

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
АЕРОКОСМІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИХ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ
СИСТЕМ ТА ТЕХНОЛОГІЙ**

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач випускової кафедри
_____ В.П. Квасніков
« _____ » _____ 2020р.

**ДИПЛОМНА РОБОТА
(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)
ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА
за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»**

Тема: Аеродромний статичний перетворювач частоти змінного струму

Виконав: _____ Пряхин Дмитро Володимирович

Керівник: _____ Сірий Дмитро Терентійович

Консультанти з розділів:

Охорона праці

Охорона навколишнього середовища: _

Нормоконтролер

Катаєва М.О.

Київ 2020

Національний авіаційний університет

Аерокосмічний факультет

Кафедра комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач випускової кафедри

В.П. Квасніков

« _____ » _____ 2020 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання дипломної роботи

Пряхина Дмитра Володимировича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дипломної роботи: «Аеродромний статичний перетворювач частоти змінного струму»

затверджена наказом ректора від « 12 » жовтня 2020 р. № 1982/ст

2. Термін виконання роботи: з 05 жовтня 2020 р. по 31 грудня 2020 р.

3. Вихідні дані до роботи: статичний напівпровідниковий перетворювач частоти, вхідна трифазна напруга 380 В, 50 Гц, вихідна синусоїдна трифазна напруга 115/200 В, 400 Гц.

4. Зміст пояснювальної записки: вступ, наземні авіаційні джерела електроенергії, їх аналіз та визначення вимог до них, вибір та розрахунок електронної та силової частин перетворювача, охорона праці, охорона навколишнього середовища, висновки.

5. Перелік обов'язкового графічного матеріалу:

1. Класифікація НАДЕ

2. Типи СПЧ

3. Типова структурна схема СПЧ

4. Структурна схема удосконаленого СПЧ

5. Електрична схема удосконаленого СПЧ

6. Конструкція трансформатора з обертальним магнітним полем (ТОМП)

6. Календарний план-графік

№ пор.	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1.	Аналіз вихідних даних. Підбір літератури	05.10–30.10	виконано
2.	Аналіз існуючих аеродромних джерел електроенергії.	31.10–10.11	виконано
3.	Вибір та розрахунок силової частини перетворювача. Аналіз гармонік та вибір ТОМП	11.11–26.11	виконано
4.	Стислий аналіз аварійних режимів перетворювача, вибір апаратури керування, контролю та сигналізації	27.11–02.12	виконано
5.	Охорона праці	03.12–07.12	виконано
6.	Охорона навколишнього середовища	08.12–15.12	виконано
8.	Висновки	16.12–17.12	виконано
9.	Реферат, оформлення записки, роздаточного графічного матеріалу	18.12–20.12	виконано

7. Консультанти з окремих розділів

Розділ	Консультант (посада, П.І.Б.)	Дата,	Підпис
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	д.т.н., доцент Фролов В. Ф.		
Екологія	асистент Кичата Н. М.		

8. Дата видачі завдання: “ ___ ” _____ 2020 р.

Керівник дипломного проекту _____ Сірий Д.Т.
(підпис керівника) (П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання _____ Пряхин Д.В.
(підпис випускника) (П.І.Б.)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи «Аеродромний статичний перетворювач частоти змінного струму» включає: 89 сторінок, 12 рисунків, 3 таблиці, 23 використаних джерел.

АЕРОДРОМ, ЛІТАЛЬНИЙ АПАРАТ, ДЖЕРЕЛО ЖИВЛЕННЯ, ПЕРЕТВОРЮВАЧ, ЧАСТОТА, СИНУСОЇДНА НАПРУГА.

Об'єкт дослідження – стаціонарні аеродромні джерела живлення літальних апаратів змінного струму.

Предмет дослідження – статичний аеродромний перетворювач частоти для живлення ЛА синусоїдним струмом стабільної частоти 400 Гц.

Метою дипломного проекту є розроблення трифазного статичного напівпровідникового перетворювача частоти з синусоїдною вихідною напругою та покращеними техніко-економічними характеристиками (знижені масогабаритні показники та збільшений ККД).

Метод дослідження – математичне моделювання, теоретичні основи електротехніки, спостереження, порівняння, економічна теорія.

Показано, що статичний напівпровідниковий перетворювач частоти, що має п'ятиканальний автономний інвертор напруги та трансформатор з обертальним магнітним полем з п'ятифазною первинною обмоткою та трифазною вторинною обмоткою дозволяє принципово спростити отримання синусоїдної напруги, відмовившись від фільтрації на виході інвертора.

Матеріали дипломного проекту рекомендується використовувати при проведенні наукових досліджень, у навчальному процесі та в практичній діяльності фахівців конструкторських бюро.

Прогнозні припущення щодо розвитку об'єкта дослідження – розроблення оптимальних аеродромних статичних джерел живлення ЛА змінного струму.

ЗМІСТ

Вступ.....	8
Розділ 1. Наземні авіаційні джерела електроенергії, їх аналіз та визначення вимог до них.....	11
1.1. Аналіз існуючих аеродромних джерел електроенергії.....	11
1.2. Статичні аеродромні перетворювачі електроенергії.....	15
1.2.1. Безпосередні перетворювачі частоти.....	15
1.2.2. Перетворювачі з ланкою постійного струму.....	16
1.3. Основні характеристики та особливості роботи бортових приймачів електроенергії.....	21
Розділ 2. Розробка схеми удосконаленого статичного перетворювача частоти змінного струму.....	25
2.1. Обґрунтування доцільності удосконалення силової частини перетворювачів.....	25
2.2. Удосконалений статичний перетворювач частоти змінного струму.....	26
2.3. Розробка технічних вимог до удосконаленого статичного перетворювача частоти змінного струму.....	30
Розділ 3. Вибір та розрахунок силової частини удосконаленого статичного перетворювача частоти змінного струму.....	37
3.1. Аналіз гармонічних складових вихідних струмів перетворювача та магніторушійної сили ТОМП.....	37
3.2. Аналіз та вибір трансформатора з обертальним магнітним полем.....	39
3.3. Розрахунок силового трансформатора удосконаленого статичного перетворювача частоти змінного струму	44
3.4. Вибір та розрахунок керованого дроселя вихідного фільтра.....	54
3.5. Аналіз можливих аварійних режимів перетворювача, вибір апаратури керування, контролю та сигналізації.....	57
Розділ 4. Охорона праці.....	60
4.1. Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих чинників, що виникають під час технічної експлуатації статичного аеродромного перетворювача частоти....	60

