструктивних схем таких електричних машин. Починаючи з 2006 р., в ОНПУ ведуться роботи з дослідження електричних машин постійного струму з безобмотковим ротором.

Запропонована конструкція ГПСБР, магнітна система якої складається з ряду магнітно-незв'язаних контурів і не має загального ярма на відміну від класичної конструкції генератора постійного струму. Таке конструктивне рішення дозволяє суттєво послабити поле поперечної реакції якоря шляхом зниження магнітної провідності магнітопроводу в поперечному напрямку (рис. 2.1,а,б).

Для збільшення числа полюсів на низьких обертах у ГПСБР використовується конструктивне рішення, реалізоване у одноіменнополюсних індукторних генераторах (рис. 2.2, а), а саме використання загальної для всіх полюсів (зубців) обмотки збудження. У такій конструкції всі обмотки нерухомі, а зміна магнітного потоку, що пронизує обмотку якоря, відбувається за рахунок переміщення феромагнітних полюсів (зубців) безобмоткового ротора.

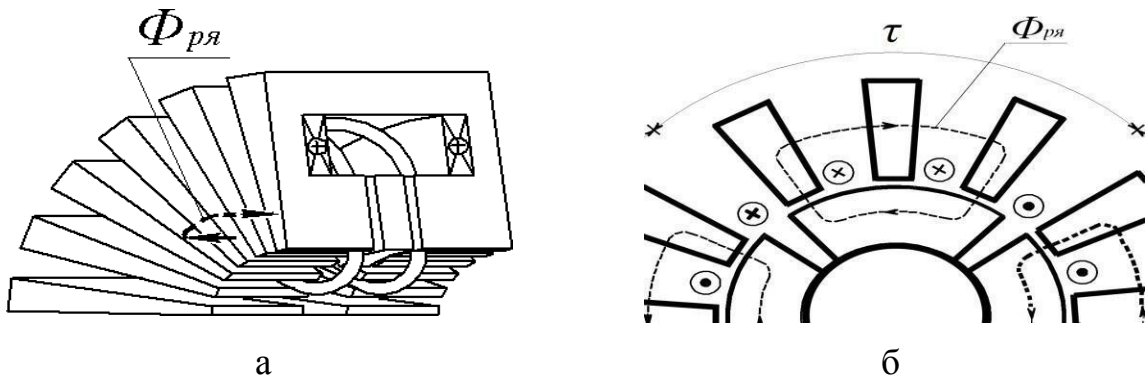


Рис 2.1. Ослаблення поперечної реакції якоря в ГПСБР:
а – циліндричне виконання ; б – торцеве виконання

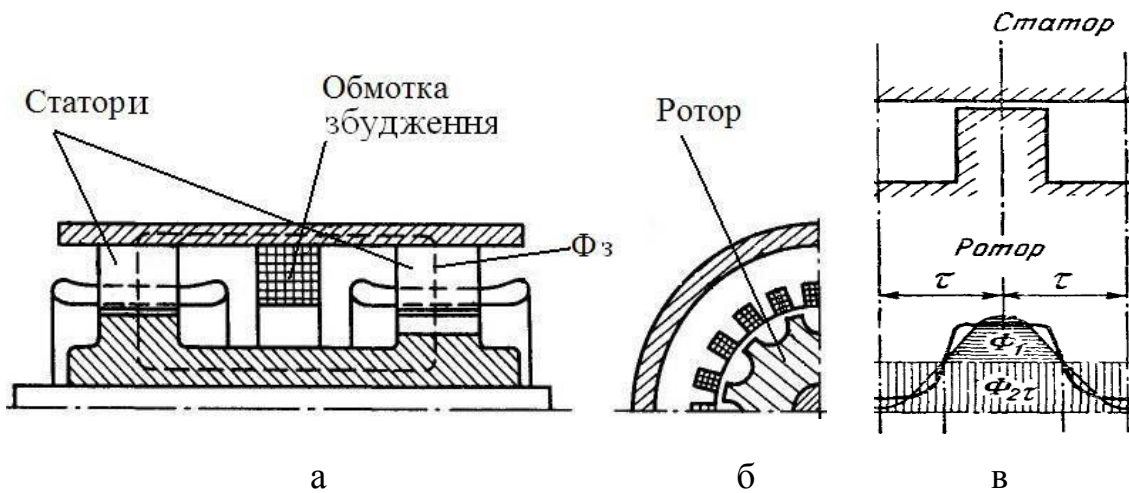


Рис. 2.2. Одноіменнополюсна індукторна електрична машина:
а – поздовжній розріз; б – поперечний розріз; в – визначення коефіцієнту
використання магнітного потоку

У ГПСБР, як і в індукторній машині, величина магнітної індукції в робочому проміжку змінюється тільки за величиною, залишаючись незмінною за напрямком. Це дозволяє вважати ГПСБР циліндричного й торцевого виду машинами постійного струму індукторного типу.

У одноіменнополюсному індукторному генераторі тільки частина основного магнітного потоку (активної поверхні статора) бере участь у перетворенні енергії, що характеризується коефіцієнтом використання магнітного потоку $K_{вик} = \Phi_1 / \Phi_{2\tau}$ (відношення потоку першої зубцевої гармоніки до потоку подвійного полюсного розподілу (рис.2.2,в). В індукторному

генераторі $K_{\text{вик}} = 0,26 \div 0,46$, тому маса його активної частини й габарити більше, ніж у звичайного синхронного генератора з тієї ж наведеною електрорушійною силою (ЕРС) і потужністю.

У ГПСБР із електромагнітним збудженням коефіцієнт використання магнітного потоку доцільно визначати як відношення кількості статорів з повним використанням активної поверхні $n_{100\%}$ до загальної кількості статорів n збільшення маси обмотувальної міді якоря компенсується відсутністю компенсаційної обмотки й обмотки додаткових полюсів. Крім цього, якщо в ГПСБР використовувати комбіноване збудження шляхом встановлення на обертовому роторі постійних магнітів, що чергуються з феромагнітними полюсами, значення коефіцієнт використання магнітного потоку виросте до 1.

Таке рішення реалізоване у конструкції електричної машини постійного струму з комбінованим збудженням (рис. 2.3, а, б).

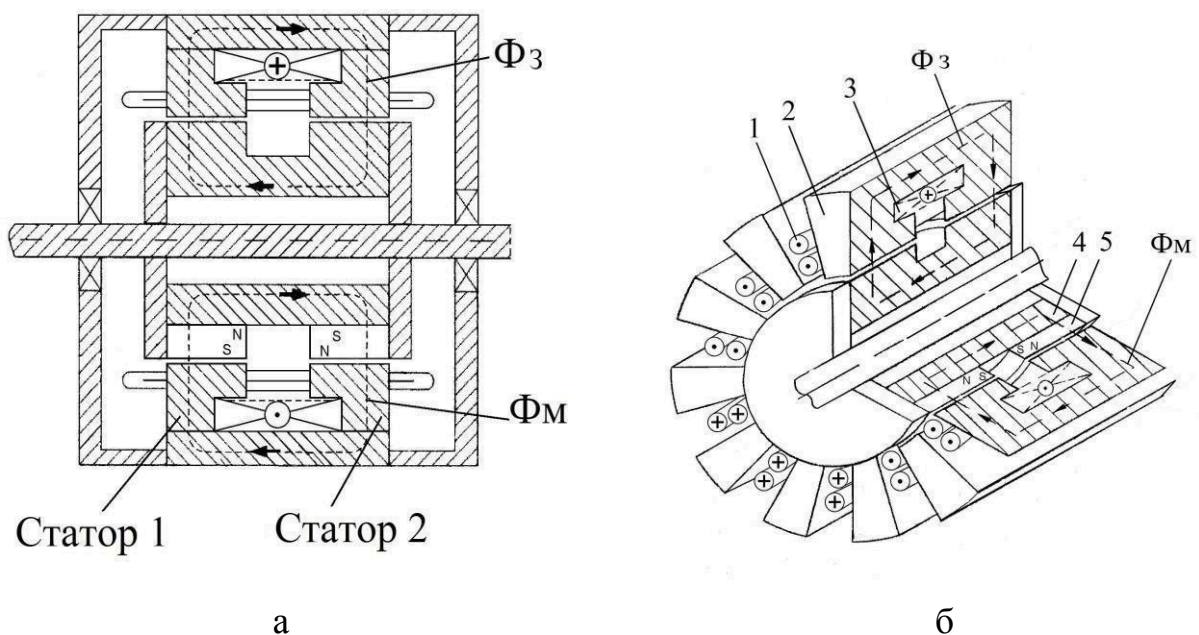


Рис. 2.3. Циліндрична електрична машина постійного струму з комбінованим збудженням: а - поздовжній розріз; б – аксонометрія

Магнітна система даної конструкції складається з ряду магнітно- незв'язаних зубців П-подібної форми 2, що утворюють два статори, які

охоплюють обмотку збудження 3. Між зубцями у відкритих по обидва боки пазах перебуває обмотка якоря 1. Секції обмотки якоря укладаються із частковим зсувом на величину полюсного розподілу τ (рис.2.4,а). Цим забезпечується односпрямованість результуючого магнітного потоку, що пронизує секцію. Ротор складається з ряду магнітно-незв'язаних феромагнітних полюсів 4, що чергуються з постійними магнітами (рис. 2.4,б). Здобутком такої конструкції є повне використання активної поверхні статора $K_{вик}=1$, високий ККД, мала маса, малі габарити, можливість часткового (50%) регулювання частоти обертання послабленням основного магнітного потоку Φ_3 обмотки збудження. Однак використання дорогих постійних магнітів та їх монтаж на обертовому роторі, стикається зі значними технологічними труднощами, що обмежує сферу застосування таких електричних машин.

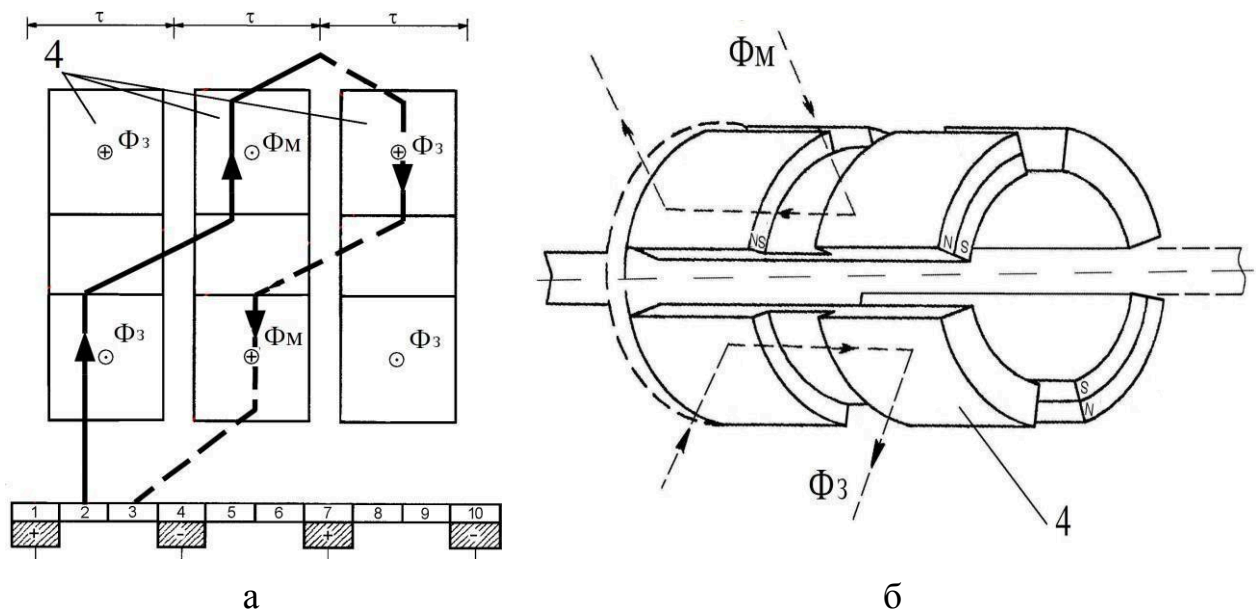


Рис. 2.4. Циліндрична електрична машина постійного струму з комбінованим збудженням: а - секція обмотки якоря; б – ротор

При відмові від постійних магнітів коефіцієнт використання приймає значення 0,5. Тому для збереження однакової потужності довжина активної частини провідника якоря повинна бути збільшена у два рази, що приведе до істотного збільшення маси й габаритів такого генератора.

У цьому випадку більш доцільно використовувати електричну машину бііндукторного типу (рис.2.5,а,б), у якій використовується тільки електромагнітне збудження, а коефіцієнт використання магнітного потоку рівний $K_{вик}=0,66$.

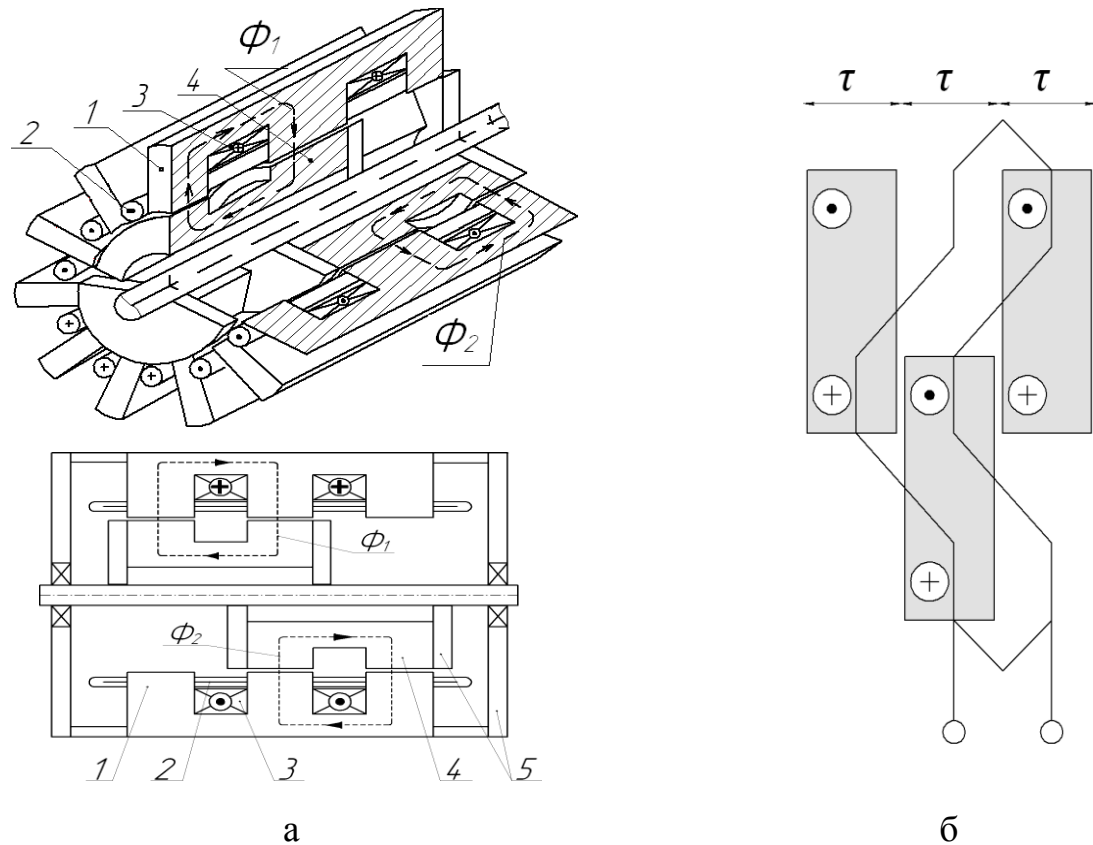


Рис.2.5. Циліндрична електрична машина постійного струму бііндукторного типу: а – аксонометрія й поздовжній розріз; б – секція обмотки якоря

Магнітна система ГПСБР бііндукторного типу немає загального ярма та складається з ряду магнітно-незв'язаних зубців Ш-подібної форми 1, між якими покладені секції обмотки якоря 2, обмоток збудження 3, полюсів 4 і немагнітних дисків 5. Секції обмотки якоря укладаються із частковим зсувом на величину полюсного розподілу τ (рис.2.4,а). Завдяки цьому забезпечується односпрямованість результуючого магнітного потоку, що пронизує секцію.

Повними аналогами вищеописаних конструкцій, але не циліндричного а торцевого виду, є конструкції, показані на рис. 2.6, а, б і рис. 2.7, а, б.

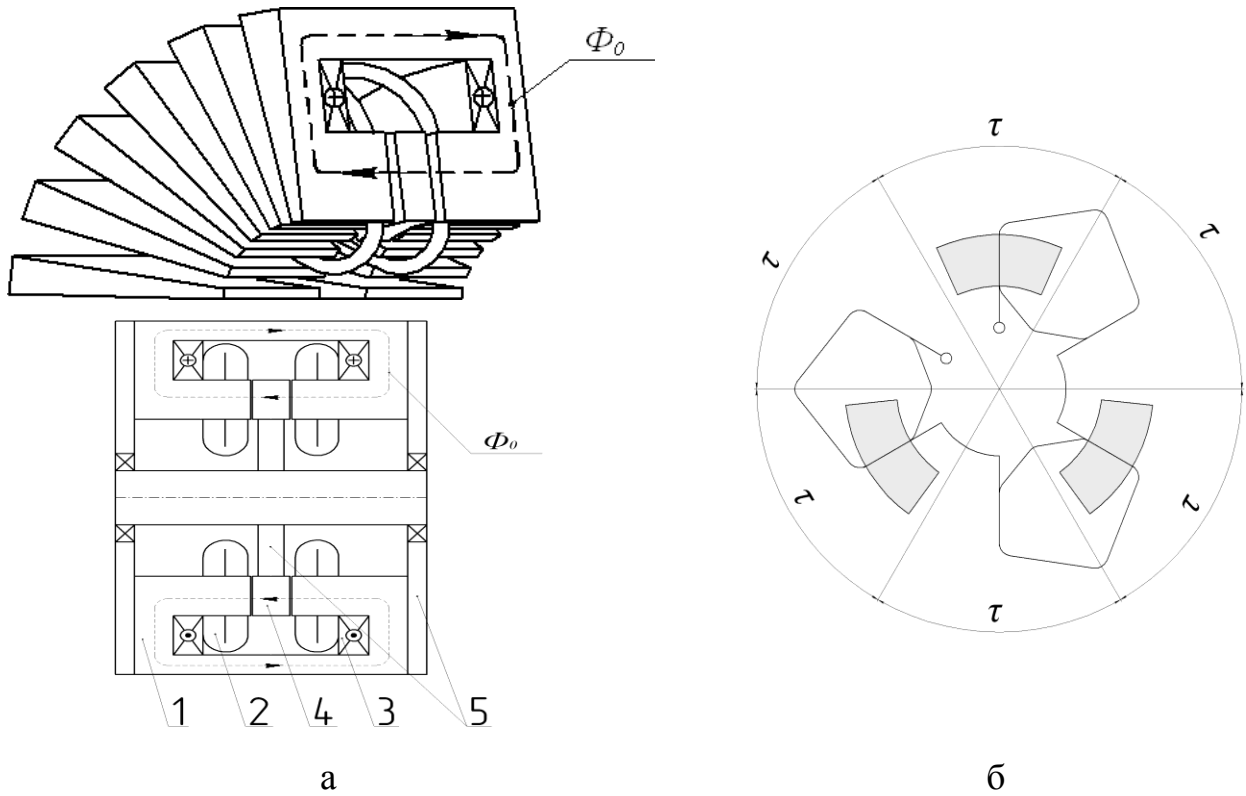


Рис.2.6. Торцева електрична машина постійного струму з комбінованим збудженням: а – аксонометрія й поздовжній розріз; б – секція обмотки якоря

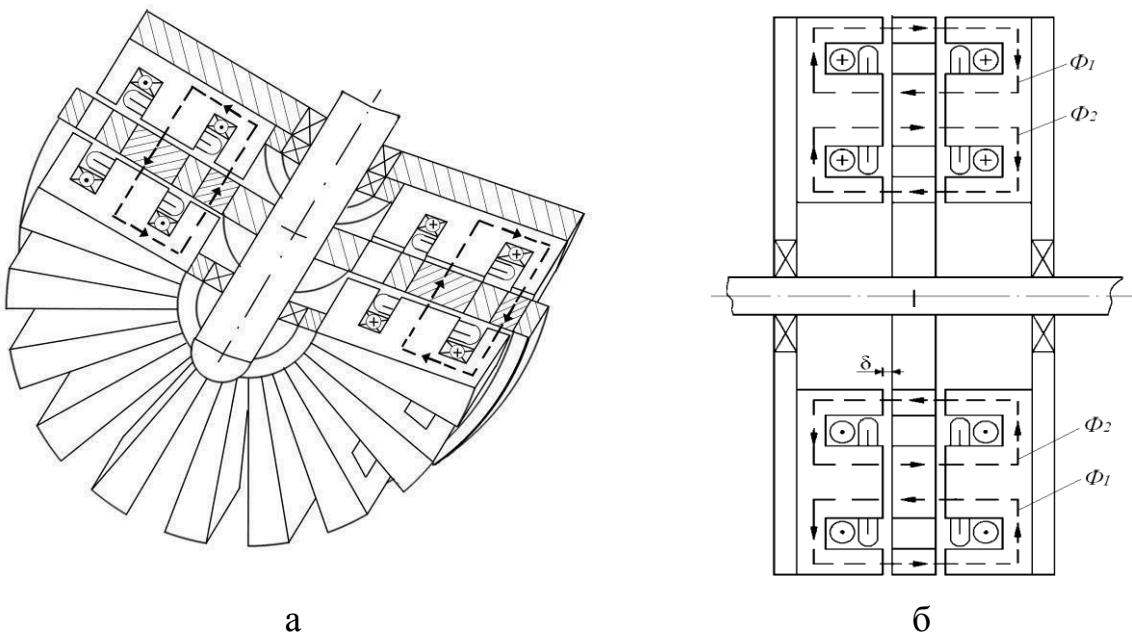


Рис.2.7. Торцева електрична машина постійного струму біндукторного типу: а – аксонометрія ; б – поздовжній розріз

Усі вище описані конструкції поєднує загальний конструктивний підхід, а саме, відсутність загального ярма. Це призводить до зниження магнітної

провідності магнітопроводу в поперечному напрямку, що, у свою чергу, приводить до послаблення реакції якоря і відмови від додаткових полюсів і компенсаційної обмотки. У такій конструкції полюси є цільними й не розбиваються на сегменти. Запропоновано і інше конструктивне рішення електричної машини постійного струму в циліндричному виконанні, статор якої приймається класичного виду (для МПС) із загальним ярмом і сегментованими полюсами. (рис. 2.8).

Надбанням такої конструкції є повне використання активної поверхні статора $K_{вик}=1$, вона не вимагає спеціальної конструкції обмотки якоря, у ній можна використовувати як хвильові, так і петльові обмотки, застосовувані в класичних машинах постійного струму.

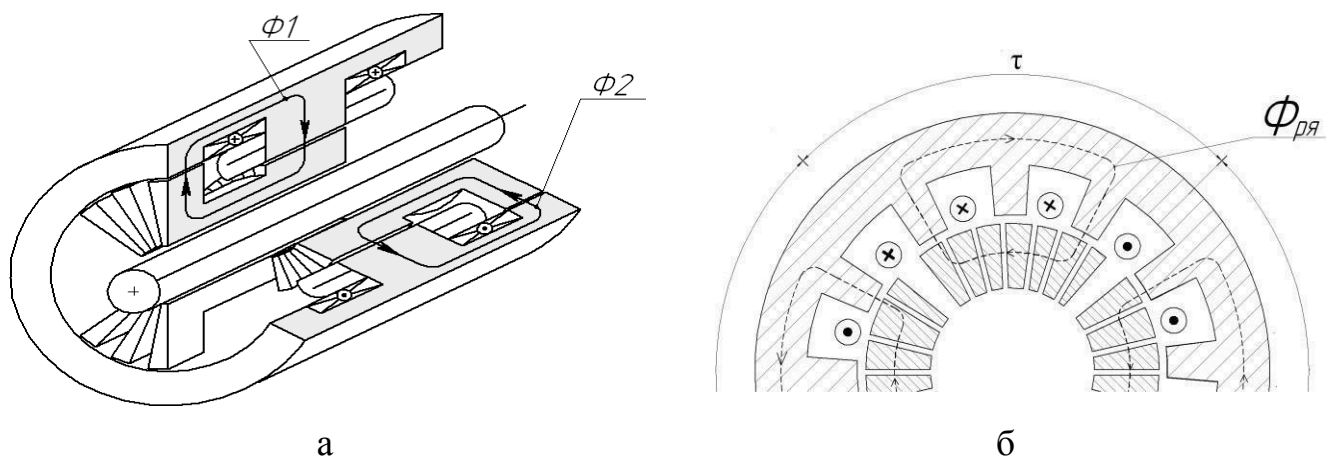


Рис.2.8. Генератор постійного струму бііндукторного типу з Г-подібними полюсами: а – аксонометрія; б – поздовжній розріз

2.2 Порівняння основних показників торцевих і циліндричних ГПСБР

Як було показано у підрозділі 1.3, існують два засоби одержання високого ККД у низькошвидкісній електричній машині:

- зменшення густини струму обмотки якоря j_a ;
- збільшення діаметра статора D_a .

На рис. 2.9 і 2.10 показана динаміка зміни ККД і маси обмотки якоря генератора постійного струму з безобмотковим ротором торцевого типу потужністю 20 кВт на швидкостях 200, 500, 750 і 1000 об/хв для двох засобів одержання високого ККД.

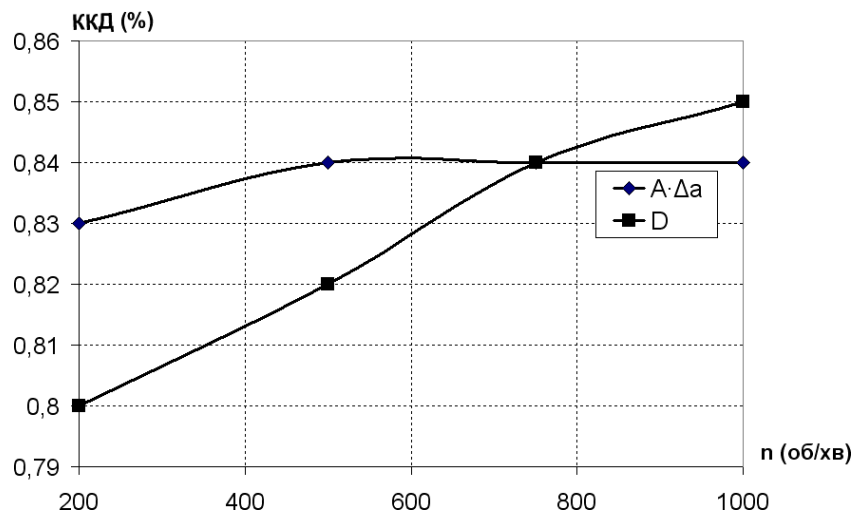


Рис. 2.9. Розрахункові залежності ККД від швидкості обертання

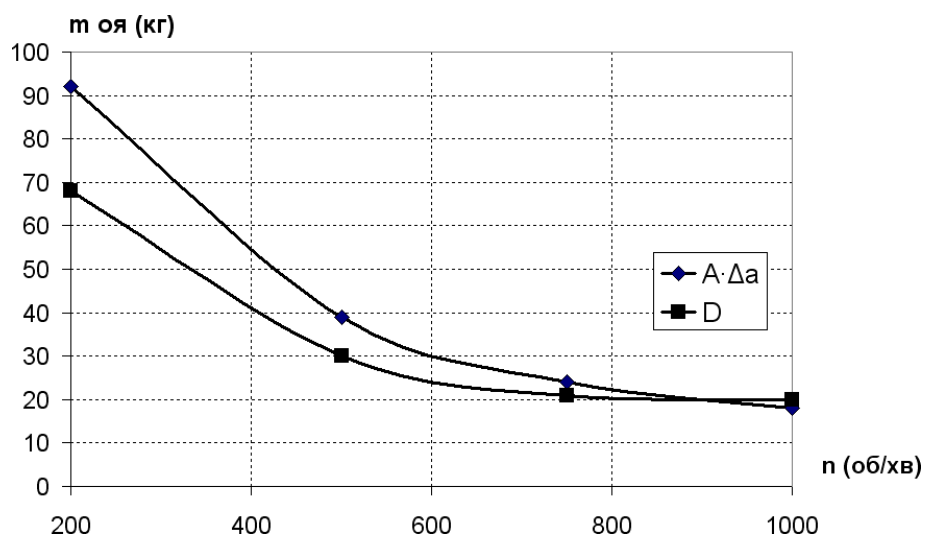


Рис. 2.10. Розрахункові залежності маси обмотки якоря від швидкості обертання

Як видно з аналізу залежностей збільшення густини струму в обмотці якоря дає більш високий ККД (рис. 2.9) але при цьому маса обмотки якоря суттєво зростає (рис. 2.10). Тому такий підхід більш прийнятний для генераторів торцевого типу, що мають велике відношення діаметра до довжини ℓ_δ . Збільшення маси обмотки якоря та, відповідно, висоти паза магнітопроводу приводить до незначного збільшення довжини торцевого генератора, мало позначаючись на його діаметрі. Тому збільшення маси такого генератора відносно невелике.

Для циліндричного ГПСБР переважно йти по другому шляху, збільшуючи його діаметр. Збільшення діаметра генератора при незмінних значеннях електромагнітних навантажень приводить до збільшення числа витків секції обмотки якоря й, відповідно, до зростання втрат. Однак ця залежність не пропорційна, що підтверджується наступними розрахунками.

Для високошвидкісної електричної машини напруга U_n , підведена до ланцюга якоря, визначається вираженням

$$U_n^{BIII} = \alpha_\delta \cdot B_\delta \cdot \ell_\delta \cdot V^{BIII} \cdot N_a^{BIII} + j_a \cdot \rho_r \cdot \ell_n \cdot N_a^{BIII}, \quad (2.19)$$

для низькошвидкісної

$$U_n^{HIII} = \alpha \cdot B_\delta \cdot \ell_\delta \cdot V^{HIII} \cdot N_a^{HIII} + j_a \cdot \rho_r \cdot \ell_n \cdot N_a^{HIII}, \quad (2.20)$$

де α_δ - коефіцієнт полюсного перекриття, B_δ - магнітна індукція в робочому повітряному проміжку, ℓ_δ - активна довжина провідника, $V^{ВШ}$ $V^{НШ}$ - лінійна швидкість обертання високошвидкісного або низькошвидкісного ротора, $N_a^{ВШ}$ $N_a^{НШ}$ - число провідників паралельної гілки високошвидкісної й низькошвидкісної обмотки якоря, j_a - густина струму в обмотці якоря, ρ_r - питомий опір міді, ℓ_n - довжина напіввитка.

Розділивши (2.19) на (2.20) і зробивши прості перетворення, одержимо

$$N_a^{НШ} = N_a^{ВШ} \frac{1 + k \cdot V^{ВШ}}{1 + k \cdot V^{НШ}}, \quad (2.21)$$

де $k = \frac{\alpha_\delta \cdot B_\delta \cdot \ell_\delta}{j_a \cdot \rho_r \cdot \ell_n}$ - коефіцієнт перетворення.

На рис. 2.14 показані розрахункові залежності внутрішнього діаметра статора D_a і числа провідників паралельної гілки обмотки якоря N_a від лінійної швидкості V ГПСБР $P_n = 20 \text{ кВт}$, $U_n = 220 \text{ В}$, $V = 14,86; 12,32; 10,32; 6,75 \text{ м/с}$;

ККД відповідно 85, 84, 82, 80 %, активній довжині провідника $\ell_\delta = 5,7 \text{ см}$, питомому зусиллі $F' = 2,9 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$, факторові нагрівання $A \cdot j_a = 2880 \text{ А/см} \cdot \text{А/мм}^2$, коефіцієнті лобових частин $K_{л.ч.} = 3,1$.

Різниця між співвідношеннями $\frac{N^{НШ}}{N^{ВШ}} = \frac{1248}{720} = 1,7$ й $\frac{V^{ВШ}}{V^{НШ}} = \frac{14,86}{6,75} = 2,2$ становить 23%.

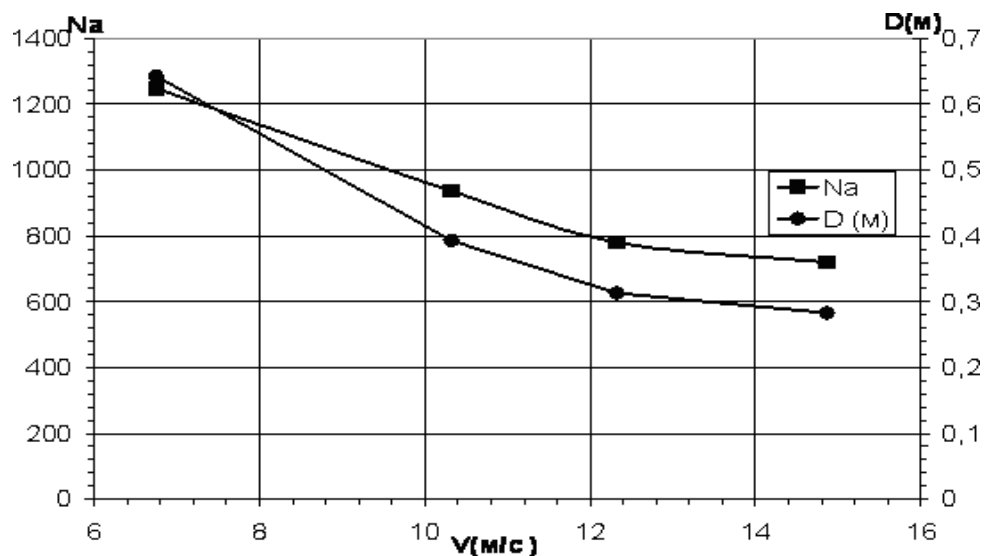


Рис. 2.11. Розрахункова залежність D_a і N_a від лінійної швидкості якоря

Аналізуючи вираз (2.21) і отримані співвідношення, можна дійти висновку, що зменшенню швидкості генератора не відповідає пропорційне збільшення числа провідників обмотки якоря, що пояснюється наявністю великого падіння напруги в ланцюзі якоря низькошвидкісного генератора.

При проектуванні будь-якої електричної машини основні зусилля проектувальників, як правило, спрямовано на прагнення одержати менший об'єм якоря при заданій потужності й швидкості обертання. Для досягнення цього результату проектувальники змушені підвищувати питоме тягове зусилля за рахунок збільшення електромагнітних навантажень A і B_δ . Однак збільшення електромагнітних навантажень обмежене низкою факторів.

Індукцію в робочому повітряному проміжку B_δ необхідно обмежувати тому, що з її збільшенням росте індукція в зубцях. У результаті чого збільшується магнітний опір зубцевого шару й, як наслідок, збільшується МРС, необхідна для проведення магнітного потоку не тільки через проміжок, але й через зубцевий шар. Це приводить до росту маси міді обмотки збудження та збільшенню втрат. Крім цього, при виборі величини B_δ для ГПСБР необхідно враховувати, що в даній електричній машині коефіцієнт використання статора залежно від конструктивної схеми рівний $K_{\text{вик}}=0,5\div 0,67$, внаслідок чого збільшується активна довжина провідника, а отже, і довжина середньої магнітної силової лінії.

Для вироблення рекомендацій по значенням індукції в робочому повітряному проміжку B_δ і індукції в зубцях B_z , при яких ГПСБР отримують мінімум маси і максимум ККД, були проведені порівняльні розрахунки торцевого та циліндричного ГПСБР з параметрами $P_n=3\text{кВт}$, $U_n=280\text{В}$, $n=400$ об/хв. Значення магнітної індукції в робочому повітряному проміжку приймалися рівними $B_\delta=0,5; 0,65; 0,8$ Тл. Значення індукції в зубцях приймалися $B_z=1,1; 1,3; 1,5; 1,7$ Тл.

Результати розрахунків ГПСБР по масі і ККД для $B_\delta = 0,8\text{Тл}$ представлені на рис. 2.12 і рис. 2.13. Аналіз залежностей з точки зору оптимальності маси і

ККД дозволяє рекомендувати для обох конструкції наступні значення індукції:

$$B_{\delta}=0,8 \text{ Тл}, B_z=1,5 \div 1,7 \text{ Тл}.$$

Відносно мале значення індукції в зубцях пояснюється великим впливом висоти і ширини обмотки збудження на ККД та загальну масу машини. Так, при $B_z=1,7 \text{ Тл}$ ККД знаходиться в межах 72-70% а маса 74-66 кг, при $B_z=2 \text{ Тл}$ ККД знаходиться в межах 69-60% при масі 77 кг

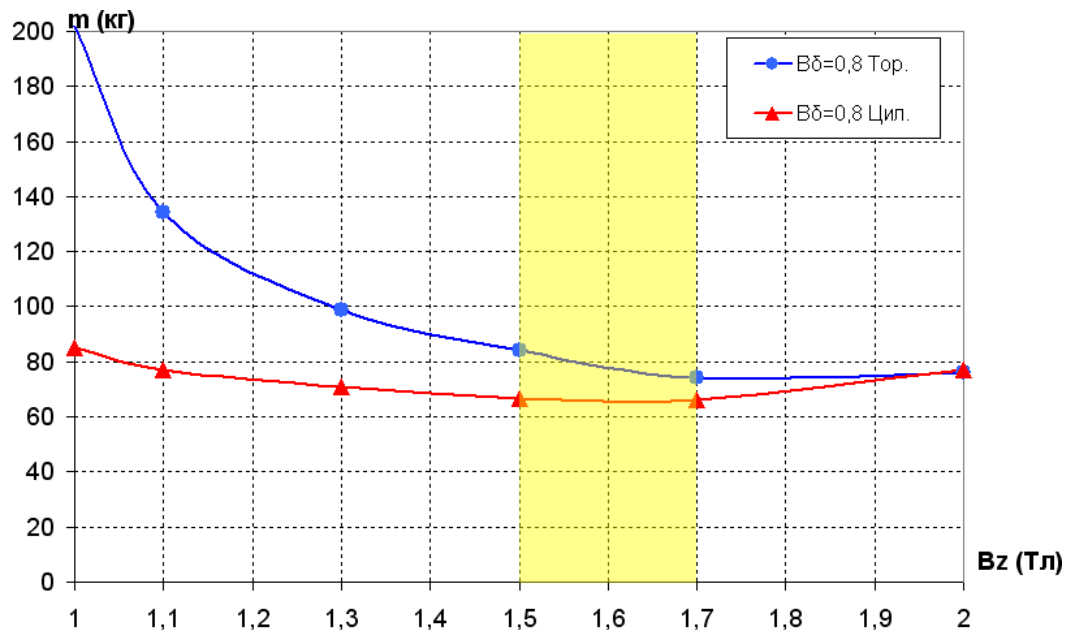


Рис. 2.12. Залежність маси ГПСБР від магнітної індукції в зубцях

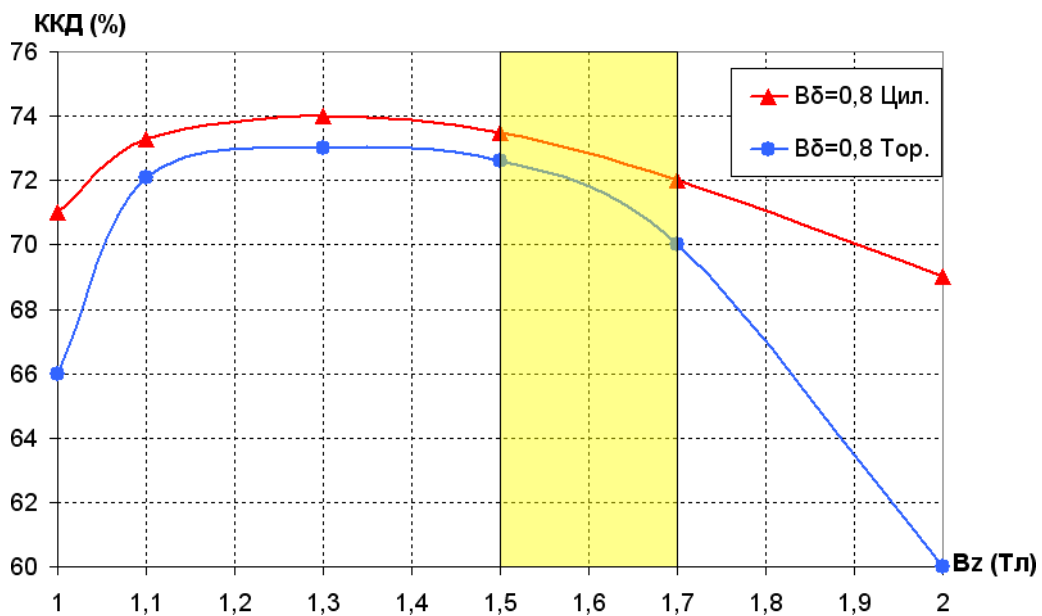


Рис. 2.13. Залежність ККД ГПСБР від магнітної індукції в зубцях

Результати аналізу показують, що для низьких обертів кращими за масою і ККД є циліндричні ГПСБР. Тому даний генератор постійного струму з безобмотковим ротором циліндричного типу є найкращим для використання в складі ВЕУ.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОПЕРЕЧНОЇ РЕАКЦІЇ ЯКОРЯ НА МАГНІТНЕ ПОЛЕ ГЕНЕРАТОРА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З БЕЗОБМОТКОВИМ РОТОРОМ

3.1. Потоки розсіювання у ГПСБР

У підрозділі 2.1 показано, що конструкція ГПСБР являє собою топологічне перетворення лінійного двигуна постійного струму (ЛДПС) в обертовий аналог. Як і в ЛДПС, у ГПСБР можна виділити схожі потоки розсіювання, тому частина рекомендацій з вибору оптимальної геометрії магнітної системи, викладених у роботах, може бути використана й при проектуванні ГПСБР.