4.2. Технічні заходи щодо усунення небезпечних і шкідливих факторів, що виникають при технічній експлуатації аеродромного статичного перетворювача частоти.....	62
4.2.1. Розрахунок блискавковідводу.....	67
4.3. Пожежна та вибухова безпека при технічній експлуатації аеродромного статичного перетворювача частоти.....	68
4.4. Інструкція з охорони праці при роботі з стаціонарним аеродромним перетворювачем змінного струму.....	70
Розділ 5. Охорона навколишнього середовища.....	72
5.1. Аналіз екологічної небезпеки об'єкту, що проектується.....	72
5.2. Розробка заходів, що підвищують екологічну безпеку проектованого об'єкту.....	76
5.3. Основні причини, що загрожують стану довкілля, та шляхи їх подолання...	83
Висновки.....	86
Список бібліографічних посилань використаних джерел.....	88

УМОВНІ СКОРОЧЕННЯ

- АІ – автономний інвертор;
- АІС – автономний інвертор струму;
- АІН – автономний інвертор напруги;
- БПЧ – безпосередній перетворювач частоти;
- ГТД – газотурбінний двигун;
- ДВЗ – двигун внутрішнього згорання;
- ЕМП – електромагнітне поле;
- ЛА – літальний апарат;
- МРС – магніто-резонансна спектроскопія;
- МСЗ – максимальний струмовий захист;
- НАДЕ – наземні авіаційні джерела електроенергії;
- НС – навколишнє середовище;
- ПММ – паливно-мастильні матеріали;
- СГ – синхронний генератор;
- СПЧ – статичний перетворювач частоти;
- СКВ – система керування випрямлячем;
- СКІ – система керування інвертором;
- ТОМП – трансформатор з обертальним магнітним полем;
- ШРАЖ – штепсельний роз'єм аеродромного живлення.

ВСТУП

Успішне виконання наземних робіт з експлуатації сучасних літаків, їх силових установок, багаточисельних та складних електрифікованих і автоматизованих систем автоматичного озброєння, радіотехнічного і авіаційного обладнання в теперішній час неможливо без використання спеціальних машин і механізмів перевіркової та контрольно-виміральної апаратури і засобів аеродромно-технічного забезпечення польотів. Одні з таких засобів – наземні авіаційні джерела електроенергії (НАДЕ). Ці джерела при технічному обслуговуванні літальних апаратів зберігають ресурс авіаційних двигунів та бортових джерел електроенергії, скорочують витрати палива та мастильних матеріалів, знижують шум та забруднення навколишнього середовища. Крім розділення за родом струму, НАДЕ поділяються за видом первинного джерела енергії, способу перетворення та мобільності. В ролі первинного джерела енергії використовують двигун внутрішнього згорання чи аеродромну силову електромережу з наругою 380/220 В, частотою 50 Гц.

Всі сучасні аеропорти отримують електроенергію від промислової мережі змінного струму з частотою 50 Гц.. Ця електроенергія, незважаючи на достатньо якісні параметри, в чистому вигляді непридатна для живлення бортових систем літаків і для її використання необхідні спеціальні перетворювачі частоти з 50 Гц на 400 Гц.

В авіаційній техніці поряд з електромашинними перетворювачами частоти широко використовуються і статичні напівпровідникові перетворювачі: вони прості і зручні в експлуатації, знаходяться в постійній готовності до експлуатації, мають гарні енергетичні показники і разом з тим мають великий технічний ресурс, так як в них відсутні елементи, що обертаються і колекторно-щіткові вузли. За допомогою таких перетворювачів легко здійснювати автоматичний самоконтроль і дистанційне керування. Їх можна встановлювати в закритих приміщеннях і довгий час експлуатувати без профілактики. Тому статичні перетворювачі частоти дозволяють створити в аеропортах централізовані системи електроживлення за

умови подачі змінного струму напругою 380/220 В, частотою 50 Гц безпосередньо до місця стоянки літаків.

Об'єкт дослідження – стаціонарні аеродромні джерела живлення літальних апаратів змінного струму.

Предмет дослідження – статичний аеродромний перетворювач частоти для живлення ЛА синусоїдним струмом стабільної частоти 400 Гц.

Метою дипломного проекту є розроблення трифазного статичного напівпровідникового перетворювача частоти з синусоїдною вихідною напругою та покращеними техніко-економічними характеристиками (знижені масогабаритні показники та збільшений ККД).

Метод дослідження – математичне моделювання, теоретичні основи електротехніки, спостереження, порівняння, економічна теорія.

Установлено, що статичний напівпровідниковий перетворювач частоти, що має п'ятиканальний автономний інвертор напруги та трансформатор з обертальним магнітним полем з п'ятифазною первинною обмоткою та трифазною вторинною обмоткою дозволяє принципово спростити отримання синусоїдної напруги, відмовившись від фільтрації на виході інвертора.

Дипломна робота включає п'ять розділів.

У першому розділі виконаний аналіз існуючих наземних аеродромних джерел електроенергії. З багатьох видів НАДЕ окремо виділені статичні напівпровідникові перетворювачі частоти (СПЧ) як найбільш досконалі та перспективні. СПЧ призначені для перетворення трифазного струму частотою 50 Гц в трифазний струм частотою 400 Гц і напругою 208/120 В, або в однофазний струм частотою 400 Гц і напругою 120 В.

Складена типова структурна схема побудови розглянутих СПЧ, на якій показані структурні особливості і функціональні недоліки. Основним недоліком таких СПЧ є наявність дросельно-трансформаторної частини, яка застосовується для подальшої фільтрації. Фільтри виконані на LC-елементах, налаштовані в резонанс наявних в сигналі гармонік. Кожний ланцюг містить дросель і групу конденсаторів, тому мають велику масу і габарити.

Розглянуті основні характеристики та особливості роботи бортових приймачів електроенергії, які визначають вимоги до СПЧ в якості електроенергії, надійності та безперебійності живлення.