У ГПСБР можна виділити три магнітні потоки розсіювання, що значною мірою впливають на конструктивні параметри:

- потік розсіювання між внутрішніми поверхнями магнітопроводів статора $\Phi_{см}$;
- потік розсіювання лобових частин $\Phi_{лоб}$;
- потік розсіювання полюсних проміжків $\Phi_{ст}$.

Усі ці магнітні потоки поєднує те, що вони замикаються уздовж шляху основного магнітного потоку, тому їх можна віднести до типу поздовжніх полів розсіювання.

У ГПСБР циліндричного типу є й поперечний потік розсіювання між полюсами центрального статора.

Потік розсіювання між внутрішніми поверхнями магнітопроводів статора $\Phi_{см}$ відповідає потоку розсіювання основних полюсів класичної машини постійного струму. Для ГПСБР це потік між внутрішніми поверхнями магнітопроводів статора, який замикається односпрямовано з основним магнітним потоком Φ_{δ} (рис.3.1,а,б). На рис. 3.2 а, б, в, г наведена розрахункова область ГПСБР, аналогічна розрахунковій області ЛДПС, генерована

пакетом ELCUT версії 4.1 для моделювання потоку розсіювання $\Phi_{\sigma M}$ для трьох значень відносного співвідношення відстані між магнітопроводами якоря α до ширини повітряного проміжку δ . При цьому ширина повітряного проміжку δ і довжина активної частини магнітопроводу якоря l_δ залишались незмінними.

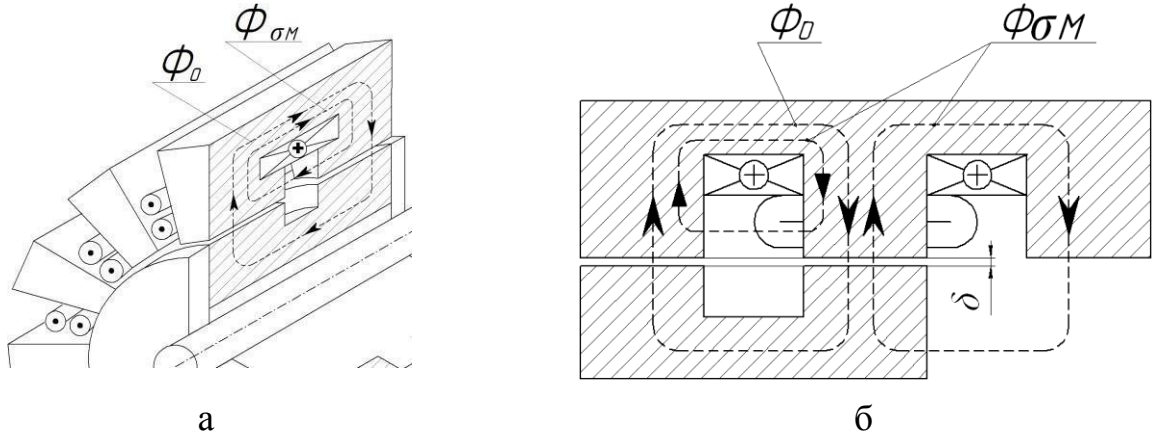


Рис. 3.1. Поздовжні потоки розсіювання між внутрішніми поверхнями магнітопроводів $\Phi_{\sigma M}$ у ГПСБР: а – індукторного типу; б – бііндукторного типу

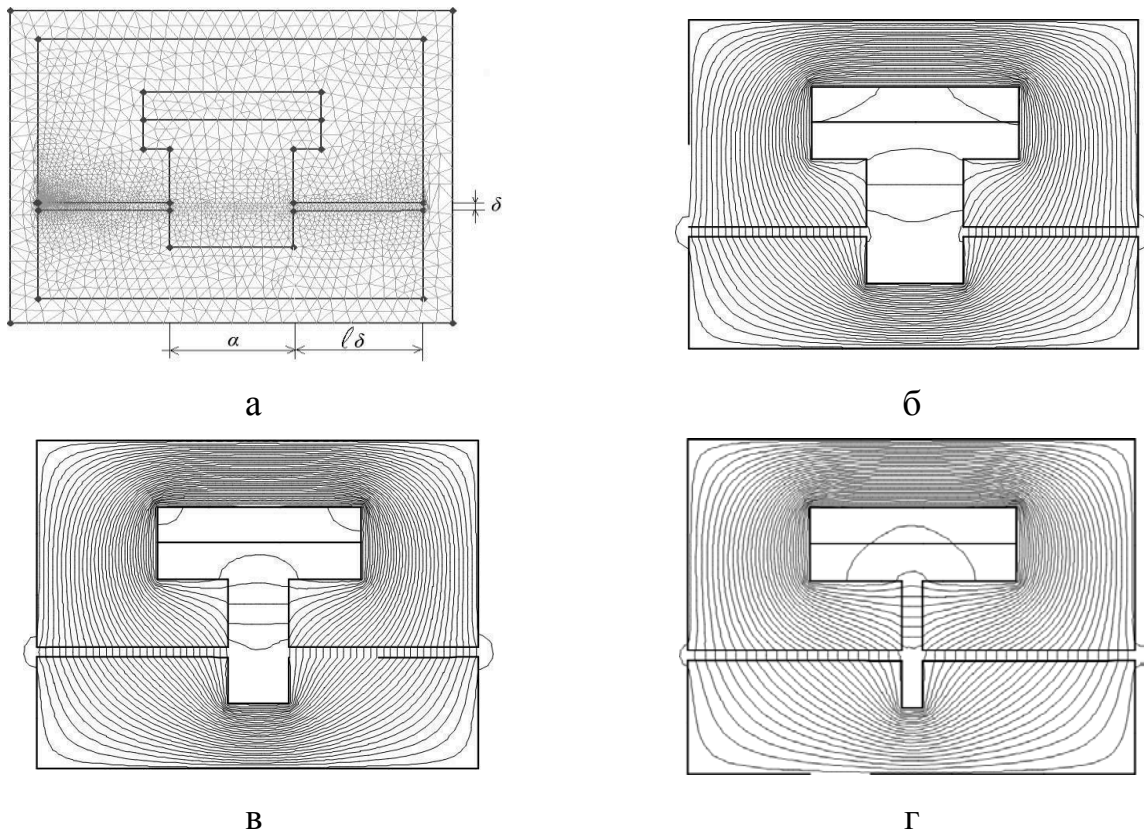


Рис. 3.2. Магнітне поле ГПСБР

а – розрахункова область; б - $\frac{\alpha}{\delta} = 22,5$; в - $\frac{\alpha}{\delta} = 12,5$; г - $\frac{\alpha}{\delta} = 5$

Аналіз залежностей показує, що по мірі зменшення відстані між магнітопроводами якоря до значення $\alpha = 12,5\delta$, зменшення індукції в робочому повітряному проміжку δ і, відповідно, збільшення її між магнітопроводами α , перебуває в припустимих межах, що ілюструє залежність відсоткового значення потоку розсіювання (рис.3.3)

$$\Phi_{\sigma\text{М}} \% = \frac{\Phi_{\sigma\text{М}}}{\Phi_{\delta} + \Phi_{\sigma\text{М}}} \cdot 100$$

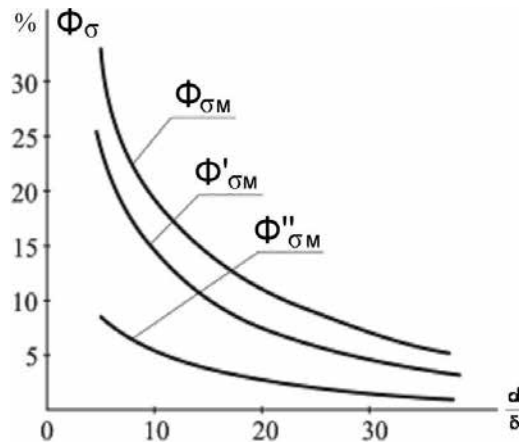


Рис. 3.3. Залежність величини потоку розсіювання і його складових від відносного значення $\frac{\alpha}{\delta}$

На рис. 3.3 показані складові $\Phi_{\sigma\text{М}}$:

$\Phi'_{\sigma\text{М}}$ – потік розсіювання в зоні розташування обмоток збудження;

$\Phi''_{\sigma\text{М}}$ – потік розсіювання безпосередньо між виступами магнітопроводів.

Помітно, що при $\alpha / \delta = 12,5$ потік $\Phi_{\sigma\text{М}} = 16, 2\%$. Однак, по мірі подальшого зменшення α / δ , починають різко зростати як значення $\Phi'_{\sigma\text{М}}$, так і $\Phi''_{\sigma\text{М}}$.

Наприклад, при $\alpha / \delta = 5$ величина потоку розсіювання зростає до 33,4 %.

Аналізуючи отримані результати, можна зробити наступні висновки:

- вибір відстані між магнітопроводами якоря ГПСБР більш 20δ практично не впливає на магнітні характеристики генератора й тільки збільшує витрати активних матеріалів;
- при значенні величини α менш 10δ індукція в робочому повітряному

проміжку $B\delta$ зменшується, що приводить до відповідного зменшення моменту ГПСБР. Компенсація ж потоку $\Phi_{\sigma m}$ для одержання заданого значення індукції

$B\delta$ приводить до необґрунтованої витрати міді в обмотці збудження;

- оптимальною відстанню між магнітопроводами якоря слід уважати значення рівне $(15...20)\delta$.

Експериментальні дослідження показали, що перераховані вище рекомендації, прийняті для проектування лінійних двигунів, повністю застосовні й для проектування їх обертальних аналогів.

Потік розсіювання лобових частин $\Phi_{\sigma l}$ (рис.3.4,а,б) також належить до поздовжнього типу і зустрічно замикається по шляху основного магнітного потоку Φ_{δ} . Однак МРС F_0 і F_l мають приблизно один порядок. При моделюванні в ELCUT джерела поля задавалися через густину струму. У ГПСБР торцевого виконання густина струму обмотки збудження рівна $J_{ov} = 1343634 \text{ A м}^2$, густина струму лобових частин обмотки якоря, обумовлена як відношення повного струму всіх пазів, перекритих полюсом, до площі лобових частин рівна $J_{lob} = 1995893 \text{ A м}^2$. Розбіжність становить 32%. Для циліндричного ГПСБР $J_{ov} = 1600000 \text{ A/м}^2$, $J_{lob} = 759000 \text{ A/м}^2$ розбіжність становить 47%.

Тому виникає необхідність вживати спеціальних заходів, щодо обмеження або усунення поля лобових частин. Інакше це може призвести до значних пульсацій повного потоку електричного генератора.

Для обмеження потіка розсіювання лобових частин був запропонований спосіб усунення пульсуючого потоку лобових частин зсувом провідників секції обмотки якоря одного статора стосовно іншого статора на величину полюсного розподілу τ (рис.3.5). Такою мірою забезпечується компенсація магніторушійної сили струмів лобових частин обмотки якоря за рахунок зустрічного напрямку цих струмів. У результаті забезпечується значне ослаблення пульсуючого магнітного потоку $\Phi_{\sigma l}$, струмів лобових частин обмотки якоря на шляху основного магнітного потоку Φ_{δ} .

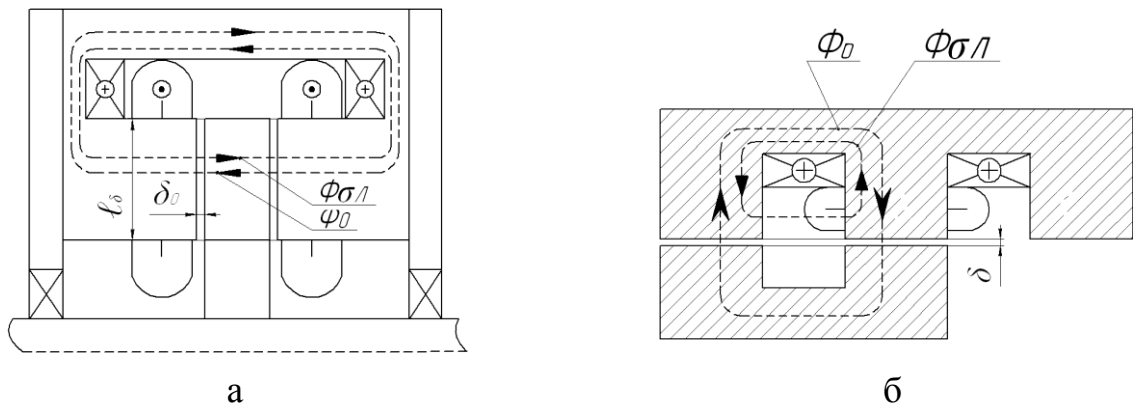


Рис. 3.4. Потік розсіювання лобових частин $\Phi_{\sigma л}$ у ГПСБР: а – індукторного типу; б – бііндукторного типу

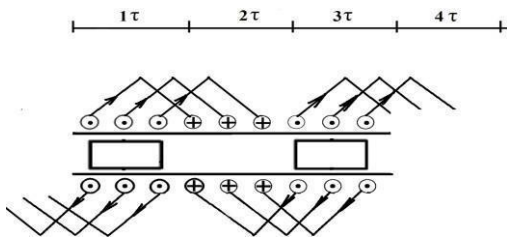


Рис. 3.5. Зсув провідників у торцевій ГПСБР індукторного типу

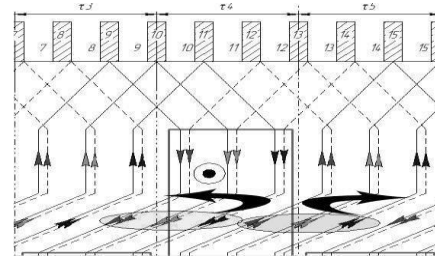


Рис. 3.6. Зсув провідників у циліндричній ГПСБР

У ГПСБР циліндричного типу для компенсації поля лобових частин також проводиться зсув якірних секцій (рис.3.6). У результаті дві групи провідників створюють магнітні поля однієї величини, але різної спрямованості, що приводить до їхньої взаємної компенсації.

Потік розсіювання полюсних проміжків $\Phi_{\sigma п}$ (рис.3.7,а) також належить до поздовжнього типу і є характерним тільки для розглянутих ГПСБР. Він проходить паралельно основному магнітному потоку через проміжки між полюсами. З рис.3.7,б видно, що при однаковому напрямку потоків Φ_0 і $\Phi_{\sigma п}$, на провідники обмотки якоря, що лежать у зоні дії останнього, будуть діяти електромагнітні сили, створюючи гальмовий момент, спрямований зустрічно напрямку обертання.

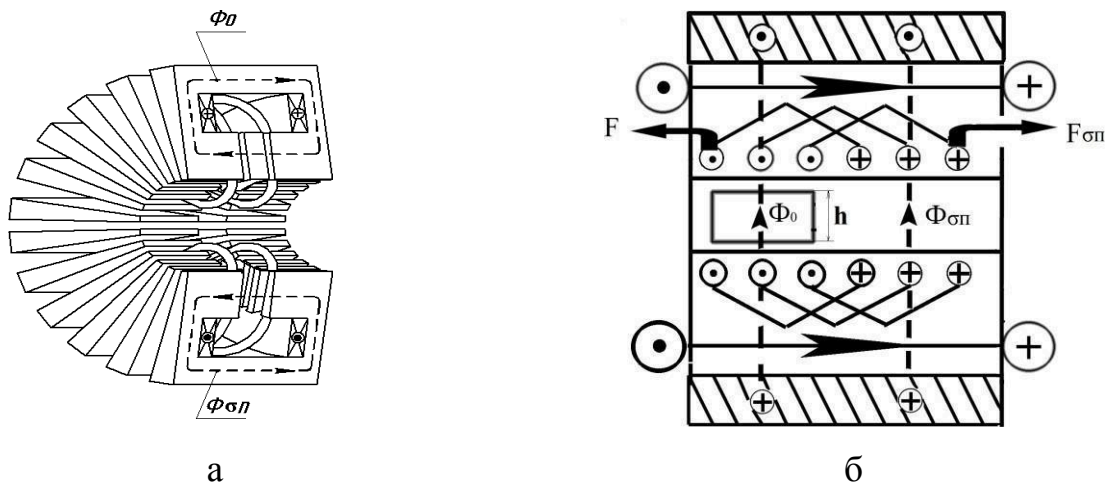


Рис. 3.7. Поздовжні потоки розсіювання полюсних проміжків $\Phi_{\sigma m}$ у торцевому ГПСБР індукторного типу: а – аксонометрія; б – схема створення гальмового моменту

Потік розсіювання $\Phi_{\sigma m}$ можна суттєво послабити, задавшись рекомендованим значенням ширини полюса $h = (15 \div 20)\delta$, тим самим зменшивши величину магнітної провідності ділянок магнітопроводу, не перекритих полюсами.

Поперечний потік розсіювання між полюсами центрального статора $\Phi_{\sigma s}$ (рис. 3.8,а) є характерним тільки для бііндукторного ГПСБР циліндричного типу.

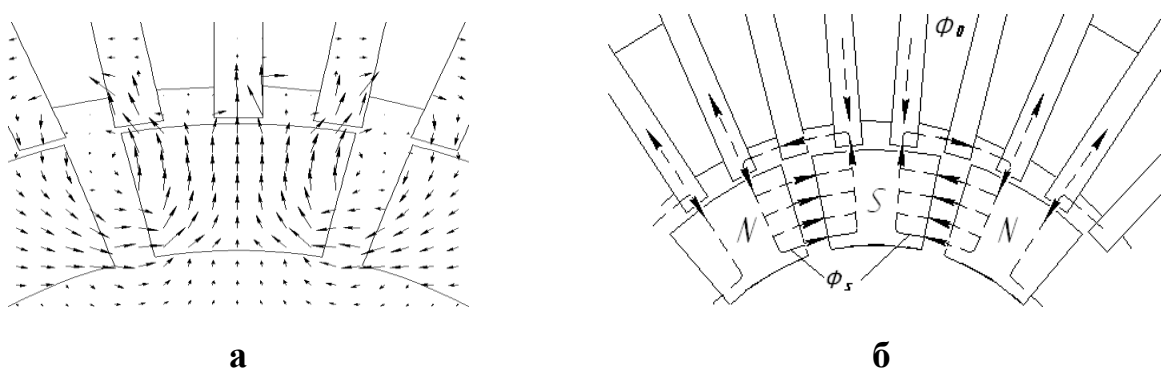


Рис. 3.8. Поперечний потік розсіювання між полюсами центрального статора $\Phi_{\sigma s}$ бііндукторного ГПСБР циліндричного типу: а – розподіл векторів; б – схема ослаблення основного магнітного потоку

Потік $\Phi_{\sigma s}$ замикається по коронках зубців через сусідні полюси та спрямований зустрічно основному магнітному потоку Φ_0 (рис.3.8,б). Експериментально встановлено, що при коефіцієнті полюсного перекриття рівному $\alpha_\delta=0,8$ із за дії потоку розсіювання $\Phi_{\sigma s}$ величина основного магнітного потоку Φ_0 зменшилася на 30%. Іншими словами величина коефіцієнта розсіювання в дослідному зразку рівна $k_s = 1 + \frac{\Phi_s}{\Phi_0} = 1,3$. Розрахунки показали, що величину коефіцієнта розсіювання k_s можна зменшити до $1,2 \div 1,25$, прийнявши $\alpha_\delta=0,55 \div 0,6$ і зробивши повітряний проміжок між полюсами розбіжним до низу.

3.2. Поперечна реакція якоря та засоби зменшення її впливу на основне магнітне поле

Як відомо, зменшити реакцію якоря у машині постійного струму (МПС) можна двома способами: збільшивши повітряний проміжок на шляху потоку реакції якоря або створивши додаткову магніторушійну силу (МРС), спрямовану зустрічно МРС якоря.

Найбільший інтерес у плані підвищення ефективності конструкції МПС та її здешевлення викликає спосіб, пов'язаний з відмовою від компенсаційної обмотки. Відомо кілька конструктивних рішень, що дозволяють суттєво послабити поле реакції якоря шляхом зниження магнітної провідності магнітопроводу в поперечному напрямку.

Як приклад, можна розглянути конструкції мікродвигуна із друкованою обмоткою якоря (рис. 3.9) та тягового двигуна з безпазовим якорем (рис. 3.10). Незважаючи на різне виконання (торцеве та циліндричне), різний порядок потужностей (Вт і кВт), ці конструкції багато чого поєднують. Насамперед, це великий повітряний проміжок (немагнітний шар). У першому випадку це товщина немагнітного несучого диска й подвійна товщина друкованої міді, у другому випадку це розміщення обмотки не в пазах, а на циліндричній поверхні якоря.

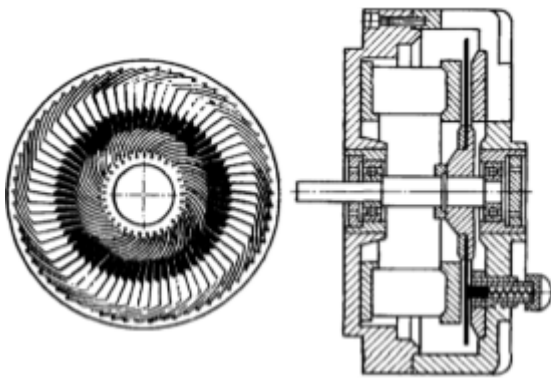


Рис. 3.9. Мікродвигун із друкованою обмоткою якоря

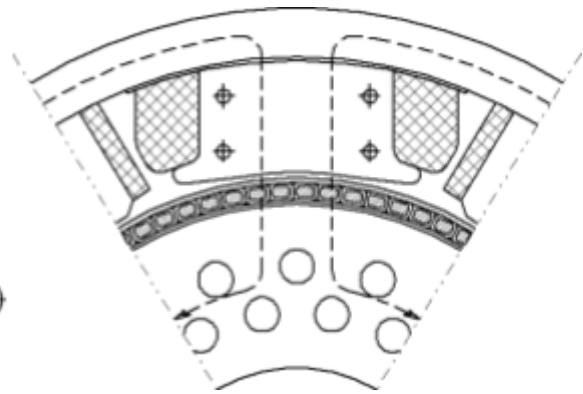


Рис. 3.10. Конструкція тягового двигуна з безпазовим якорем

Наявність великого немагнітного шару в даних конструкціях дозволяє зменшити реактивну ЕРС в $2,5 \div 3$ рази, відмовитися в тягових двигунах від компенсаційної обмотки, забезпечити високу перевантажувальну здатність, зменшити величину повітряного проміжку до мінімально технологічно можливого, підвищити значення лінійного струмового навантаження, обмежуючи його не умовами комутації, а по нагріванню. Однак наявність великого немагнітного шару приводить до необхідності в $1,3 \div 1,4$ рази збільшити МРС обмотки збудження, тим самим збільшивши габарити й масу двигуна. Крім цього, у міді якоря виникають підвищені втрати від вихрових струмів, суттєво збільшуючи її температуру.

Тому більш доцільно розглянути конструктивні рішення, що не вимагають збільшення робочого повітряного проміжку для обмеження поперечної реакції якоря.

Так, для лінійного двигуна постійного струму була запропонована конструкція індуктора (рис 3.11), яка має підвищений магнітний опір на шляху потоку поперечної реакції якоря.

На рис.3.11 позначені: 1 – індуктор лінійної машини постійного струму, набраний з окремих феромагнітних пластин; 2 – неферомагнітні прокладки; 3 - загальні феромагнітні прокладки, необхідні для більш рівномірного розподілу магнітного поля в робочому повітряному проміжку; b_{δ} – величина полюсного розподілу.

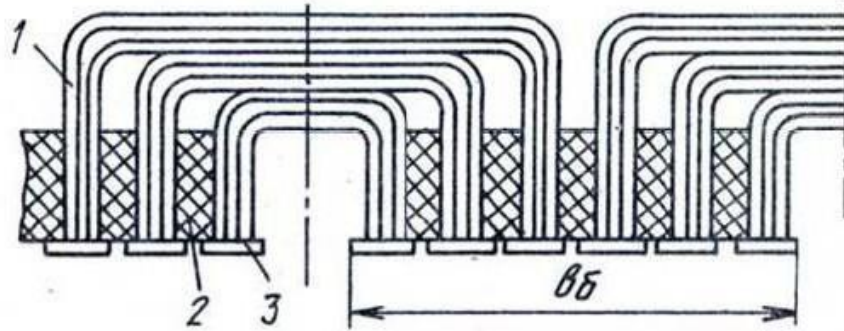
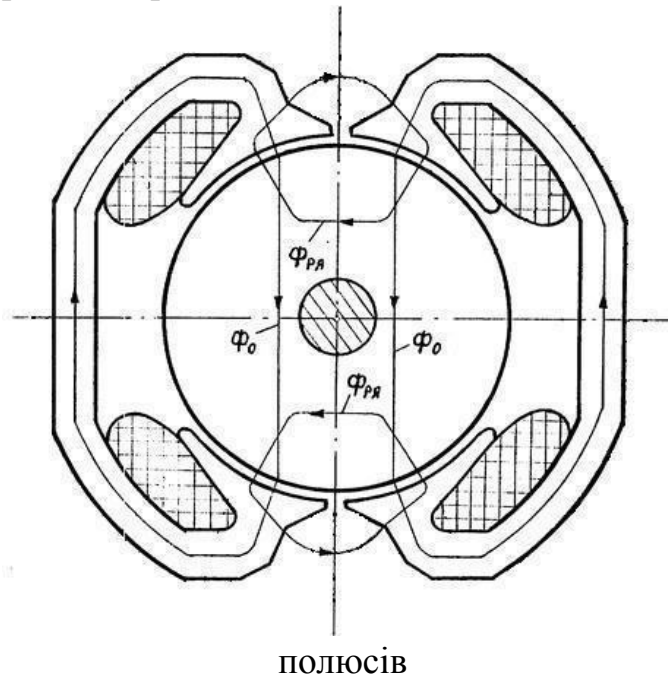


Рис 3.11. Індуктор машини постійного струму.

Для електричних машин малої потужності запропонована конструкція з анізотропією магнітних властивостей в області основних полюсів(рис. 3.12).

Рис. 3.12. Індуктор з анізотропією магнітних властивостей в області основних



У такій конструкції магнітопровід являє собою два магнітно-незв'язані контури, об'єднані обмотками збудження. Два основні магнітні потоки Φ_0 долають на своєму шляху два мінімально технологічно можливі повітряні проміжки, а потік реакції якоря $\Phi_{ря}$, крім двох робочих повітряних проміжків, змушений долати великий міжполюсний повітряний проміжок.

Експериментальні дослідження показали, що в такій конструкції величина магнітного потоку реакції якоря знижується в 2-3 рази.

Слід зазначити, що дана конструкція не може повністю реалізувати свій потенціал у низькошвидкісних машинах постійного струму. В такій конструкції виникає проблема розміщення великої кількості полюсів, необхідних для збільшення ККД низькошвидкісної МПС.

Усі конструкції ГПСБР, як циліндричного так і торцевого виконання, мають загальну конструктивну особливість: відкриті по обидва боки пази статора. Магнітна система такого генератора (рис. 3.13) складається з ряду магнітно-незв'язаних зубців П або Ш – подібної форми 1, між якими покладені секції обмотки якоря 2, обмотки збудження (на рис. не показана) і полюсів 3.

У такій конструкції зубець одночасно відіграє роль стінки паза висотою h_n і ярма висотою ℓ_2 (рис.3.14). Проаналізуємо, як впливає на МРС реакції якоря паз, відкритий по обидва боки.

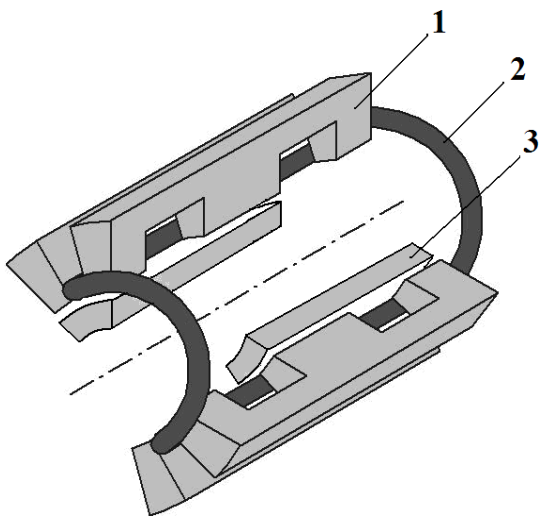


Рис. 3.13. Магнітна система ГПСБР

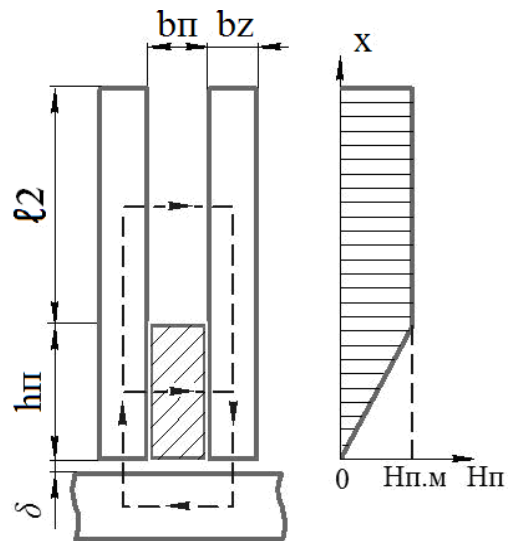


Рис. 3.14. Паз ГПСБР

Згідно закону повного струму для даного паза при $x > h_n$

$$2 \cdot H_{\delta} \cdot \delta + H_{nm} \cdot b_n = I_n, \quad (3.1)$$

де H_{δ} – напруженість поля в робочому повітряному проміжку;

δ – повітряний проміжок;

H_{nm} – максимальне значення напруженості поля в пазу;

b_n – ширина паза.

Величина напруженості поля в робочому повітряному проміжку визначається потоком Φ_1 на ділянці $x = 0 \dots h_n$ і потоком Φ_2 на ділянці $h_n \dots (h_n + \ell_2)$

$$\Phi_1 = \mu_0 \cdot \frac{H_{nm}}{2} \cdot h_n \cdot \ell_\delta,$$

$$\Phi_2 = \mu_0 \cdot H_{nm} \cdot \ell_2 \cdot \ell_\delta.$$

Тоді результуючий магнітний потік у робочому повітряному проміжку буде

$$\Phi_\delta = \Phi_1 + \Phi_2 = \mu_0 \cdot H_{nm} \cdot \ell_\delta \cdot \left(\frac{h_n}{2} + \ell_2 \right).$$

Напруженість поля в робочому повітряному проміжку

$$H_\delta = \frac{\Phi_\delta}{\mu_0 \cdot S} = \frac{\Phi_\delta}{\mu_0 \cdot b_n \cdot \ell_\delta} = H_{nm} \cdot \left(\frac{h_n}{2 \cdot b_n} + \frac{\ell_2}{b_n} \right)$$

Звідси максимальне значення напруженості поля в пазу

$$H_{nm} = \frac{H_\delta}{\left(\frac{h_n}{2 \cdot b_n} + \frac{\ell_2}{b_n} \right)}. \quad (3.2)$$

Підставляючи вираження (3.1) в (3.2), отримаємо

$$2 \cdot H_\delta \cdot \delta + H_\delta \cdot \frac{b_n}{\left(\frac{h_n}{2 \cdot b_n} + \frac{\ell_2}{b_n} \right)} = I_n.$$

Підсумкова напруженість поля в робочому повітряному проміжку визначається формулою

$$H_\delta = \frac{I_n}{b_n} = \frac{I_n}{2 \cdot \delta + \frac{b_n}{\left(\frac{h_n}{2 \cdot b_n} + \frac{\ell_2}{b_n} \right)}} = 2 \cdot \delta \cdot K,$$

де $K = 1 + \frac{\left(\frac{b_n^2}{h_n^2} + \ell^2 \right)}{2 \cdot \delta \cdot \left(\frac{2 \cdot b}{z} \quad b \right)}$ коефіцієнт зменшення напруженості поля.

У класичній МПС $H_\delta = \frac{n}{2 \cdot \delta}$, а в ГПСБР $H_\delta = \frac{n}{2 \cdot \delta \cdot K}$.

Якщо умовно прийняти значення $\delta = 2 \text{ мм}$, $b_n = bz = 3 \text{ мм}$, $h_n = 10 \text{ мм}$,

$$\ell_2 = 40 \text{ мм, то } K = 1 + \frac{\left(\frac{0,03}{0,1} + \frac{0,4}{2 \cdot 0,03} \right)}{2 \cdot 0,002} = 1,5.$$

Величина напруженості поля в робочому повітряному проміжку стала в 1,5 рази менше, чим у звичайній МПС, а перевантажувальна здатність такої електричної машини зростає. Якщо в розглянутому прикладі зменшити величину повітряного проміжку ГПСБР до 1мм, ми одержимо рівні значення $H_{\delta\text{ГПСБР}} = H_{\delta\text{МПС}}$, але при цьому МРС обмотки збудження ГПСБР стане у два рази менше. Таким чином, на основі попереднього аналізу можна виділити низку питань, що вимагають досконалого розгляду для ГПСБР: перевантаження по струму та вплив величини робочого повітряного проміжку на реакцію якоря.

РОЗДІЛ 4

ОСНОВИ ПРОЕКТУВАННЯ ГЕНЕРАТОРІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З БЕЗОБМОТКОВИМ РОТОРОМ

4.1 Вибір геометричних співвідношень у циліндричних генераторах

Конструкція циліндричного ГПСБР складається з 3 статорів (рис. 4.7) із загальною обмоткою якоря й двома обмотками збудження. У якості основного критерію для вибору оптимальних значень геометричних співвідношень було прийняте співвідношення $\lambda = \ell'_\delta / D_a$ між довжиною $\ell'_\delta = 3 \ell_\delta$ та діаметром D_a якоря.

Для вироблення рекомендацій по значеннях λ , при яких циліндричний ГПСБР отримає мінімум маси і максимум ККД, були проведені розрахунки ГПСБР з параметрами $P_n = 3 \text{ кВт}$, $U_n = 280 \text{ В}$, $n = 400 \text{ об/хв}$ при прийнятих значеннях магнітної індукції в робочому повітряному проміжку $B_\delta = 0,8 \text{ Тл}$, індукції в зубцях $B_z = 1,6 \text{ Тл}$ та $\lambda = 0,5; 1,0; 1,5$.

Аналіз залежностей (рис.4.8) і (рис.4.9) з точки зору оптимальності маси і ККД дозволяє рекомендувати значення співвідношення $\lambda = 0,9-1,1$.

Величина діаметра якоря D_a циліндричного ГПСБР визначається виходячи з повної електромагнітної потужності генератора попередньо визначеної по відомому виразу:

$$P_{em} = \frac{1+\eta}{2 \cdot \eta} \cdot P_n$$

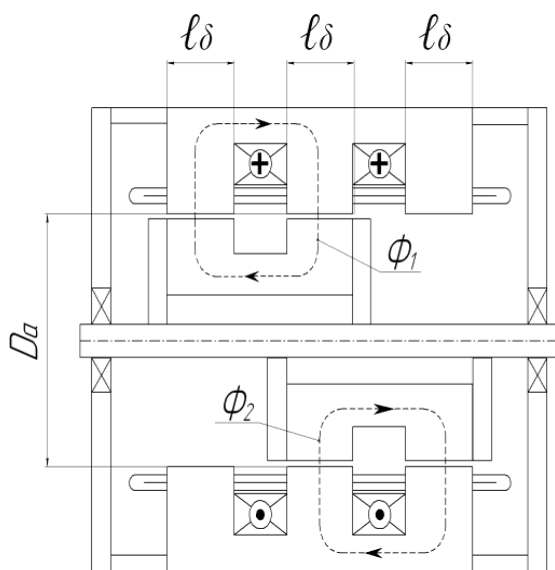


Рис. 4.1. Конструкція циліндричного ГПСБР

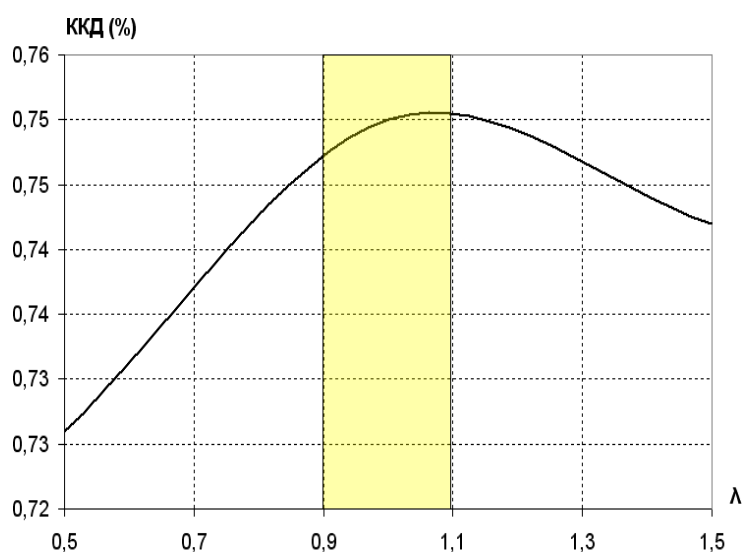


Рис. 4.2. Залежність ККД генератора від співвідношення λ

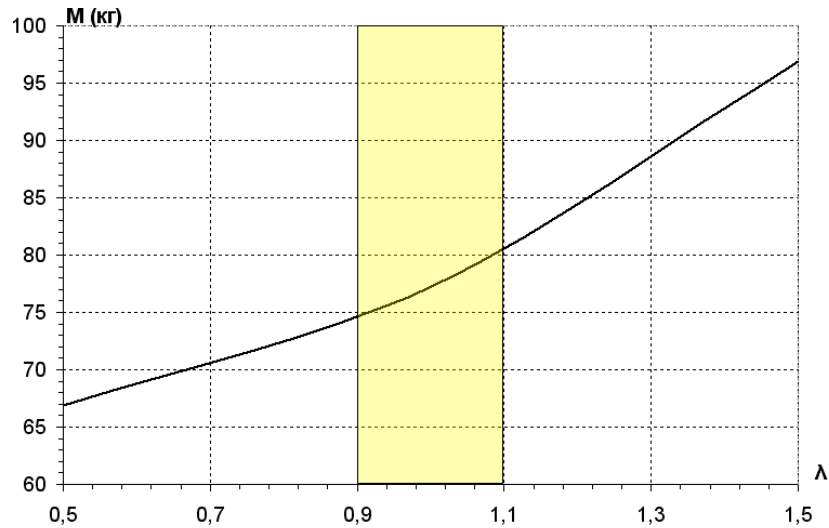


Рис. 4.3. Залежність маси генератора від співвідношення λ

Активна довжина якоря (рис. 4.7)

$$\ell'_\delta = \lambda \cdot D_a = K_{cm} \cdot \ell_\delta,$$

де $\lambda = \frac{\ell'_\delta}{D_a}$, D_a – діаметр якоря, K_{cm} – кількість статорів, ℓ_δ – активна довжина

провідника обмотки якоря одного статора.

Активна площа статора

$$S_a = K_{вук} \cdot \pi \cdot D_a \cdot \ell'_\delta = K_{вук} \cdot \pi \cdot D_a^2 \cdot \lambda. \quad (4.33)$$

Електромагнітна сила, створювана провідниками обмотки якоря

$$F_a = \alpha_\delta \cdot B_\delta \cdot A \cdot K_{вук} \cdot S_a = \alpha_\delta \cdot B_\delta \cdot A \cdot K_{вук} \cdot \pi \cdot D_a^2 \cdot \lambda = K \cdot D_a^2, \quad (4.34)$$

де $K_1 = \alpha_\delta \cdot B_\delta \cdot A \cdot K_{вук} \cdot \pi \cdot \lambda$.