У другому розділі розглядаються обґрунтування доцільності удосконалення силової частини перетворювачів частоти. Приводяться структурна та електрична схеми удосконаленого СПЧ. Альтернативою використання дросельно-трансформаторного блоку та вихідним фільтром в типових СПЧ є застосування п'ятифазного інвертора та трансформатора з обертальним магнітним полем з п'ятифазною первинною обмоткою та трифазною вторинною обмоткою, на виході якого вищі гармоніки відсутні і не має потреби в використанні резонансних фільтрів. Розроблені технічні вимоги до удосконаленого перетворювача частоти.

У третьому розділі проводиться розрахунок та вибір пристроїв силової частини перетворювача. В результаті проведеного аналізу гармонічних складових вихідної напруги різноманітних перетворювачів показано, що найбільш доцільною схемою є схема рекомендованого СПЧ. Виконані вибір та розрахунок трансформатора з обертальним магнітним полем.

У четвертому та п'ятому розділах висвітлені основні питання, вимоги та заходи щодо охорони праці та захисту навколишнього середовища.

Матеріали дипломного проекту рекомендується використовувати при проведенні наукових досліджень, у навчальному процесі та в практичній діяльності фахівців конструкторських бюро.

Прогнозні припущення щодо розвитку об'єкта дослідження – розроблення оптимальних аеродромних статичних джерел живлення ЛА змінного струму.

РОЗДІЛ 1

НАЗЕМНІ АВІАЦІЙНІ ДЖЕРЕЛА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ, ЇХ АНАЛІЗ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ВИМОГ ДО НИХ

1.1. Аналіз існуючих аеродромних джерел електроенергії

Успішне виконання наземних робіт по експлуатації сучасних літаків, їх силових установок, авіаційного обладнання неможливе без використання спеціальних машин і механізмів перевіркою та контрольно-вимірювальної апаратури і засобів аеродромно-технічного забезпечення польотів. Одним з таких засобів є наземні авіаційні джерела електроенергії (НАДЕ). Ці джерела при технічному обслуговуванні літальних апаратів зберігають ресурс авіаційних двигунів та бортових джерел електроенергії, скорочують витрати палива та мастильних матеріалів, знижуючи шум та забруднення навколишнього середовища.

До наземних авіаційних джерел електроенергії відносяться:

- Джерела енергії електричні (пересувні типу АПА і стаціонарні);
- Джерела енергії гідравлічні (УПГ-250, УПГ-300);
- Джерела енергії пневматичні (УВЗ-1, УВЗ-2);
- Джерела енергії комбіновані (ЕГУ, ЕГУ-3).

Електричні джерела електроенергії за призначенням можна розділити на дві групи:

Аеродромні пересувні агрегати – електростанції. Кожний такий агрегат містить двигун внутрішнього згорання, який приводить в дію один чи декілька генераторів. На агрегаті можуть додатково встановлюватися машинні перетворювачі, трансформатори, випрямлячі та акумуляторні батареї, які в сукупності забезпечують живлення бортової мережі літака всіма видами

електроенергії за величиною напруги, роду струму і частоті. Такі агрегати повністю автономні і самохідні.

Аеродромні пересувні агрегати-перетворювачі. Вони живляться від промислової мережі і складаються з машинних перетворювачів, випрямлячів, трансформаторів і акумуляторних батарей. Такі агрегати можуть використовуватися на аеродромах, де є промислова мережа, або ж працювати сумісно з пересувними електростанціями промислової частоти.

Окрім вищезгаданої класифікації НАДЕ можна поділити: за родом струму, по виду первинного джерела енергії, способу перетворення та мобільності. Класифікація наземних авіаційних джерел енергії приведена на рис. 1.1.

В якості первинного джерела в НАДЕ використовуються або двигун внутрішнього згорання або аеродромна силова електромережа з напругою 380/220 В, частотою 50 Гц.

При використанні двигуна внутрішнього згорання електроенергія виробляється генератором змінного чи постійного струму.

Електрозабезпечення аеродромів і цехів авіапідприємств здійснюється, зазвичай, від трифазної чотирипроводової мережі 380/220 В, 50 Гц. Ця електроенергія, незважаючи на достатньо якісні параметри, в чистому вигляді непридатна для живлення бортових систем літаків і для її використання необхідні спеціальні перетворювачі частоти з 50 Гц на 400 Гц.

Статичні напівпровідникові перетворювачі частоти (СПЧ) призначені для перетворення трифазного струму частотою 50 Гц в трифазний струм частотою 400 Гц і напругою 208/120 В, або в однофазний струм частотою 400 Гц і напругою 120 В. Трифазний струм частотою 400 Гц необхідний для наземного технічного обслуговування електрорадіобладнання літаків з основним електрозабезпеченням на змінному струмі, однофазний – для наземного технічного обслуговування електрорадіобладнання літаків з основним електрозабезпеченням на постійному струмі, частина обладнання яких працює на однофазному струмі частотою 400 Гц.