Електромагнітний момент

$$M = F_a \cdot \frac{D_a}{2} = \frac{1}{2} \cdot K \cdot D_a^3 \quad (4.35)$$

Електромагнітну потужність циліндричного ГПСБР

$$P_{ем} = M \cdot \omega = \frac{1}{2} \cdot K \cdot D_a^3 \cdot \omega = 1,57 \cdot \alpha_\delta \cdot B_\delta \cdot A \cdot K_{вук} \cdot \lambda \cdot \omega \cdot D_a^3 \quad (4.36)$$

Вираження (4.36) дає можливість на попередньому етапі розрахунків знайти діаметр якоря циліндричного ГПСБР.

$$D_a = \sqrt[3]{\frac{P_{em}}{1,57 \cdot \alpha_{\delta} \cdot B_{\delta} \cdot A \cdot \lambda \cdot K_{вих} \cdot \omega}} \quad (4.37)$$

Знаючи λ і D_a можна знайти активну довжину провідника обмотки якоря $\ell_{\delta} = \lambda \cdot D_a$.

Для вибору оптимальних значень геометричних параметрів ГПСБР автором була розроблена програма, написана мовою програмування С# у середовищі Microsoft Visual Studio 2005 (рис.4.10).

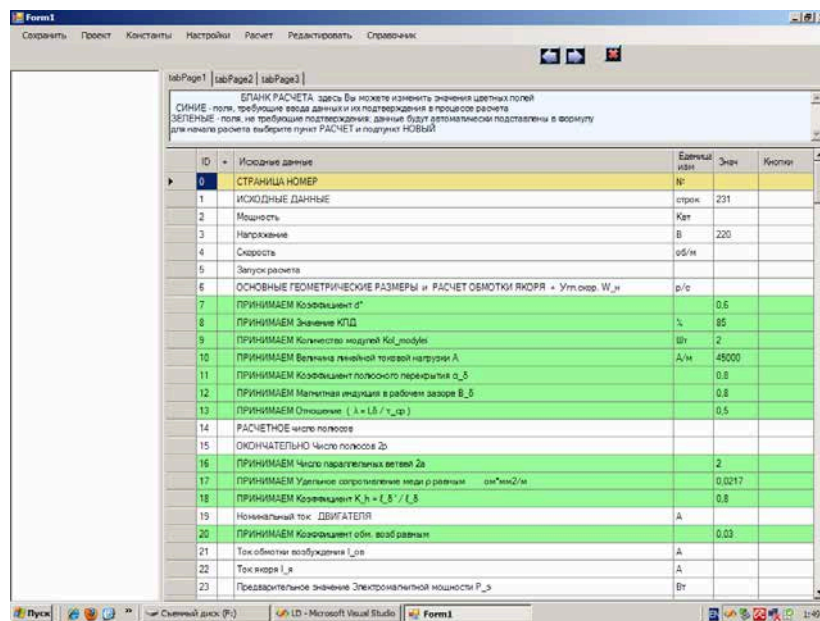


Рис. 4.4. Зовнішній вигляд діалогового вікна програми розрахунку ГПСБР.

Програма дозволяє, попередньо задавшись рядом обмежень і розрахункових параметрів, зробити повний інженерний розрахунок ГПСБР циліндричного або торцевого типу. За допомогою програми можуть бути розраховані генератори та двигуни постійного струму з безобмотковим ротором.

У процесі розрахунків програма автоматично вибирає перетин провідника, перевіряє геометрію, величину індукції й ряд інших показників.

У випадку, якщо вони виходять за межі обмежень, програма сигналізує про помилку. Програма дозволяє вносити зміни в розрахунки, міняючи будь-які значення, після чого створюється нова версія розрахунків.

4.2. Методика проектування низькошвидкісних генераторів

Початковими даними для проектування є:

- номінальна потужність генератора P_n (Вт);
- номінальна вихідна напруга U_n (В);
- номінальна швидкість обертання n_n (об/хв).

Методика проектування торцевого та циліндричного ГПСБР полягає в послідовному виконанні наступних етапів.

Етап 1. Вибір головних розмірів генератора.

1.1. Прийняти коефіцієнт використання магнітного потоку $K_{вик}$:

- для одноіндукторного торцевого ГПСБР $K_{вик}=0,5$;
- для двоіндукторного циліндричного ГПСБР $K_{вик}=0,66$.

1.2. Прийняти значення індукції в зубцях $B_z = 1,5 \div 1,7$ Тл.

1.3. Прийняти ККД по розрахунковій залежності ККД від P_n (кВт), представлений на рис.4.5.

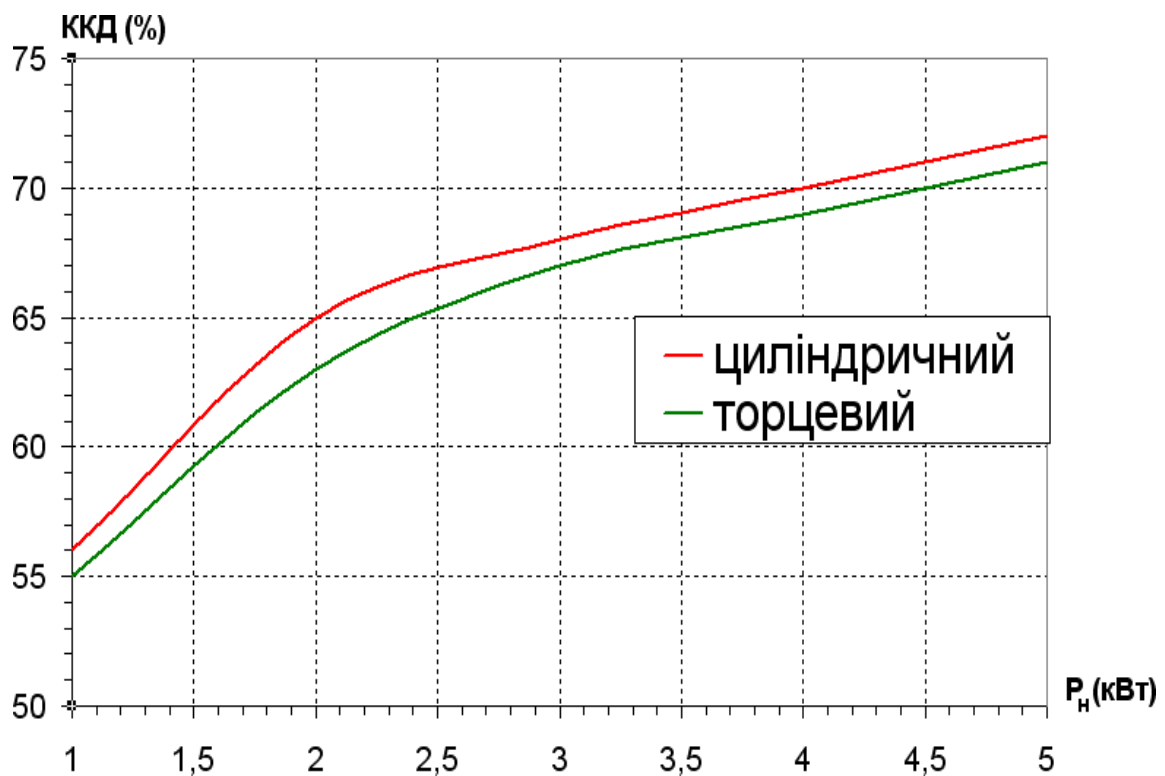


Рис. 4.5. Залежність ККД ГПСБР від потужності

1.4. За формулою $I_n = \frac{P_n}{U}$ визначити номінальний струм генератор

1.5. За формулою $P_e = \frac{1+\eta}{2\cdot\eta} \cdot P_n$ визначити повну електромагнітну

потужність циліндричного та торцевого ГПСБР та електромагнітну потужність одного статора ГПСБР $P_{em1} = \frac{P_e}{K_{cm}}$ де K_{cm} – кількість статорів.

1.6. По співвідношенню $\left. \frac{P_{em1}}{n} \right|$ (рис.4.6) або виразам (4.26)(4.36) знайти:

- для одноіндукторного торцевого ГПСБР більший діаметр статора D_2 ;
- для бііндукторного циліндричного ГПСБР діаметр якоря D_a .

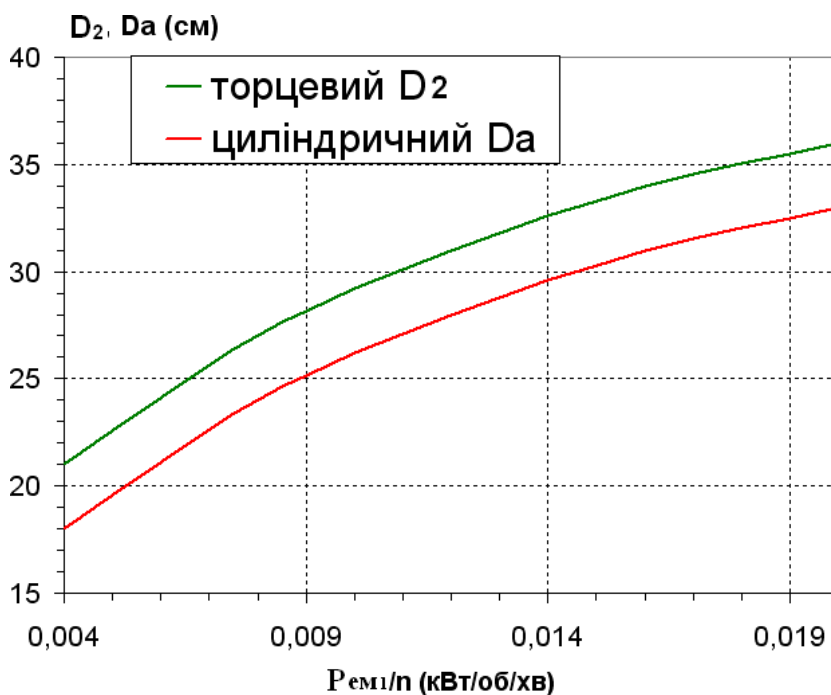


Рис. 4.6. Залежність $D^2 = f\left(\frac{P_{em1}}{n}\right)$, $D^a = f\left(\frac{P_{em1}}{n}\right)$

1.7. Прийняти коефіцієнт полюсного перекриття α_δ :

- для одноіндукторного торцевого ГПСБР $\alpha_\delta = 0,7 \div 0,8$;
- для бііндукторного циліндричного ГПСБР $\alpha_\delta = 0,55 \div 0,6$.

1.8. Прийняти геометричний параметр:

- для одноіндукторного торцевого ГПСБР $d^* = 0,6 \div 0,8$;
- для бііндукторного циліндричного ГПСБР $\lambda = 0,9 \div 1,1$.

1.9. Прийняти значення лінійного струмового навантаження A :

- для природного охолодження $A=200 \div 250 \text{ A/cm}$;
- для самовентиляції $A=300 \div 400 \text{ A/cm}$.

1.10. Прийняти індукцію в робочому повітряному проміжку

$$B_{\delta} = 0,8 \text{ Тл.}$$

1.11. Визначити число полюсів $2p$:

- для одноіндукторного торцевого ГПСБР по $2p=f(D_2)$ (рис.4.7);
- для бііндукторного циліндричного ГПСБР по $2p=f(D_d)$ (рис.4.8);

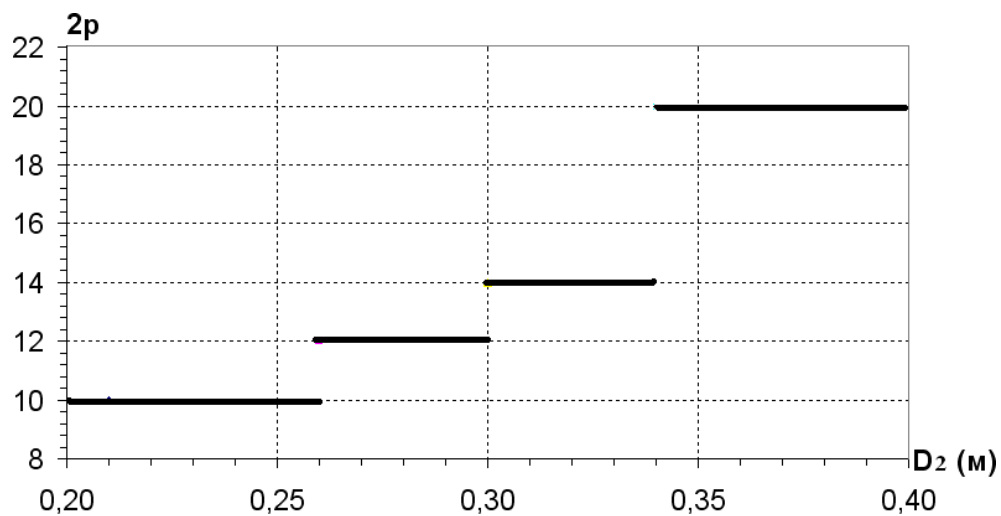


Рис. 4.7. Одноіндукторний торцевий ГПСБР, залежність $2p=f(D_2)$;

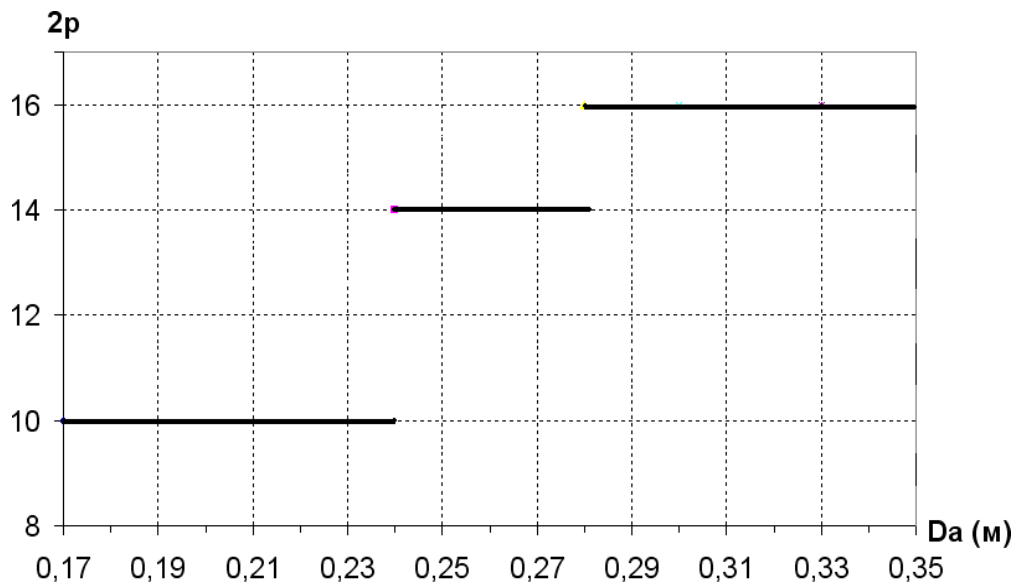


Рис. 4.8. Двухіндукторний циліндричний ГПСБР, залежність $2p=f(D_d)$

1.12. Знайти активну довжину провідника ℓ_δ :

– для одноіндукторного торцевого ГПСБР $\ell_\delta = \frac{D_2 - D_1}{2}$;

– для бііндукторного циліндричного ГПСБР $\ell_\delta = \lambda \cdot D_a$.

Етап 2. Електромагнітний розрахунок.

2.1. Прийняти значення густини струму j :

– для природного охолодження $j = 4 \div 5 \text{ А/мм}^2$;

– для самовентиляції $j = 5 \div 6 \text{ А/мм}^2$.

2.2. Робочий повітряний проміжок δ прийняти мінімально технологічно можливої величини.

Подальший електромагнітний розрахунок проводиться по традиційній методиці проектування машин постійного струму, а саме:

- розрахунок обмотки й пазів якоря;
- розрахунки магнітного кола;
- розрахунки обмотки збудження;
- розрахунки втрат і ККД;
- побудова робочих характеристик;
- тепловий розрахунок (за спрощеною методикою для ГПСБР із широкими стрижнями).

Таким чином, в запропонованій в розділі методиці проектування торцевого та циліндричного ГПСБР ряд стандартних етапів розрахунків класичної МПС при проектуванні ГПСБР не потрібен. Так, у ГПСБР не потрібні розрахунки додаткових полюсів і компенсаційної обмотки, що суттєво зменшує обсяг обчислювальної роботи при виконанні електромагнітного розрахунку.

РОЗДІЛ 5

ДОСЛІДЖЕННЯ СТАЦІОНАРНОГО ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ В ОБМОТКАХ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ВИПРОБУВАННЯ ГЕНЕРАТОРА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З БЕЗОБМОТКОВИМ РОТОРОМ

5.1. Розрахунки стаціонарного теплового поля

З метою запобігання перегріву генератора проведені розрахунки стаціонарного теплового поля ГПСБР з природним охолодженням. Як відомо, відвід тепла в електричних машинах відбувається переважно шляхом теплопровідності та конвективного теплообміну.

На відміну від класичних машин постійного струму, статор ГПСБР не цільний, а сегментований, тому конвекційний теплообмін здійснюється не тільки з поверхні статора, але й додатково з поверхні обмоток.

Залежно від ширини зубцевих стрижнів, що зв'язують зубці в поздовжньому напрямку, у ГПСБР можливі два варіанти відводу тепла.

1. Магнітна система з вузькими стрижнями 1 (рис. 5.1, а) і більшими повітряними проміжками 2 між ними, де тепловідвід з поверхні обмоток здійснюється переважно шляхом конвекції.

2. Магнітна система із широкими стрижнями 1 (рис. 5.1, б) і малими повітряними проміжками 2 між ними, де тепловідвід з поверхні обмоток здійснюється переважно шляхом теплопровідності.

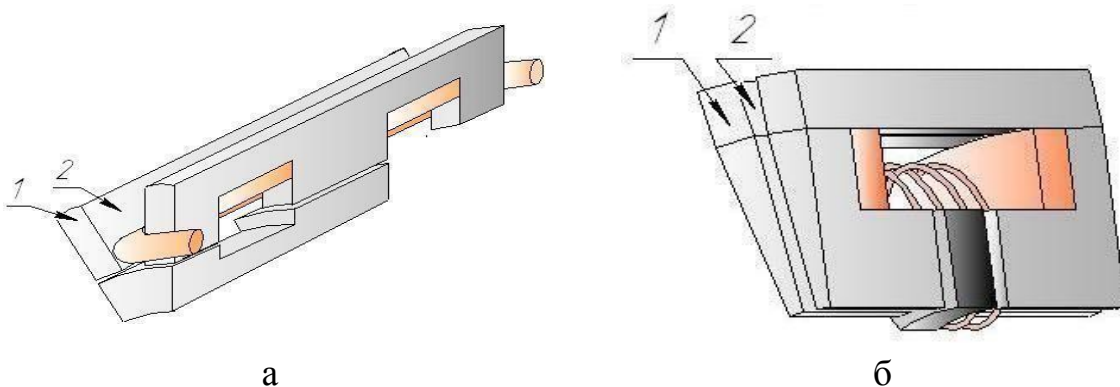


Рис. 5.1. Поздовжні стрижні в зубцях ГПСБР: а - циліндричний; б – торцевий

Обидва варіанта відводу тепла реалізовані в експериментальних конструкціях:

1. ГПСБР циліндричного типу, де 68% зовнішньої поверхні обмотки збудження має безпосередній контакт із навколишнім середовищем.

2. ГПСБР торцевого типу, де тільки 28% зовнішньої поверхні обмотки збудження має безпосередній контакт із навколишнім середовищем.

Обидві конструкції пройшли теплові випробування, що дозволило порівняти експериментальні й розрахункові дані, отримані методом кінцевих елементів у програмі ELCUT.

Розрахунки стаціонарного теплового поля ГПСБР проводились методом кінцевих елементів за допомогою програмного пакета ELCUT версії 4.2. Завдання розглянуто в системі координат xuz у площині xu за умови сталості фізичних властивостей і джерел поля по осі z .