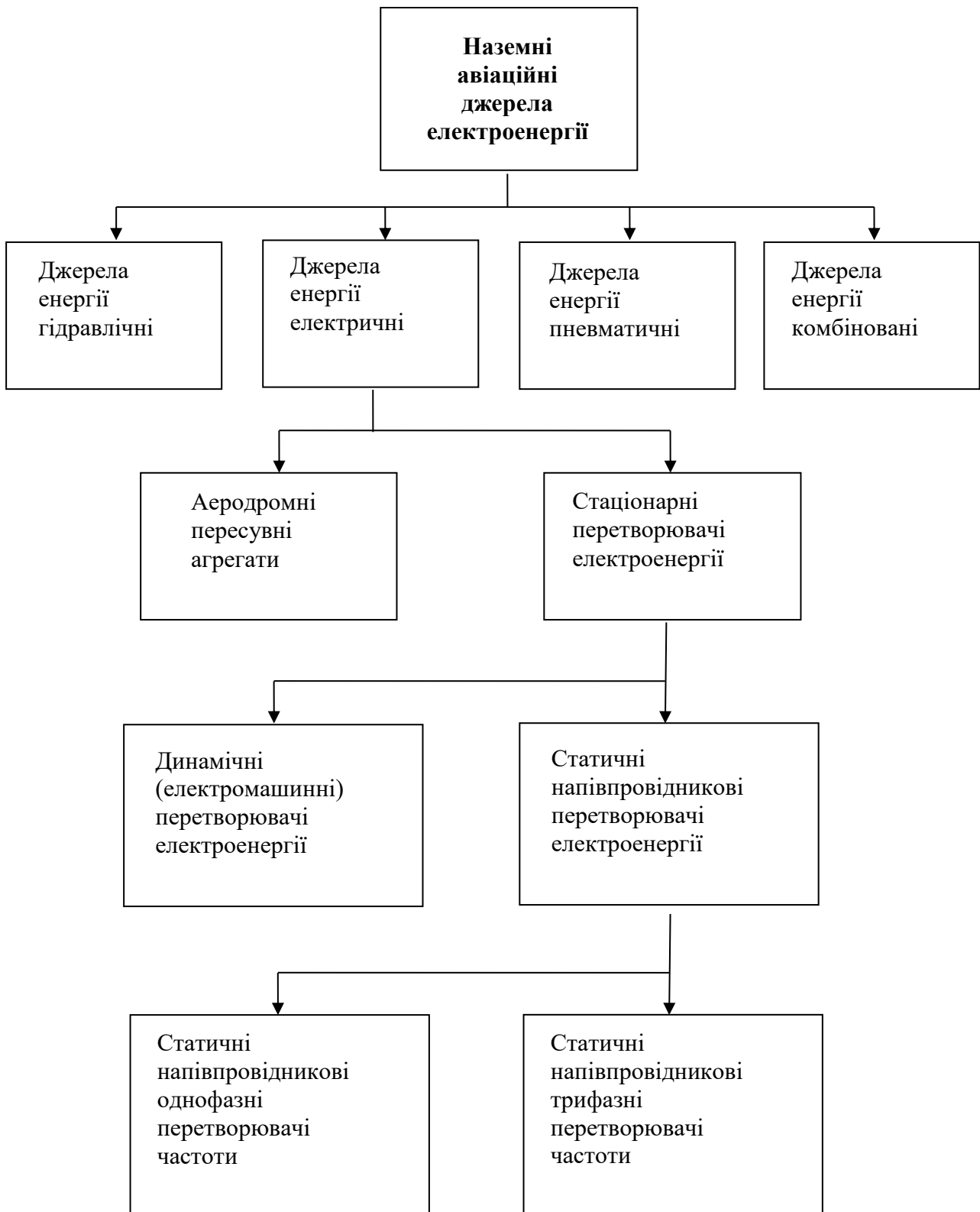


Рис. 1.1. Класифікація наземних авіаційних джерел енергії

СПЧ можуть виконуватися з явно вираженою ланкою постійного струму (випрямлячем) або без нього (безпосередні перетворювачі частоти). Випрямляч перетворює змінний струм в постійний, який потім перетворюється (інвертується) в змінний струм підвищеної частоти 400 Гц. Таким чином СПЧ складається з двох основних частин – випрямляча та інвертора, які в більшості випадків доповнюються пристроями для регулювання та стабілізації величини вихідної напруги і для покращення її форми – наближення до синусоїдальної. Випрямляч, зазвичай, виконується за трифазною мостовою схемою (схемою Ларіонова). Ця схема виключає необхідність примушеного намагнічування сердечника трансформатора, а також має хороші техніко-економічні показники. Він може бути керованим (виконується на тиристорах), якщо його використовують для регулювання або стабілізації величини вихідної напруги.

Перевагою керованого випрямляча є можливість його використання для захисту при коротких замиканнях в навантаженні або порушенні роботи (збої) інвертора шляхом зняття керування в цих випадках з тиристорів випрямляча.

Якщо для регулювання або стабілізації вихідної напруги використовуються інші методи, випрямляч може бути некерованим, тобто виконуватись на діодах.

НАДЕ, зазвичай, працюють на автономне навантаження, тому в них використовуються автономні інвертори (АІ). Основою АІ є вентильний блок-комутатор, що періодично підключає фази навантаження до джерела живлення. В якості вентилів, зазвичай, застосовуються тиристори.

Автономні інвертори поділяються на дві основні групи: автономні інвертори струму (АІС) та автономні інвертори напруги (АІН). У випадку використання АІС величина і форма кривої вихідної напруги визначаються навантаженням. При роботі

на активно-індуктивне навантаження в таких АІ необхідно забезпечити примусове виключення вентилів, що відпрацювали. Це значно ускладнює схему АІС.

Автономні інвертори напруги формують в колі навантаження напругу, а струм залежить від навантаження. У випадку роботи АІН на активно-індуктивне навантаження не потрібні пристрої примусового виключення вентилів.

Основне значення для АІ має спосіб виключення працюючого тиристора і перевід струму на тиристор, що вступає в роботу. За способом комутації тиристорні АІ поділяють на:

- паралельні – комутуючий конденсатор підключається паралельно вентилю, що запирається;
- послідовні – вентиль, що проводить струм, комутуючі дросель і конденсатор та навантаження включаються послідовно;
- АІ з двоступеневою комутацією – комутація здійснюється за допомогою додатково підключеного вентиля.

При вихідній частоті 400 Гц застосування послідовних АІ недоцільно, так як вони мають велику масу реактивних елементів. АІ з двоступеневою комутацією доцільно застосовувати в інверторах невеликої потужності. Дані АІ не отримали розповсюдження із-за складності схем.

Пристроями, якими, зазвичай, доповнюються перетворювачі, є вхідні і вихідні фільтри.

1.2. Статичні аеродромні перетворювачі електроенергії

1.2.1. Безпосередні перетворювачі частоти

Безпосередній перетворювач частоти БПЧ – це статичний перетворювач частоти, виконаний без ланки постійного струму (без випрямляча), що здійснює перетворення трифазного струму частотою f_1 в трифазний або однофазний струм частотою f_2 (рис. 1.2)

Перетворювач складається з двох трифазних схем випрямлення, перша з яких приєднана до фаз трансформатора анодами, друга – катодами. Також безпосередній перетворювач частоти може бути виконаний по мостовій схемі. В цьому випадку він має дві групи тиристорів, включених зустрічно-паралельно через зрівнювальні реактори.

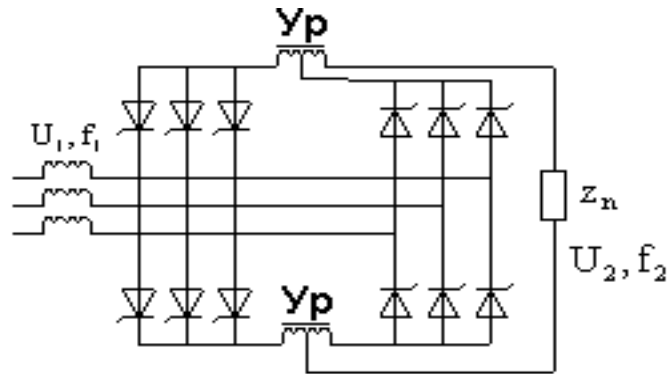


Рис.1.2. Електрична мостова схема БПЧ

Недоліками БПЧ є низький коефіцієнт потужності внаслідок зміни кута керування тиристорами і несинусоїдна форма кривої вихідної напруги, для покращення якої застосовується фільтр. Даний тип перетворювача використовують в тих випадках, коли виникає потреба у низькій вихідній частоті напруги (при $f_2 < f_1$), тобто коли перетворювачі з проміжною ланкою постійного струму мають значні габарити. Для БПЧ справедливо: $f_1/f_2 \geq 3$.

Наприклад, якщо $f_1=50$ Гц, то $f_2 = f_1/3 = 50/3 = 16,667$, Гц.

В статичних напівпровідникових НАДЕ вихідна частота (400 Гц) значно перевищує вхідну (50 Гц) і тому застосування БПЧ є недоцільним.

1.2.2. Перетворювачі з ланкою постійного струму

Аеродромний перетворювач частоти стаціонарний АПЧС-60У1 живиться від аеродромної трифазної мережі напругою 380 В, 50 Гц з нульовим проводом і видає трифазну напругу частотою 400 Гц. Номінальна лінійна напруга – 200 В, фазна – 115 В. Точність стабілізації напруги на виході $\pm 2\%$, частоти $\pm 1\%$.

Викривлення синусоїдності вихідної напруги в установленому режимі не більше 8%.

Напруга мережі поступає на випрямляч В (рис. 1.3), виконаний за трифазною мостовою схемою на тиристорах. Випрямляч є керованим. Він забезпечує фазне регулювання випрямленої напруги і її стабілізації при змінах напруги мережі живлення (допустимі межі $\pm 10\%$) і навантаження. Пристрій програмного відкривання тиристорів забезпечує плавне включення випрямляча. Випрямлена напруга згладжується фільтром Ф, виконаним по Г-подібній схемі. Випрямлена і згладжена напруга подається на інвертор АІ, виконаний як інвертор напруги за мостовою схемою. Інвертор перетворює постійну напругу в змінну частотою 400 Гц. Форма цієї напруги як лінійної так і фазної прямокутна. Лінійна напруга містить крім основної гармоніки з частотою 400 Гц, вищі гармоніки непарної кратності – п'яту, сьому, одинадцяту і т.д. Третьої гармоніки в лінійній напрузі немає, як і гармонік, що кратні до трьох. Фазна напруга містить усі непарні гармоніки. Для фільтрації застосовується фільтр на LC-елементах. Після фільтра напруга, близька до синусоїдної, понижується за допомогою трансформатора до заданих номінальних значень і виводиться на вихідні клеми.

В перетворювачі передбачені захист від зміни частоти вихідної напруги, від зміни напруги на виході і захист від струму. В систему керування випрямлячем входить три ідентичних канали керування тиристорами випрямляча (кожний канал керує двома тиристорами однієї фази), ланцюг зворотного зв'язку, ланцюг ручного керування і пристрій програмного керування. Регулювання тиристорів – фазне, момент включення тиристорів визначається рівністю керуючої напруги і напруги „пилки”.

Блок керування тиристорами інвертора складається з генератора прямокутних імпульсів з частотою 4800 Гц., діляника частоти і кільцевого перерахункового пристрою, який по чергово включає комутуючі і робочі тиристиори.

На відміну від звичайних систем керування, що використовуються в перетворювачах, в системі керування тиристорами інвертора АПЧС-60У1 застосовуються оптрони. В них немає електричного зв'язку між ланцюгом керування

і анодно-катодним ланцюгом, це полегшує створення надійних і завадостійких систем керування тиристорами.

Статичний перетворювач частоти ТО-12/400-123 призначений для живлення бортових мереж літака однофазним змінним струмом. Він перетворює трифазну напругу 380 В 50 Гц в однофазну напругу 120 В 400-900 Гц. Вхідна

Таблиця 1.1

Типи стаціонарних перетворювачів та їх технічні дані

Тип Показники	АПЧС-ТТП	АХА-2300	АПА-400
Потужність, кВа	40, 60, 90	30-90кВА	2,5 - 120 кВА
Частота та напруга живлення	380±10 В (3 фази), 50±2 Гц	3 x 400 В ± 15%	3 x 400 В ± 15%
ККД	90%	>94% 35-90 кВА; >90% 25 кВА	90%
Коефіцієнт потужності, не менше	0,8	0,97 при навантаженні 100%	0,97
Вихідна напруга, В (фазна/лінійна)	115 ± 1 / 200 ± 2 В (3 фази з нульовим виводом)	3 x 115/200 В	3 x 115/200 В
Частота, Гц	400 ± 0,5 (можливе регулювання частоти в діапазоні 300 ... 500 Гц)	400 Гц ± 0,1%	400 Гц ± 0,1 %
Фазова симетрія	120° ±1% для збалансованого навантаження; 120° ± 2 % для 30% незбалансованого навантаження	120° ±1% для збалансованої навантаження; 120° ± 2 % для 30% незбалансованого навантаження	120° ±1% збалансованої навантаження; 120° ± 2 % для 30% незбалансованого навантаження
Допустиме перевантаження по потужності	150% – 60 сек 200% – 10 сек 250% – 1 сек	125% – 600 сек 150% – 60 сек 200% – 30 сек	150% – 60 сек 200% – 30 сек 250% –10 сек

Коефіцієнт спотворення несинусоїдної форми кривої при номінальному навантаженні, не гірше	8%	< 2%	< 3%
---	----	------	------

напруга випрямляється керованим випрямлячем В (рис. 1.3), який зібраний по трифазній мостовій схемі на шести тиристорах і згладжується Г-подібним фільтром Ф. Випрямлена напруга подається на однофазний інвертор на тиристорах АІ; це інвертор паралельного типу з обмеженою комутуючою ємністю і зворотними діодами, включеними за мостовою схемою. Зворотні діоди працюють в режимі випрямляча як джерело постійного струму, коли змінний струм на виході інвертора перевищить постійну (випрямлену) напругу.