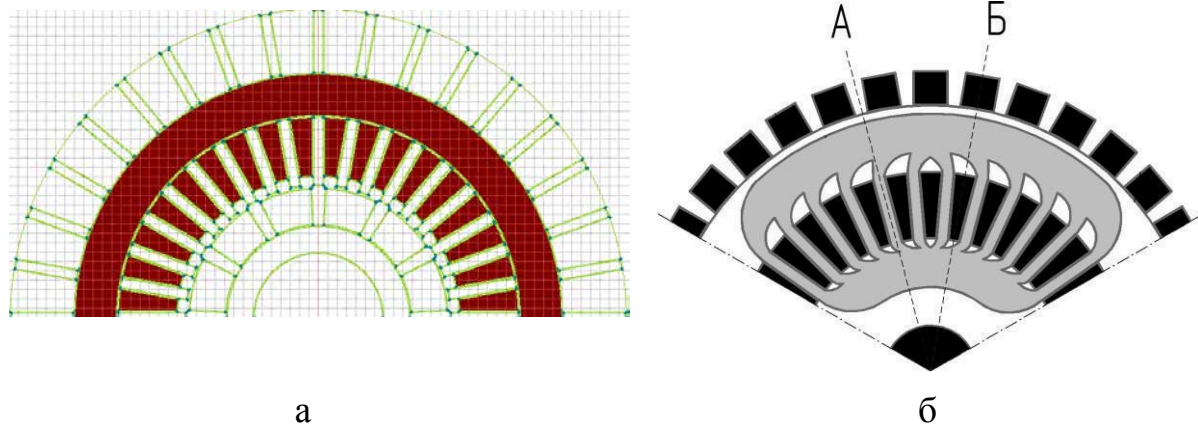


Рис. 5.2. Розрахункова область:
а – циліндричного ГПСБР; б - торцевого ГПСБР

Відмова від розгляду завдання в циліндричній системі координат $zr\theta$ пов'язана з необхідністю одночасного розгляду двох характерних площин ГПСБР, що неможливо в циліндричній системі координат, де розрахункова область обмежена тільки позитивною півплощиною $r>0$. У розрахунках торцевого ГПСБР розглядаються дві півплощини:

- півплощина А (рис.5.2,б), що проходить через паз, де є безпосередній контакт зовнішнього середовища з обмотками;
- півплощина Б (рис. 5.2, б), що проходить через зубець П – подібної форми.

У розрахунковій моделі прийняте наступне допущення: півплощина А повернена на величину половини зубцевого розподілу таким чином, щоб півплощини А і Б перебували в одній розрахунковій площині.

Основою розрахунків теплового поля є рівняння теплопровідності, яке в Декартовій системі координат має вигляд:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = q, \quad (5.1)$$

де T – шукана функція розподілу температури;
 λ_x, λ_y – коефіцієнти теплопровідності в поточній точці розрахункової області в напрямку осей координат x і y ;
 q – об'ємна щільність джерел нагрівання.

З рівнянням (5.1) зв'язано три види граничних умов:

- гранична умова першого роду, що визначає розподіл температури на поверхні тіла,

$$T|_x = T^*, \quad (5.2)$$

де $T|_x$ – температура на границі розрахункової області;
 T^* – відоме значення температури на границі розрахункової області;

- гранична умова другого роду, що визначає значення теплового потоку на поверхні тіла,

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0, \quad (5.3)$$

де n – нормаль до зовнішньої тепловіддаючої поверхні;

- гранична умова третього роду, що визначає конвекційний обмін між поверхнею тіла й навколишнім середовищем

$$\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} e_x + \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} e_y - \alpha (T - T_{nc}) = 0, \quad (5.4)$$

де e_x, e_y – напрямні косинуси нормалі тепловіддаючої поверхні стосовно осей координат;

α – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією в навколишнє середовище;

T_{nc} – температура навколишнього середовища.

У результаті рішення рівняння теплопровідності (5.1) із граничними умовами (5.2÷5.4) визначається шукане температурне поле в тепловому режимі, що досяг сталою значення.

Створення розрахункової моделі проводилося по рекомендаціях, згідно з якими, описуючі границі внутрішнього газового середовища в електричній машині можна прийняти, що повітря, незалежно від того чи є всередині які-небудь пристрої, що переміщують, чи ні, має в повному обсязі ту саму температуру, крім дуже тонкого прикордонного шару.

Знаючи коефіцієнти тепловіддачі $\alpha_1 \dots \alpha_n$, у межах яких можна вважати коефіцієнт тепловіддачі сталим, у розрахунки вводяться умовні середовища, *Boundary Air* (BA) і *Thermal Superconductivity* (TSC), що пов'язані з неможливістю задати температуру на границі внутрішнього газового середовища до початку розрахунків, тому що ця величина ще не визначена. Ці середовища характеризуються наступними значеннями теплопровідності:

$$\lambda_{bai} = \alpha_i \cdot \delta \quad (i=1..n) \text{ Вт/(К}\cdot\text{м)},$$

$$\lambda_{TSC} = 10^5 \text{ Вт/(К}\cdot\text{м)},$$

де δ - дуже мала відстань у порівнянні з розмірами описуваних областей.

Для проведення розрахунків були прийняті наступні коефіцієнти й значення:

- для ГПСБР циліндричного типу $P_n = 954 \text{ Вт}$, $U_n = 289 \text{ В}$, $n = 600 \text{ об/хв}$, $I_{я} = 3,3 \text{ А}$, $T_{nc} = 12^\circ\text{C}$, Клас ізоляції *H*.

Визначена об'ємна щільність тепловиділення:

- обмотки якоря - $Q_{оя} = 1165178 \text{ Вт/м}^3$;
- обмотки збудження - $Q_{оз} = 158447 \text{ Вт/м}^3$;
- для ГПСБР торцевого типу $P_n = 432 \text{ Вт}$, $U_n = 24 \text{ В}$, $n = 450 \text{ об/хв}$, $I_{я} = 18 \text{ А}$, $T_{nc} = 21^\circ\text{C}$, Клас ізоляції *H*.

Визначена об'ємна щільність тепловиділення:

- обмотки якоря - $Q_{оя} = 45497 \text{ Вт/м}^3$;
- обмотки збудження - $Q_{оз} = 95010 \text{ Вт/м}^3$.

Загальні значення для ГПСБР двох типів виконання:

- коефіцієнт тепловіддачі поверхні охолодження $\alpha = 10$ Вт/(м²·К); згідно з рекомендаціями для природнього охолодження:
- теплопровідність міді $T_m = 64$ Вт/(К·м);
- теплопровідність $BA = 0,0075$ Вт/(К·м);
- теплопровідність $TSC = 100000$ Вт/(К·м).

Отримані результати розподілу векторів теплового потоку й температури для ГПСБР циліндричного й торцевого типу відображені на рис. 5.3.

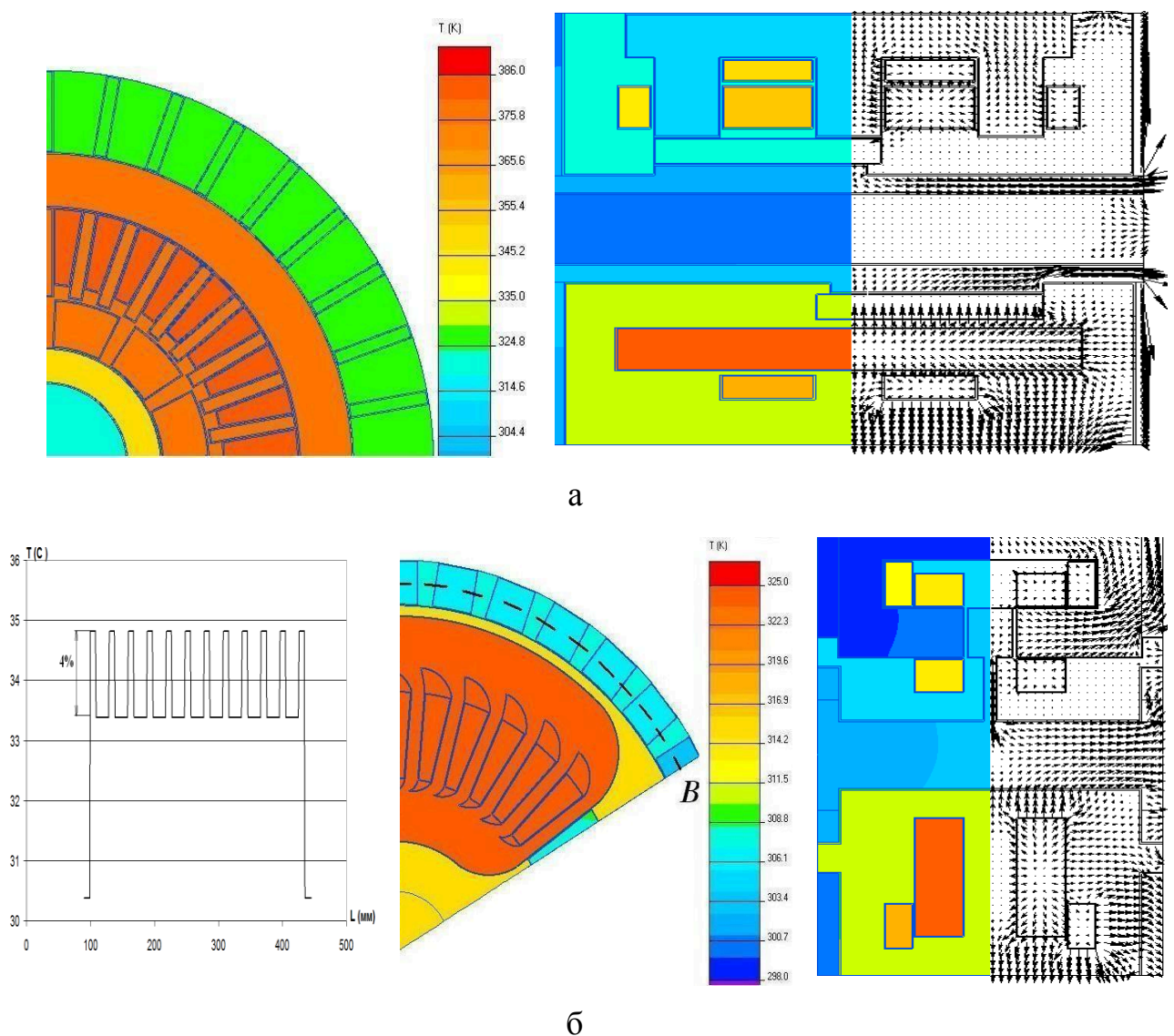


Рис. 5.3. Розподіл векторів теплового потоку та температури в ГПСБР: а - циліндричний; б – торцевий та розподіл температури по перетину В.

У табл. 5.1 наведені порівняльні дані по розрахунковому й експериментальному визначенню температур, що встановилися у ГПСБР.

Таблиця 5.1

Порівняльні дані температури розрахунку і експерименту

Позиція	Абсолютна температура		
	ELCUT	Експеримент	Похибка
ГПСБР циліндричного типу			
Обмотка збудження $T_{оз}$	105,8 °C	100,5°C	5,3%
Обмотка якоря $T_{оя}$	102,8 °C	95,6°C	7,2 %
ГПСБР торцевого типу			
Обмотка збудження $T_{оз}$	58,9°C	56,5°C	2,4 %
Обмотка якоря $T_{оя}$	60,3°C	55,2°C	5,1 %

Результати розрахунків стаціонарного теплового поля з використанням пакета ELCUT і фізичного експерименту досить близькі, що свідчить про достатню точність моделювання теплових процесів.

У результаті моделювання роботи ГПСБР із перевантаженням по струму якоря були отримані наступні результати:

- абсолютна температура обмотки якоря циліндричного ГПСБР із природним охолодженням при $I=1.5I_n$ $T_{оя} = 146^\circ\text{C}$;
- абсолютна температура обмотки якоря торцевого ГПСБР із природним охолодженням при $I=1.5I_n$ $T_{оя} = 77^\circ\text{C}$, $I=2I_n$ $T_{оя} = 95^\circ\text{C}$, $I=3I_n$ $T_{оя} = 130^\circ\text{C}$, $I=4I_n$ $T_{оя} = 164^\circ\text{C}$, $I=5I_n$ $T_{оя} = 199^\circ\text{C}$.

Гранично припустима температура для ізоляції класу Н дорівнює 180°C , обмотки - 165°C . Аналіз результатів моделювання показує, що ГПСБР із широкими поздовжніми стрижнями може тривалий час працювати із трикратним перевантаженням по струму й короткочасно із чотирикратним та п'ятикратним.

Порівняльний розрахунок двох конструкцій ГПСБР показав кращий результат для торцевої конструкції із широкими стрижнями. Так, розрахункова температура обмотки якоря в циліндричному ГПСБР з узькими стрижнями $T_{оя} = 102,8^\circ\text{C}$, а у торцевому ГПСБР з широкими стрижнями $T_{оя} = 86^\circ\text{C}$ при однакових значеннях об'ємної щільності тепловиділення. Тому більш доцільно робити магнітну систему із широкими поздовжніми стрижнями.

При аналізі отриманих результатів (табл. 5.1) важливим є розподіл температури по перетину В (рис. 5.3,б) торцевої ГПСБР із широкими

стрижнями, з якого випливає, що температура в повітряних проміжках між поздовжніми стрижнями на $1,5^{\circ}\text{C}$ більше температури в стрижнях.

Невелика відмінність в 4% дозволяє розглядати ГПСБР із широкими стрижнями з теплової точки зору, як закриту електричну машину із природнім охолодженням відповідну до способу охолодження IC0041.

Подібне допущення дозволяє визначити коефіцієнт підігріву повітря, використовуючи відповідні графічні залежності для машин постійного струму і здійснити розрахунок стаціонарного теплового поля в ГПСБР за спрощеною методикою.

Як і при розрахунках методом кінцевих елементів коефіцієнт тепловіддачі поверхні охолодження прийнятий рівним $\alpha = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$, а коефіцієнт підігріву повітря для способу охолодження IC0041 $\alpha_n = 50 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$. У табл. 5.2 наведено порівняння даних, отриманих за результатами розрахунків температур, що встановилися, за спрощеною методикою й за результатами експерименту.

Таблиця 5.2

Порівняльні дані температури при розрахунках та експерименті

Позиція	Середнє перевищення температури над температурою холодного повітря		
	спрощена методика, $^{\circ}\text{C}$	експеримент, $^{\circ}\text{C}$	похибка, %
Обмотка збудження $T_{оз}$	39,76	35,5	11
Обмотка якоря $T_{оя}$	38,03	34	11

Аналізуючи отримані результати (табл. 5.1; 5.2) можна зробити висновок, що результати розрахунків за спрощеною методикою уступають у точності результатам розрахунків методом кінцевих елементів.

Проте, завдяки простоті розрахунків, спрощену методику можна використовувати при розв'язанні задачі оптимізації для визначення середнього перевищення температури над температурою охолоджуючого повітря.

Моделювання теплових процесів у програмі ELCUT дозволило отримати рекомендації до ГПСБР циліндричної конструкції з вузькими стрижнями, де тепловідвід з поверхні обмоток здійснюється переважно шляхом конвекції:

1. Встановлення захисного екрана навколо циліндричного ГПСБР із тими ж значеннями об'ємної щільності тепловиділення, що й в експерименті, збільшує температуру обмоток у середньому на 14%: $T_{оз} = 123,8^{\circ}\text{C}$, $T_{оя} = 115^{\circ}\text{C}$ (рис.5.4, ліва сторона). Однак зазначені значення не перевищують гранично припустимої температури перегріву для ізоляції класу Н 125°C ;

2. Температуру можливо знизити, якщо в захисному екрані передбачити вікна, які відіграють роль витяжних вентиляційних каналів у витяжній вентиляції із природним спонуканням (рис.5.4, права сторона). Так, моделювання ГПСБР із тими ж значеннями об'ємної щільності тепловиділення, що й в експерименті, показало зменшення температури обмоток на 2°C .

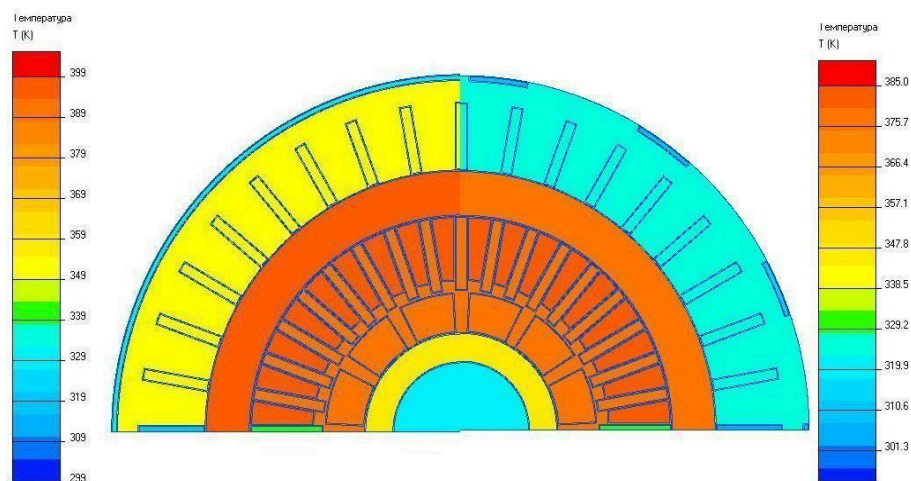


Рис. 5.4. Температура в циліндричному ГПСБР при установці глухого захисного екрана (ліва частина) і при наявності вікон в екрані (права частина).

5.2. Дослідження робочих характеристик експериментального генератора

Досліджуваний генератор постійного струму з безобмотковим ротором та незалежним збудженням і природнім охолодженням (рис. 5.5) був спроектований і виготовлений для роботи в складі ВЕУ з номінальною потужністю $P_n = 0,5 \text{ кВт}$ і швидкістю обертання $n = 300 \text{ об/хв}$ (безредукторний

привод від вітроколеса) та $P_n=1\text{кВт}$, $n=600\text{ об/хв}$ (пасова передача з передаточним числом $i=2$).

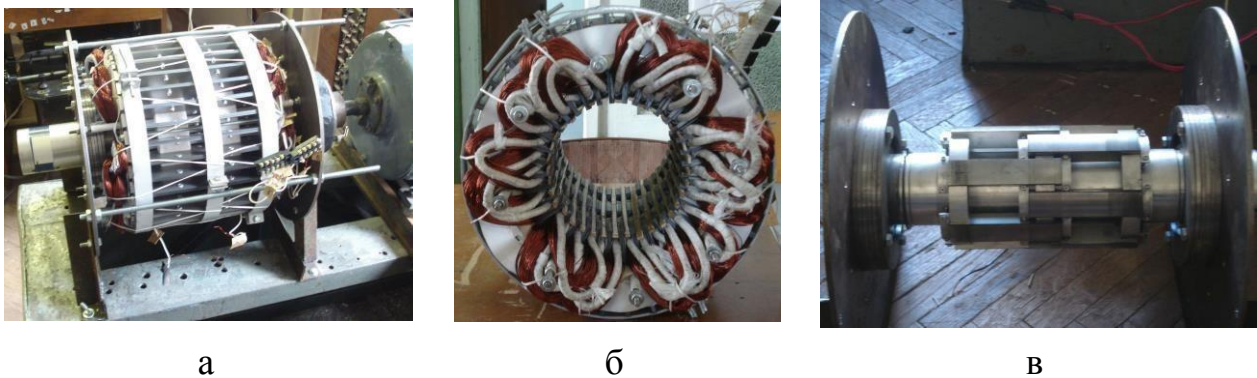


Рис. 5.5. Дослідний зразок ГПСБР: а - зовнішній вигляд; б - статор; в - ротор

На першому етапі випробувань кожна із шести укрупнених секцій включалася на навантаження окремо через діодний міст, інші секції в цей час були виключені зі схеми. Усі випробування проводилися при постійних значеннях $n=600\text{ об/хв}$ і струмі збудження $I_s=0,65\text{ А}$.

При підключенні кожної секції виміри показали практично однакові результати $U_n=100\text{В}$, $I_n=1,6\text{А}$, $P_n=160\text{Вт}$, середнє відхилення не перевищувало 5%. Очікувана загальна потужність генератора $P=960\text{Вт}$.

У результаті випробувань однієї укрупненої секції обмотки якоря були отримані наступні характеристики генератора (рис. 5.6; 5.7; 5.8).

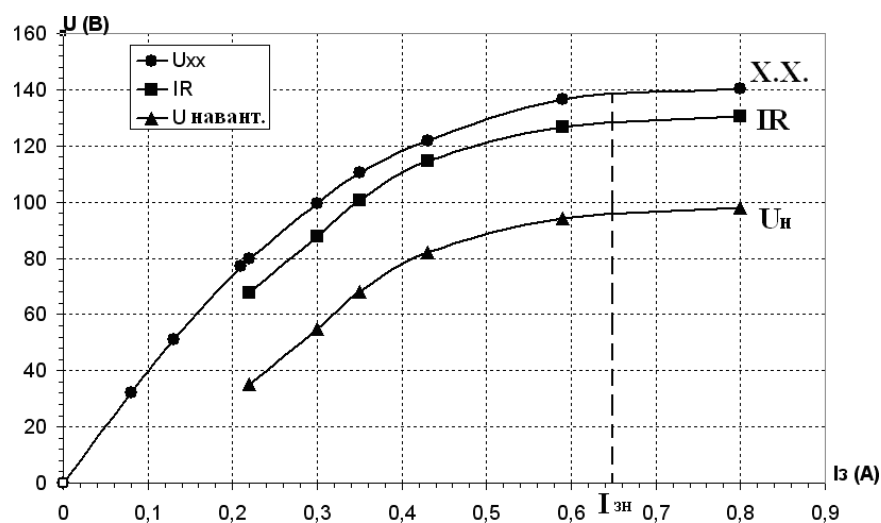


Рис. 5.6. Характеристики холостого ходу й навантажувальна з однією укрупненою секцією

Як відомо, на вид зовнішньої характеристики генератора (рис.5.8) впливають два фактори: поле реакції якоря й спадання напруги в ланцюзі якоря. При відсутності першого фактора дана залежність здобуває лінійний вид і залежить тільки від струму навантаження. Те ж саме можна сказати й про вид регулювальної характеристики (рис. 5.9).

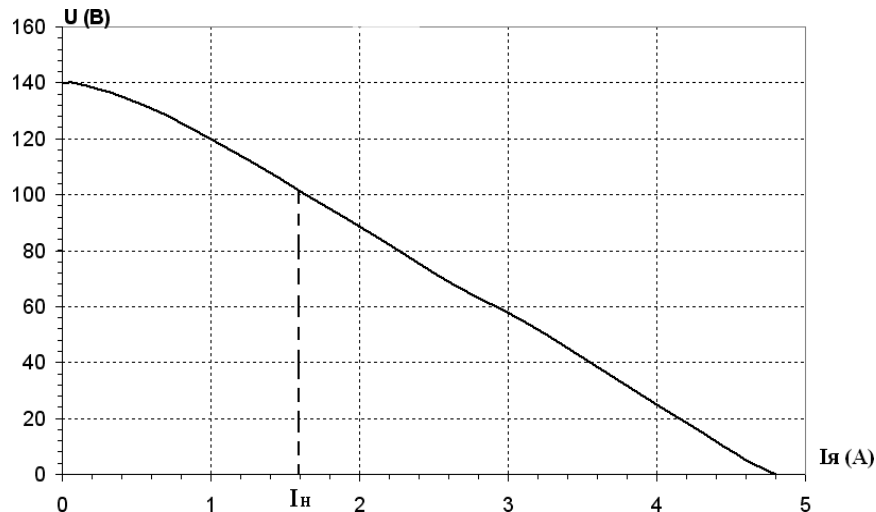


Рис. 5.7. Зовнішня характеристика з однією укрупненою секцією

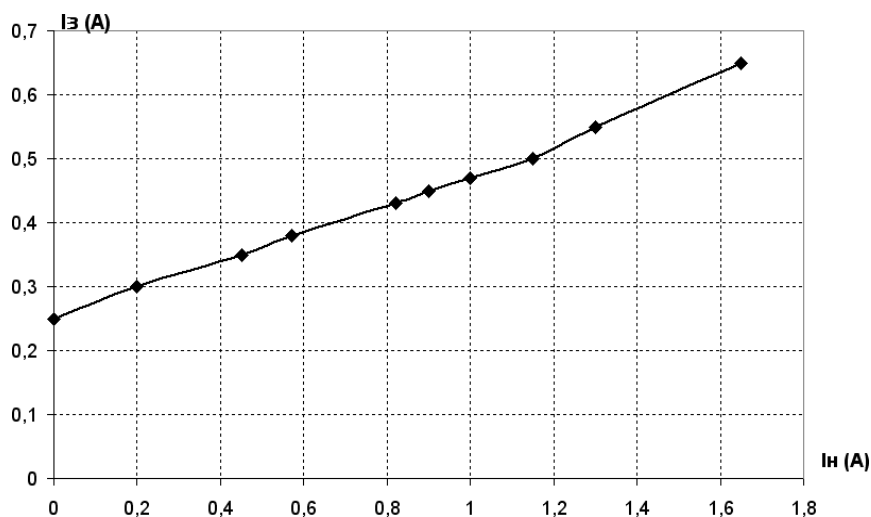


Рис. 5.8. Регулювальна характеристика з однією укрупненою секцією

Аналіз отриманих експериментальних характеристик ГПСБР показав, що реакція якоря в дослідному зразку генератора значно ослаблена.

В результаті випробувань з усією обмоткою якоря були отримані наступні характеристики генератора (рис. 5.9; 5.10; 5.11).

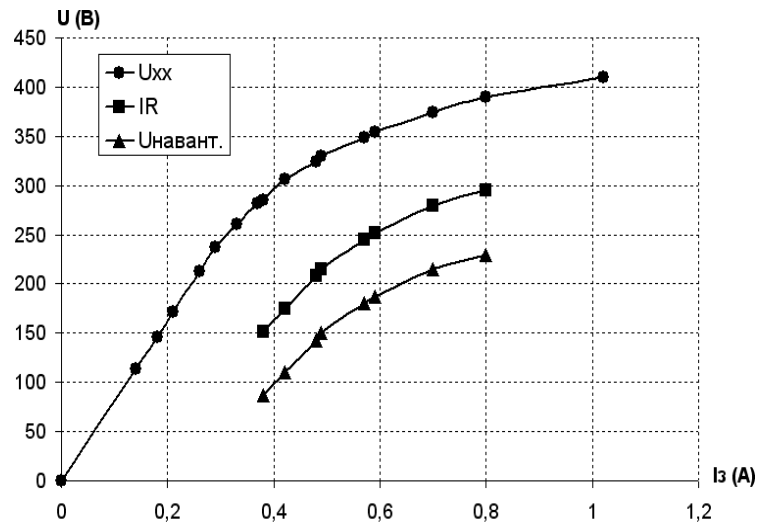


Рис. 5.9. Характеристики холостого ходу й навантажувальна з усією обмоткою якоря

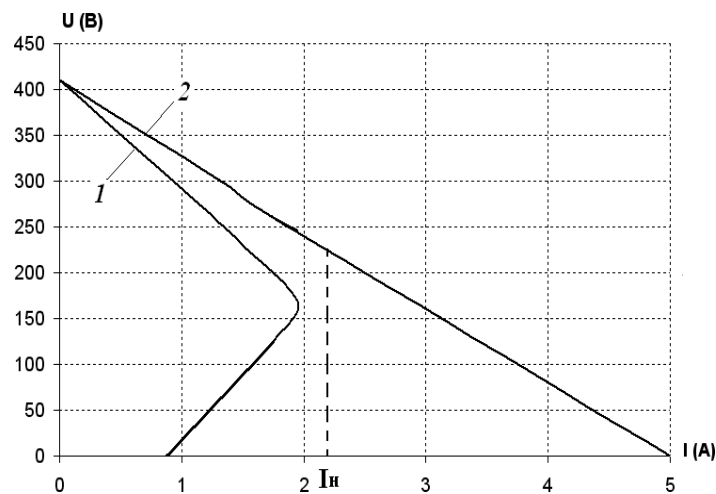


Рис. 5.10. Зовнішні характеристики з усією обмоткою якоря:

1 – паралельне збудження; 2 – незалежне збудження

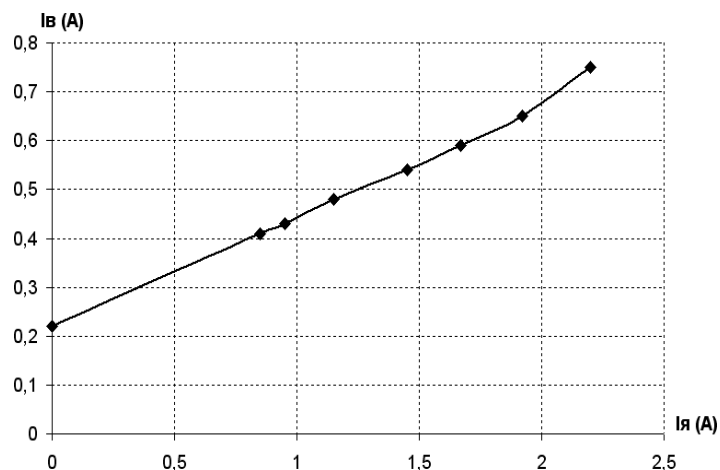


Рис. 5.11. Регульовальна характеристика з усією обмоткою якоря

Генератор замість очікуваної потужності 1кВт виробив 0,5 кВт. Аналіз показав, що в даній конструкції через відмову від комутатора у паралельних гілках обмотки якоря протікає змінний струм, що призводить до необхідності урахування індуктивності обмотки якоря.

Визначення втрат в сталі та механічних втрат

Полюса в ГПСБР не перемагнічуються й тому виготовлені з конструкційної сталі Ст3 (рис.5.12). Зубці, навпаки, перемагнічуються, причому з різною частотою для центрального й бічного зубців (рис.5.13)

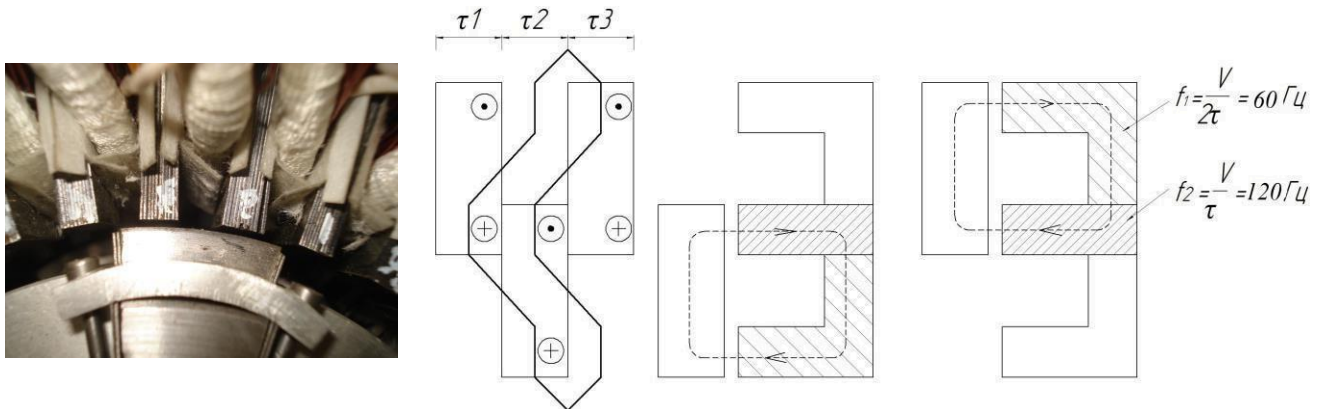


Рис.5.12. Полюс ротора.

Рис.5.13. Схема перемагнічування зубців статора.

Втрати в сталі й механічні втрати ГПСБР визначалися з допомогою тарованого двигуна, для чого були проведені наступні експерименти:

- обертання збудженого випробовуваного генератора;
- обертання не збудженого випробовуваного генератора;
- холостий хід тарованого двигуна.

У результаті експериментів були отримана залежність втрат в сталі від величини ЕРС $P_{cm} = f(E)$ (рис.5.14) для $n = 600; 300$ об/хв. Для зменшення втрат у сталі зубці виготовлені з холоднокатаної текстурованої електротехнічної сталі Э3413 товщиною 0,35мм, з малими питомими втратами.

Тому загальні втрати в сталі виявилися відносно невеликі, $P_{cm} = 70$ Вт ($n = 600$ об/хв) та $P_{cm} = 10$ Вт ($n = 300$ об/хв).

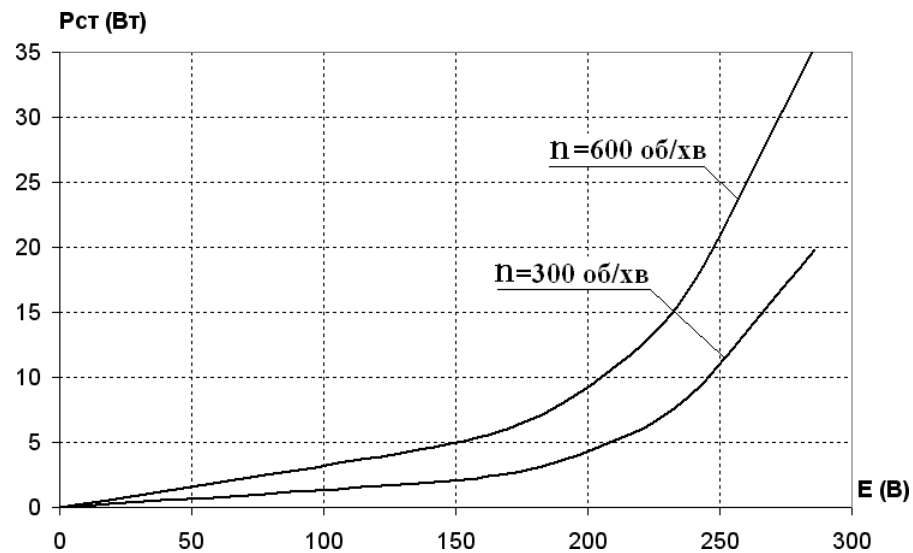


Рис. 5.14. Залежність втрат в сталі від ЕРС

Також визначені механічні втрати генератора $P_{мех} = 40 \text{ Вт}$.

Теплові випробування (рис.5.15) проводились при природному охолодженні, температурі навколишнього середовища 12°C і струмі якоря $I_{я} = 3,3 \text{ А}$ ($n = 600 \text{ об/хв}$).

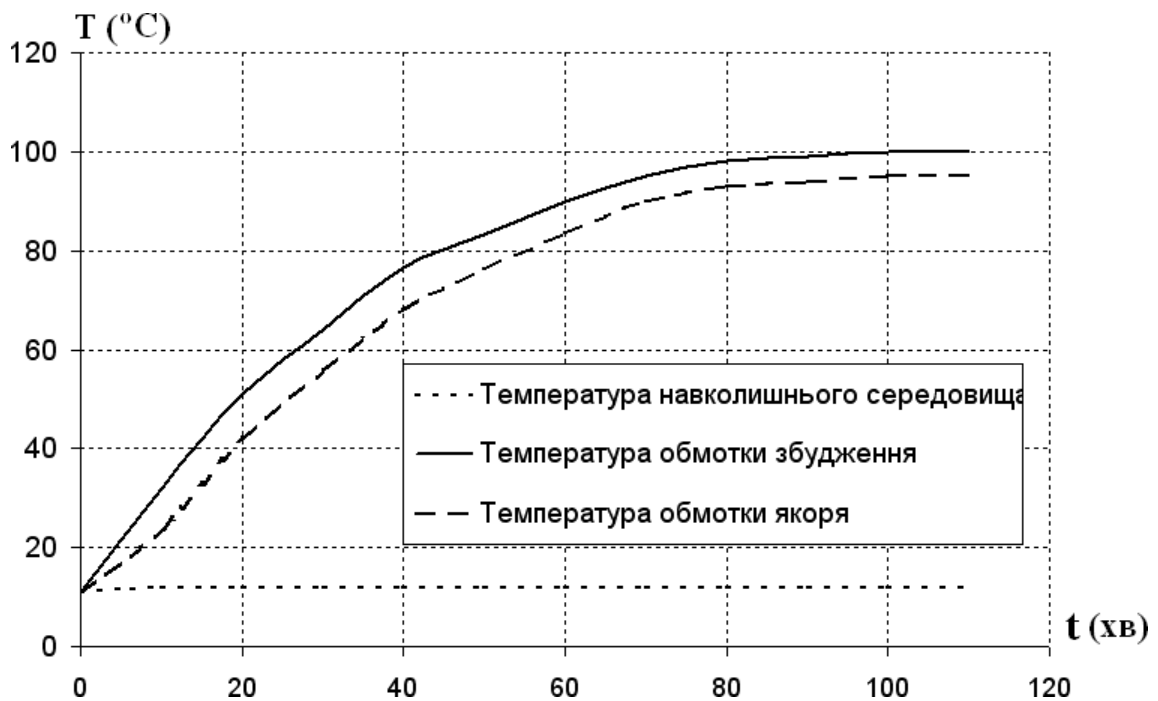


Рис. 5.15 Теплові випробування генератора

Генератор пропрацював в цьому режимі 100 хв. і вийшов на усталені значення температури, що не перевищують 100°C при класі ізоляції обмоток Н.

Експериментально отримані дані випробувань генератора постійного струму з безобмотковим ротором відображено в табл. 5.3

Таблиця 5.3

Експериментальні дані генератора

Параметр	Одиниця виміру	Експеримент	
Номінальна потужність P_n	Вт	255	954
Номінальна напруга U_n	В	150	289
Номінальні оберти n_n	об/хв	300	600
Струм якоря I_a	А	1,7	3,3
Опір обмотки якоря $R_{оя}$ при $T=75^{\circ}\text{C}$	Ом	29,3	29.3
Струм обмотки збудження I_z	А	0,6	0,6
Опір обмотки збудження R_z при $T=75^{\circ}\text{C}$	Ом	289	289
Напруга обмотки збудження U_z	в	173	173
Втрати в обмотці якоря $P_{оя}$	Вт	84	316
Втрати в обмотці збудження $P_{оз}$	Вт	104	104
Втрати в сталі $P_{ст}$	Вт	10	70
Поверхневі втрати $P_{пов}$	Вт	1,5	2,15
Механічні втрати P_m	Вт	40	40
Додаткові втрати $P_{дод}$	Вт	2,6	9,35
Загальні втрати	Вт	242	541,5
Підведена потужність P_1	Вт	497	1495
ККД η	%	51	64
Момент інерції J	Кг м2	0,026	0,026
Маса	кг	70	70

Зменшення потужності ГПСБР у два рази на швидкості $n=300$ об/хв пов'язане із дворазовим зменшенням частоти перемагнічування з $f=120\text{Гц}$ ($n=600$ об/хв) до $f=60\text{Гц}$ ($n=300$ об/хв) і необхідністю використання ємності меншого значення для досягнення резонансу струмів на швидкості $n=300$ об/хв.

У результаті експериментальних досліджень ГПСБР були отримані криві потужності (рис.5.16) для двох режимів роботи.

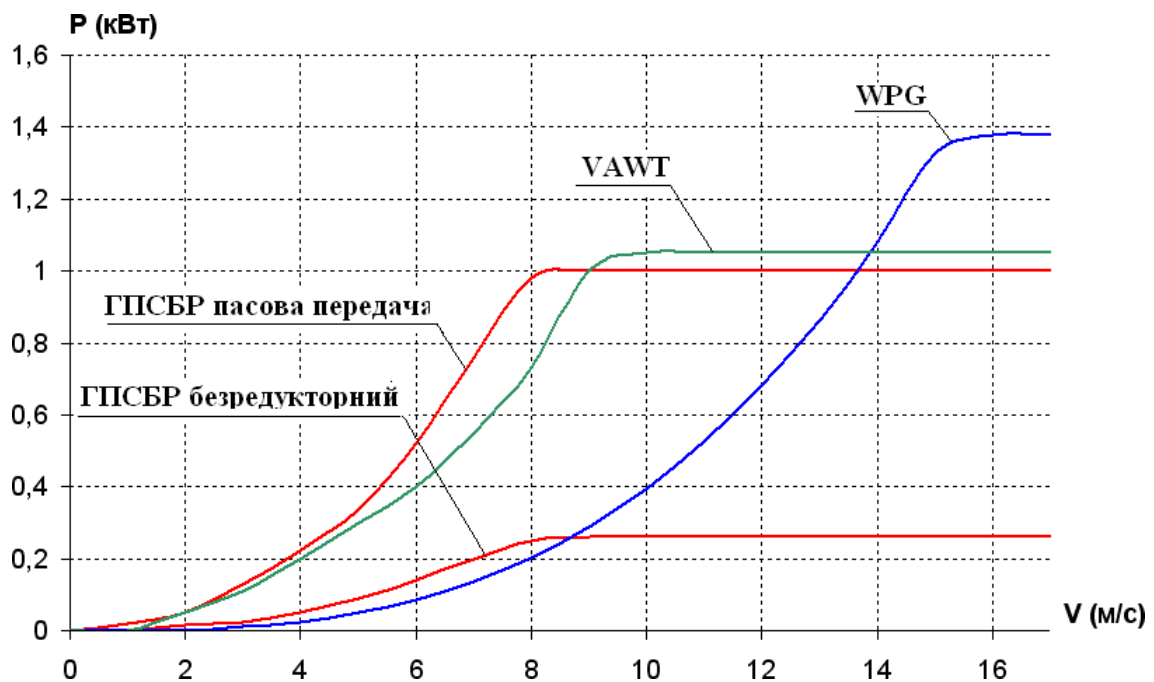


Рис.5.16. Криві потужності

Криві потужності аналогів узяті на сайтах виробників.