Вихідні фільтри знижують до 10% коефіцієнт гармонік вихідної напруги. Перетворювач має три фіксовані частоти.

В систему керування перетворювачем входять системи керування випрямлячем та інвертором. Система керування випрямлячем зібрана на магнітних підсилювачах. При зміні величини постійного струму, що протікає по обмотці керування підсилювача, змінюється момент насичення підсилювачем і, відповідно, фаза керуючих імпульсів, що подаються на тиристори випрямляча. Система керування інвертором представляє собою мультівібратор, що генерує керуючі імпульси, які подаються на тиристори інвертора.

Перетворювач має захист від коротких замикань, від підвищення напруги та від зниження частоти.

Технічні дані статичних перетворювачів, що використовуються в авіації, приведені в таблиці 1.1.

Типова структурна схема побудови розглянутих СПЧ приведена на рис. 1.3 і працює наступним чином.

Трифазна лінійна напруга аеродромної мережі $U_1=380$ В, $f_1=50$ Гц подається на керований випрямляч В (рис. 1.3). Випрямлена напруга згладжується

фільтром Φ і подається на інвертор АІ. Інвертор перетворює постійну напругу в змінну трифазну напругу частотою 400 Гц. Форма цієї напруги як лінійної так і фазної близька до прямокутної. Лінійна напруга містить крім основної гармоніки з частотою 400 Гц вищі гармоніки непарної кратності: – п’яту, сьому, одинадцяту і т.д. Третьої гармоніки в лінійній напрузі немає, як і гармонік, що кратні до трьох. Фазна напруга містить усі непарні гармоніки.

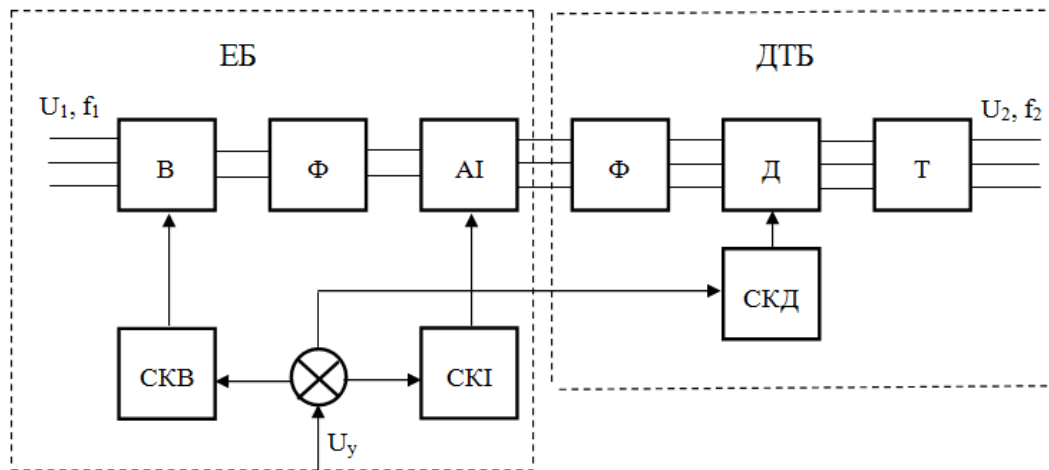


Рис. 1.3. Типова структурна схема побудови СПЧ

Прийняті умовні скорочення:

В – випрямляч. Φ – фільтр. АІ – автономний інвертор. Д – дросель. Т – трансформатор. СКВ – система керування випрямлячем. СКІ – система керування інвертором. СКД – система керування дроселем. ЕБ – електронний блок. ДТБ – дросельно-трансформаторний блок.

Розглянуті блоки складають електронну частину ЕБ СПЧ. Звідси сигнал подається на дросельно-трансформаторну частину ДТБ СПЧ. Тут для подальшої фільтрації застосовуються фільтри Φ на LC -елементах, налаштовані в резонанс вищезгаданих гармонік. Кожний ланцюг містить дросель і групу конденсаторів, тому мають велику масу і габарити, що є основним недоліком таких СПЧ. Крім фільтрів на виході інвертора встановлюють також керовані дроселі Д, які забезпечують зменшення провалів вихідної напруги, викликані великими струмами навантаження.

Далі напруга, близька до синусоїдної, понижується за допомогою трифазного трансформатора Т до заданих номінальних значень і виводиться на вихідні клеми.

Система керування включає систему керування випрямлячем СКВ, систему керування тиристорами інвертора СКІ та систему керування дроселем СКД.

В якості альтернативи використанню блоків дроселів та резонансних фільтрів (рис. 1.3) в роботі запропоновано використання п'ятифазного трансформатора з обертальним магнітним полем.

Структурна схема рекомендованого статичного перетворювача частоти приведена на рис. 1.4 і розглянута нижче. Переваги його уже видно на структурному рівні.

1.3. Основні характеристики та особливості роботи бортових приймачів електроенергії

Системи електроспоживання ЛА представляють собою єдине ціле, нерозривно пов'язане з основними характеристиками, призначенням та, відповідно, обладнанням літака. При цьому з усього комплексу обладнання ЛА можна виділити системи (споживачі електроенергії), які по своєму призначенню, особливостями роботи, вимогами до якості електроенергії, надійності та безперебійності живлення практично не залежать від типу ЛА, а також системи, які є специфічними для певних літаків та вертольотів.

До першої групи приймачів електричної енергії можна віднести пілотажно-навігаційні системи, системи автоматичного керування ЛА та авіадвигуна, зв'язкові радіостанції та інше.

До другої групи відносяться:

- радіолокаційні станції великої потужності, застосування яких є характерним для винищувачів-перехоплювачів та літаків дальньої авіації (бомбардувальників);
- асинхронні двигуни приводу паливних та гідравлічних насосів відносно великої сумарної та одинокої потужності, які широко застосовуються на транспортних, пасажирських літаках, танкерах та літаках-бомбардувальниках;

– системи освітлення великої потужності, кондиціонування, холодильники, різноманітне кухонне обладнання, застосування яких є специфічною особливістю пасажирських літаків.