1. $P_n = 255 \text{ Вт}$, $n_n = 300 \text{ об/хв}$, $V_n = 8 \text{ м/с}$ (безредукторний привід від вітроколеса).

Аналог - генератор українського виробництва з магнітоелектричним збудженням марки WPG 500 $P_n = 680 \text{ Вт}$, $V_n = 12 \text{ м/с}$, вартістю 800\$.

2. $P_n = 954 \text{ Вт}$, $n_n = 600 \text{ об/хв}$, $V_n = 8 \text{ м/с}$ (пасова передача з передаточним числом $i = 2$).

Аналог - генератор українського виробництва з магнітоелектричним збудженням марки VAWT DPV $P_n = 1000 \text{ Вт}$, $V_n = 9 \text{ м/с}$, вартістю 2800\$.

З аналізу кривих потужності видно, що при швидкості вітру $V = 2 \div 8 \text{ м/с}$ ГПСБР працює більш ефективно, ніж аналоги. Даний висновок підтверджується наступними міркуваннями й розрахунками. Як було показанов першому розділі, середня швидкість вітру по Україні не перевищує $V = 5 \text{ м/с}$.

На сайті «meteoblue» наведено багаторічну статистику по швидкості вітру на території України. Використовуючи дані по швидкості вітру за перше півріччя 2019 р. у м. Київ, отримано розподіл швидкості вітру по днях (рис.5.17). Знаючи миттєву потужність генераторів для різних швидкостей вітру, визначена кількість електричної енергії, виробленої ВЕУ (рис.5.18).

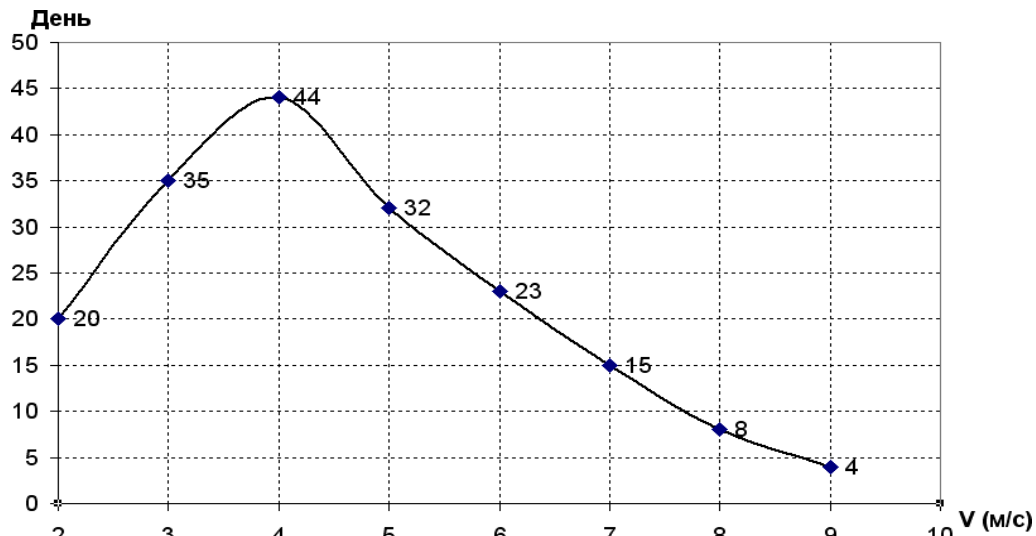


Рис.5.17. Розподіл швидкості вітру по днях за перше півріччя 2019 р. у м. Київ

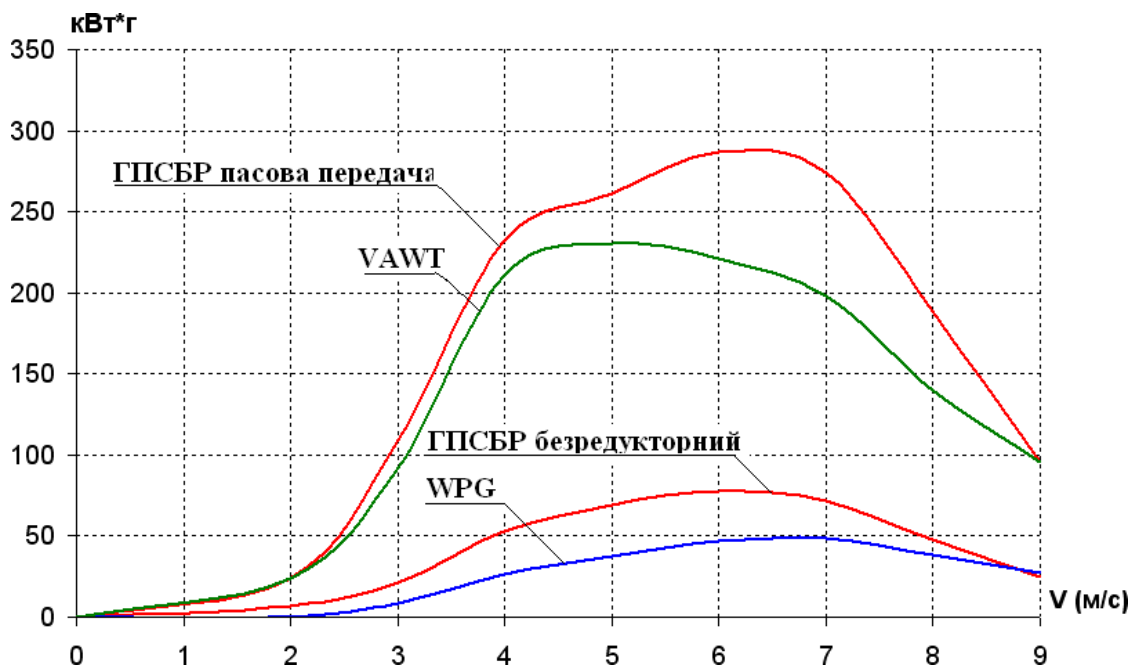


Рис.5.18. Кількість електричної енергії, виробленої ВЕУ

Результати розрахунків наведені в табл.5.4. з аналізу яких видно, що ВЕУ з ГПСБР за рахунок більш повного використання вітрового потенціалу дозволяє при меншій потужності виробити більшу кількість електричної енергії.

Таблиця 5.4

Порівняльні характеристики ВЕУ

Вітроколесо				
Марка	VAWT DPV	ГПСБР пасова передача	WPG 500	ГПСБР безредукторний
Збудження	магніто- електричне	електро- магнітне	магніто- електричне	електро- магнітне
Номінальна швидкість вітру (м/с)	9	8	12	8
Рн (Вт)	1000	954	680	255
кВт·г	1213	1472	235	372
Вартість (генератор+вітроколесо)	2800 \$	1150\$	800 \$	1150\$

5.3 Технологія виготовлення ГПСБР

Генератор постійного струму з безобмотковим ротором простий у виготовленні й збиранні. Статор ГПСБР складається з окремих магнітно-незв'язаних зубців Ш – подібної форми, закріплених у двох алюмінієвих зубцевих гребінках (рис.5.20).

Зубці можуть бути двох видів: прямокутні та трапецієподібні. Більш технологічними, з меншим числом відходів при штампуванні є прямокутні

зубці (рис.5.19,а). Зубцевий пакет формується з окремих листів електротехнічної сталі (рис.5.19,б), пресується та фіксується заклепками.

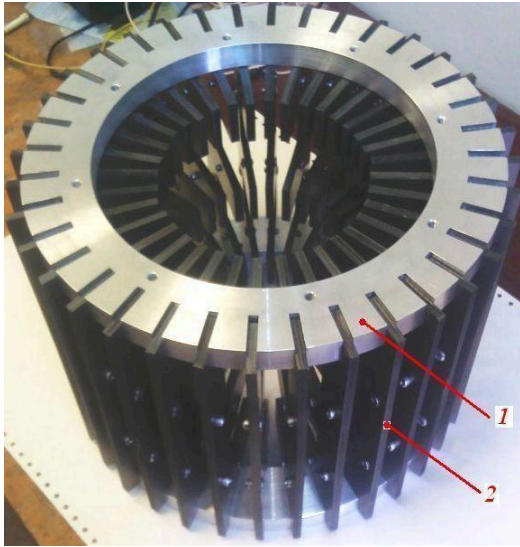
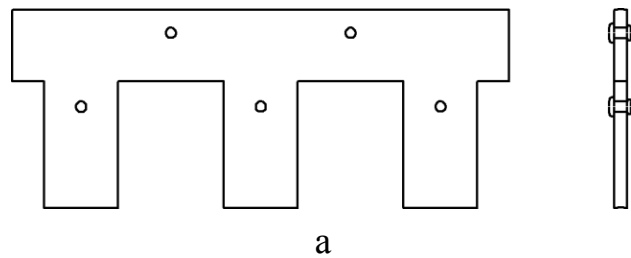
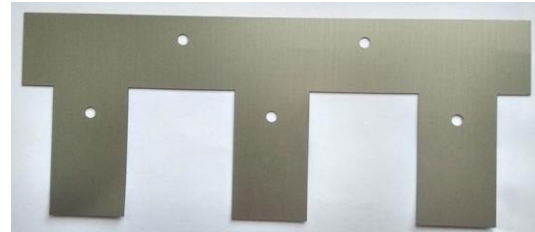


Рис. 5.20. Статор ГПСБР:

- 1 – зубцева гребінка,
- 2 – зубець



а



б

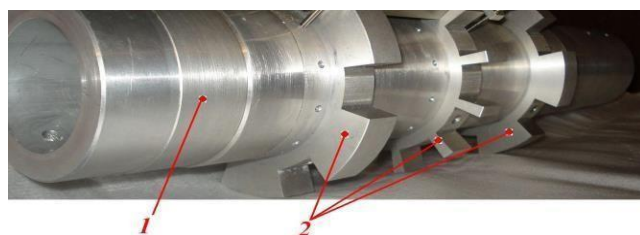
Рис.5.19 Зубець ГПСБР:

- а – креслення зубцевого пакета; б- зубцевий лист електротехнічної сталі марки Е3143

Обмотки збудження намотуються окремо, ізолюються й укладаються в статор. Після остаточного формування магнітної системи статор бандажується алюмінієвими стяжками, потім починається укладка обмотки якоря у пази статора (рис.5.21). Прямокутні зубці утворюють трапецієподібний паз, у якому добре фіксується клин. Ротор складається з алюмінієвого вала та алюмінієвих полюсних гребінок, у яких фіксуються сталеві полюси (рис.5.22).

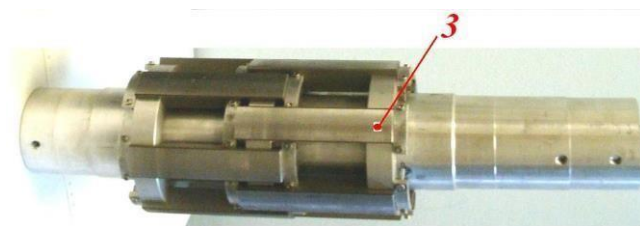


Рис. 5.21. Укладка обмотки якоря ГПСБР



1

2



3

Рис. 5.22. Ротор ГПСБР: 1 – вал, 2 – полюсні гребінки, 3 – полюса

Після збирання ротор закріплюється у підшипникових щитах статора (рис.5.23). Підшипникові щити можуть бути як сталевими, так і алюмінієвими. Більшість операцій по збиранню статора ГПСБР можуть бути легко автоматизовані, за винятком операції укладки обмотки якоря, яка потребує попереднього згинання секцій обмоток на шаблоні (рис.5.24).



Рис.5.23. ГПСБР у зборі

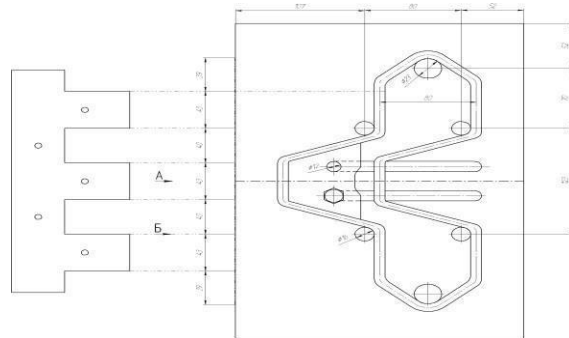


Рис.5.24. Шаблон секції обмотки якоря ГПСБР

Але й ця операція може бути автоматизована, якщо змінити порядок збирання статора ГПСБР: спочатку обмотки, потім магнітна система. Обмотки збираються на спеціальному шаблоні й компаундуються. Після того, як вони стануть монолітними, шаблон звільняється, а на його місце вставляються зубці магнітної системи.

Запропонована технологія збирання ГПСБР цілком реальна, що підтверджується досвідом збирання-розбирання двигуна постійного струму з безобмотковим ротором циліндричного виконання $P_n = 1,5 \text{ кВт}$, $U_n = 244 \text{ В}$, $n_n = 1000 \text{ об/хв}$ для заміни обмотки збудження. Конструкція двигуна така ж, як і у дослідного зразка низькообертового генератора постійного струму з безобмотковим ротором циліндричного виконання для роботи у складі вітроенергетичної установки.



Рис.5.25. Статор зі знятим бандажем



Рис.5.26. Статор зі знятою зубцевою гребінкою



Рис.5.27. Зубцеві гребінки статора

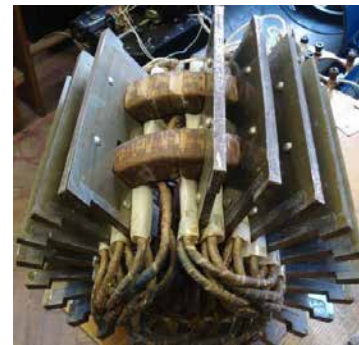


Рис.5.28. Виймання зубців статора



Рис.5.29. Обмотки якоря й збудження



Рис.5.30. Обмотка якоря

При серійному виробництві вартість ГПСБР можна суттєво знизити, виготовляючи алюмінієві деталі (торцеві щити, зубцеві гребінки статора й ротора) не шляхом механічної обробки, а ливарним виробництвом під тиском. У цьому випадку вартість ГПСБР може бути знижена на 10–15%.

ВИСНОВКИ

За результатами дослідження можна зробити наступні висновки:

1. Аналіз сучасного стану вітрової енергетики показав доцільність розробки генераторів постійного струму з безобмотковим ротором для роботи у складі ВЕУ. Показано, що для одержання високого ККД конструктивна схема низькошвидкісної електричної машини постійного струму повинна бути по типу індукторної електричної машини із загальною для всіх полюсів обмоткою збудження.
2. Показано, що у бііндукторних ГПСБР частота перемагнічування у два рази більше, ніж в одноіндукторних ГПСБР, що необхідно враховувати в процесі проектування генераторів для ВЕУ.
3. Статор, що складається з відкритих по обидва боки пазів, здатний ефективно послабляти поперечне поле реакції якоря без використання компенсаційної обмотки та додаткових полюсів.
4. Моделювання теплових процесів в ГПСБР при навантаженнях дозволило сформулювати рекомендації щодо вибору значення лінійного навантаження і густини струму для різних типів охолодження.
5. Показано, що з теплової точки зору ГПСБР із широкими стрижнями можна розглядати як закриту електричну машину із природним охолодженням, відповідну до способу охолодження IC0041.
6. Розроблена методика та запропоновано алгоритм проектування низькошвидкісних ГПСБР для роботи у складі ВЕУ.
7. Показано, що ВЕУ з ГПСБР за рахунок більш повного використання вітрового потенціалу дозволяє при меншій потужності отримати більшу кількість електричної енергії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гнедіна К. В. Тенденції розвитку альтернативної енергетики в Україні в контексті модернізації енергетичних ринків / К. В. Гнедіна, Я. В. Петраков, Н. Л. Ющенко. // Управління розвитком. – 2017. – №3. – С. 35–47.
2. Randal T. World Energy Hits a Turning Point: Solar That's Cheaper Than Wind [Електронний ресурс] / Randal T // Bloomberg. – 2016. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2016-12-15/world-energyhits-a-turning-point-solar-that-s-cheaper-than-wind>.
3. WWEA Half-year Report 2016// World Wind Energy Association [2016] / URL: www.wwindea.org/download/market_reports/Halfyear_Report_WWEA_2016.pdf
4. Renewable Energy Statistics 2019 [Електронний ресурс] // The International Renewable Energy Agency. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.irena.org/publications/2019/Jul/Renewable-energy-statistics-2019>.
5. Renewable Power Generation Costs in 2018 [Електронний ресурс] // International Renewable Energy Agency. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.irena.org/publications/2019/May/Renewable-power-generation-costs-in-2018>.
6. Electricity Information 2019 overview [Електронний ресурс] // The International Energy Agency. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.iea.org/statistics/electricity/>.
7. Cost and Performance Characteristics of New Generating Technologies, Annual Energy Outlook 2019 [Електронний ресурс] // U.S. Energy Information Administration. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: https://www.eia.gov/outlooks/aeo/assumptions/pdf/table_8.2.pdf.
8. Falling renewable costs and support policies are raising the share of RES in the global power mix (+0.8 pts) [Електронний ресурс] // Enerdata. Global Energy Statistical Yearbook. – 2018. – Режим доступу до ресурсу:

<https://yearbook.enerdata.ru/renewables/renewable-in-electricity-production-share.html>.

9. Jean J. Mapping the Economics of U.S. Coal Power and the Rise of Renewables [Электронный ресурс] / J. Jean, D. Borrelli, T. Wu // An MIT Energy Initiative Working Paper. – 2016. – Режим доступа до ресурсу: URL: <http://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2016/03/MITEI-WP-2016-01.pdf>.

10. Hirtenstein A. Wind Turbine Manufacturers Hit Turbulence as Machine Prices Fall [Электронный ресурс] / Anna Hirtenstein // Bloomberg. – 2018. – Режим доступа до ресурсу: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2018-11-12/wind-turbine-manufacturers-hit-turbulence-as-machine-prices-fall>.

11. Atif A. Should we build more large dams? The actual costs of hydropower megaproject developmen / A. Atif, F. Bent, B. Alexander. // Energy Policy. – 2014. – №69. – С. 43–56.

12. Lazard's levelized cost of energy analysis— version 9.0., 2015. – 20 с.

13. Hirtenstein A. Record Green Power Installations Beat Fossil Fuel for First Time [Электронный ресурс] / Anna Hirtenstein // Bloomberg. – 2016. – Режим доступа до ресурсу: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2016-10-25/record-greenpower-installations-beat-fossil-fuel-for-first-time>.

14. AD Climate Summit: IRENA Urges for More Climate Ambition through Renewables [Электронный ресурс] // International Renewable Energy Agency. – 2019. – Режим доступа до ресурсу: <https://www.irena.org/newsroom/articles/2019/Jun/AD-Climate-Summit-IRENA-Urges-For-More-Climate-Ambition-through-Renewables>.

15. Small Wind World Report Summary 2017– Bonn, Germany: World Wind Energy Association, 2017. – 16 с.

16. Wind Vision: A New Era for Wind Power in the United States [Электронный ресурс] // U.S. Department of energy. – 2015. – Режим доступа до ресурсу: https://www.energy.gov/sites/prod/files/WindVision_Report_final.pdf

17. Mohammad J. J. Wind Turbine Power Curve Modeling Using Advanced Parametric and Nonparametric Methods / J. J. Mohammad, B. Eric, S. Shahab // Ieee transactions on sustainable energy. – 2014. – №4, – С. 1262–1269.
18. Intelligent Models for the Power Curves of Small Wind Turbines / R.Veena, V. Femin, S. Mathew, S. Petra., 2016. – (2016 International Conference on Cogeneration, Small Power Plants and District Energy).
19. Аналіз систем орієнтації ротора вітроустановки малої потужності. Інститут відновлюваної енергетики НАН України. – 2015. – №2, – С. 55–60.
20. Кривцов В. С. Невичерпна енергія Книга 1. Вітроелектрогенератори / В. С. Кривцов, А. М. Олейніков, А. І. Яковлєв. Харків: Національний аерокосмічний університет "Харківський авіаційний інститут", 2003. - 400 с.
21. Шевченка В. В. Аналіз можливостей використання різних типів генераторів для вітроенергетичних установок з урахуванням діапазону потужності /В. В. Шевченко, Я. Р. Кулиш // Вісник НТУ "ХПІ". – 2013. – С. 11–12.