Для літаків місцевих повітряних ліній, які здійснюють чисельні рейси з короткотривалими (15-30 хв) стоянками, вимагається застосування автономних електростартерних пускових систем авіадвигунів поряд з високонадійними в роботі та простими в експлуатації СЕП.

Бортові системи-приймачі електроенергії по своїй дії на джерела електроенергії можуть бути віднесені до наступних видів:

– в системах змінного струму:

активно-індуктивні навантаження: (освітлення, системи протиобледеніння, обігрівачі тощо);

випрямлячі та інші напівпровідникові (статичні) перетворювачі (блоки живлення радіолокаційних систем, зв'язкових станцій, обчислювальних комплексів, вторинних систем постійного струму та інші);

асинхронні двигуни (паливні та гідравлічні насоси, двигуни лебідок, тельферів, систем механізації крила тощо);

– в системах постійного струму:

електродвигуни різного призначення та потужності;

системи з визначеною сталою часу (електромагніти різних клапанів та кранів, контактори тощо);

системи електростартерного пуску ГТД.

Крім того, в системах постійного та змінного струму можливе застосування приймачів з імпульсно-періодичним споживанням електроенергії.

Робота джерел змінного струму з активно-індуктивним навантаженням досліджена в повній мірі і в загальному випадку потребує узгодження величин струмів та коефіцієнтів потужності навантаження та джерела.

Випрямлювальне навантаження, як відомо, для синхронних генераторів є нелінійним, яке призводить до викривлення форми кривої напруги, що враховується при виборі бортових генераторів. Враховуючи це, авіаційні генератори виконуються

з достатньо потужною демпферною обмоткою (зазвичай, в них регламентується величина індуктивного опору зворотної послідовності, значення якого у відносних величинах не повинно перевищувати 0.2). Крім того, величина такого навантаження не повинна перевищувати 25% потужності генератора. Відповідно і вибір синхронних генераторів наземних джерел повинен проводитись з врахуванням особливостей їх роботи з випрямлювальним навантаженням.

Струм асинхронного двигуна при змінненні ковзання S визначається виразом:

$$I_2'' = \frac{U}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2}{S}\right)^2 + (x_1 + x_2)^2}}$$

де U – напруга двигуна;

$x_1 = \delta_1 x_1'$; $x_2 = \delta_1^2 x_2'$ – уточнені індуктивні опори обмоток статора та ротора;

$R_1 = \delta_1 r_1'$; $R_2 = \delta_1^2 r_2'$ – уточнені активні опори обмоток статора та ротора;

S – ковзання;

r_1, x_1 – активний та індуктивний опори статора;

r_2', x_2' – приведені активний та індуктивний опори ротора;

δ_1 – коефіцієнт розсікання первинного кола (для авіаційних асинхронних двигунів дорівнює 1.05...1.2).

При нерухомому роторі ($S=1$) опори двигуна визначаються за виразом:

$$z_k = \sqrt{R_k^2 + x_k^2}, \text{ де } R_k = R_1 + R_2, x_k = x_1 + x_2.$$

При синхронній швидкості ($S=0$) опір двигуна практично дорівнює опору ланцюга намагнічування, тобто при зміні частоти обертання двигуна від нуля до синхронної його опір змінюється від z_k до опору ланцюга намагнічування, відповідно змінюється і величина струму, що споживається.

Для синхронного генератора включення асинхронного двигуна аналогічне включенню активно-індуктивного навантаження з малим коефіцієнтом потужності.

В наземних джерелах змінного струму застосовуються як авіаційні синхронні генератори (СГ), які допускають роботу з перенавантаженням до $1.5I_{\text{ном}}$ протягом 5 хв і до $2I_{\text{ном}}$ протягом 5 секунд, так і звичайні СГ, допустиме перенавантаження яких

не перевищує 5...10%. Швидкодія систем регулювання напруги у всіх випадках перевищує в декілька разів тривалість пуску двигуна, тому можна рахувати $U = \text{const}$ при пуску.

При включенні асинхронних двигунів великої потужності система регулювання напруги аеродромних джерел, їх кабелі живлення повинні бути розраховані таким чином, щоб напруга на клеммах двигуна була не нижче 80-90 В. Вмикання асинхронного двигуна чинить специфічний вплив на систему регулювання напруги. При цьому, як показують дослідження, в кінці пуску із-за зменшення струму з великою швидкістю можливе недопустиме відхилення перехідної напруги, особливо в системах, регулятори яких мають недостатню швидкодію.

Одним з параметрів, який характеризує швидкодію регуляторів напруги є швидкість змінення струму збудження генератора. Авіаційні регулятори, виконані на напівпровідникових елементах (типу БРН208Т5Б, БРН120Т5А, регулятор блоку БРЗУ115) при роботі з такими генераторами забезпечують зміну струму збудження зі швидкістю (100-120) А/с.

На систему регулювання частоти та відповідно на привідний двигун включення асинхронних двигунів, не дивлячись на великі струми, не спричиняє особливого збудження, так як пуск двигуна відбувається при низьких коефіцієнтах потужності.

Характер зміни параметрів двигунів постійного струму при їх пуску принципово відрізняється від асинхронних двигунів і при аналізі процесів достатньо враховувати максимальний (ударний) струм в момент включення.

На сучасних ЛА до двигунів постійного струму великої потужності в першу чергу слід віднести стартери електричних пускових систем газотурбінних двигунів (ГТД). Аналіз процесів, які відбуваються в таких системах розглянемо нижче.

Наступним видом навантаження авіаційних джерел є приймачі з імпульсно-періодичним споживанням електроенергії. ГОСТом 19705-89 величина вказаного навантаження обмежена 7% номінального амплітудного значення сили струму каналу (джерела), тобто навіть на ЛА с потужністю каналу 120 кВА (максимальна потужність каналу сучасних ЛА) потужність імпульсно-періодичного навантаження не повинна перевищувати 8 кВА. В цьому випадку, враховуючи достатньо велику

швидкодію регуляторів напруги аеродромних джерел та відносно великі приведені моменти інерції генераторів та приводних двигунів агрегатів живлення забезпечення потрібної якості електроенергії можуть бути вирішені без застосування додаткових пристроїв. На спеціальних ЛА, де вказане навантаження може перевищувати приведені значення, живлення роботи наземних агрегатів з таким навантаженням повинні розглядатись окремо.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА СХЕМИ УДОСКОНАЛЕНОГО СТАТИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЧАСТОТИ ЗМІННОГО СТРУМУ

2.1. Обґрунтування доцільності удосконалення силової частини перетворювачів

В перетворювачах змінного струму $U=220/380$ В, $f=50$ Гц при будь-якій структурній схемі та будь-якому способі регулювання вихідної напруги повинен бути трансформатор або автотрансформатор, який повинен забезпечувати узгодження $U_{\text{вих}}=120/208$ В з $U_{\text{мережі}}$. В існуючих перетворювачах, наприклад, в АПЧС-60У1 встановлений трифазний трансформатор з первинною обмоткою, з'єднаною в „трикутник”, а вторинна – в „зірку”. Слід зазначити, що практично у всіх випадках в таких перетворювачах вторинна обмотка повинна бути з'єднана „зіркою”, так як перетворювач повинен забезпечувати живлення як трифазних, так і однофазних приймачів електричної енергії, тобто їх живлення повинно здійснюватись фазною напругою (фаза-нейтраль).

На вході трансформатора встановлені фільтри, які забезпечують фільтрацію напруги інвертора. В інверторах напруги частіше всього застосовуються фільтри з одним послідовним та одним паралельним контурами або з одним послідовним та декількома паралельними контурами. Послідовний контур настроюється в резонанс на першу (основну) гармоніку, і якщо знехтувати активним опором дроселя, є для неї теоретично нульовим опором; для вищих гармонік цей контур представляє собою індуктивний опір (опір дроселя з частотою збільшується, а конденсатора – падає). Паралельний контур в схемі також настроєний на основну гармоніку і представляє для неї теоретично нескінченно великий опір. Для вищих гармонік опір паралельного контуру буде ємнісним. Якщо навантаження містить значну індуктивність та мало змінюється за величиною, то дросель не ставиться – його роль виконує індуктивність

навантаження. Іноді не застосовується і конденсатор, що спрощує фільтр, але збільшує його встановлену потужність. В інверторі струму вихідним фільтром є конденсатор, включений паралельно навантаженню. Потужність конденсатора, як правило, складає 1-1.5 потужності навантаження. Для покращення фільтрації послідовно з конденсатором включають індуктивність, настроєну на певну гармоніку, та застосовують декілька таких паралельних контурів, як це зроблено в АПЧС-60У1.

Крім цих фільтрів на виході інвертора також встановлюють і керовані дроселі, які забезпечують зменшення провалів вихідної напруги, які викликані струмами навантаження. Захист від провалів напруги, використовується в блоці, який забезпечує такий захист. Даний блок має в собі тиристори, які потребують створення додаткового каналу управління, що в свою чергу ускладнює систему управління перетворювача.

Альтернативою вищевказаному блоку та вихідним фільтрам є використання трансформатора з магнітним полем, яке обертається. В такому трансформаторі можливо принципово спростити отримання синусоїдної напруги, а відповідно і спростити схему фільтрації на виході інвертора.

Структурна схема удосконаленого стаціонарного перетворювача змінного струму приведена на рис. 2.1.

2.2. Удосконалений статичний перетворювач частоти змінного струму

Структурна та електрична схеми рекомендованого СПЧ приведені відповідно на рис. 2.1. та рис. 2.2.

Переваги рекомендованого удосконаленого СПЧ уже видно на структурному рівні – в схемі відсутній дросельно-трансформаторний блок з великою масою дроселів та конденсаторів, що застосовуються для фільтрації.

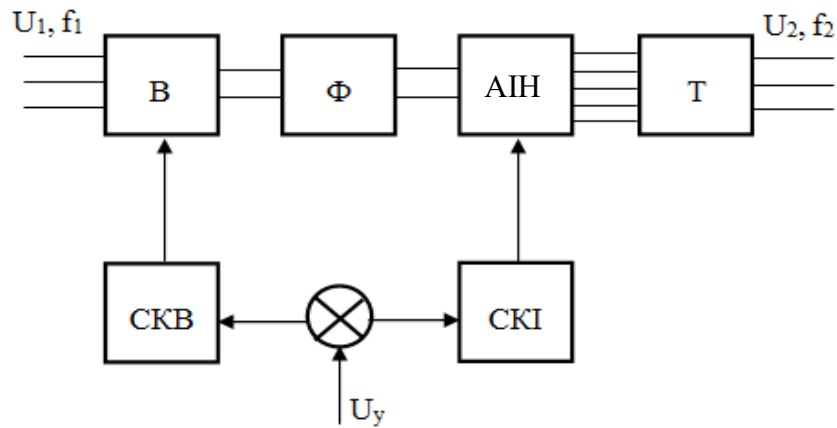


Рис. 2.1. Структурна схема удосконаленого статичного перетворювача частоти

На схемах позначено: В – керований випрямляч, Ф – фільтр, АН – п’ятиканальний автономний інвертор напруги, ТОМП – трансформатор з обертальним магнітним полем.

Удосконалений СПЧ працює наступним чином.

Трифазна напруга аеродромної мережі 380 В, 50 Гц випрямляється та згладжується як і в типовому СПЧ. Далі випрямлена напруга перетворюється п’ятиканальним інвертором напруги в п’ятифазну напругу з частотою 400 Гц. Фази зсунуті одна від одної на 72° . Вони живлять п’ять первинних обмоток трансформатора з обертальним магнітним полем. Ці обмотки в тілі циліндричного за формою трансформатора розташовані теж з зсувом 72° . Завдяки цьому в трансформаторі виникає обертальне магнітне поле з частотою прикладеної напруги 400 Гц. Це магнітне поле наводить у вторинній трифазній обмотці трансформатора трифазну напругу синусоїдної форми 115/200 В, 400 Гц.

Перевагою застосування керованого випрямляча є можливість його використання для захисту при короткому замиканні в навантаженні або порушенні роботи інвертора шляхом зняття керування в цих випадках з тиристорів випрямляча.

Трансформатор з обертальним магнітним полем виконаний з різним числом фаз первинної та вторинної обмотки – в первинній 5 фаз, у вторинній 3 фази. При

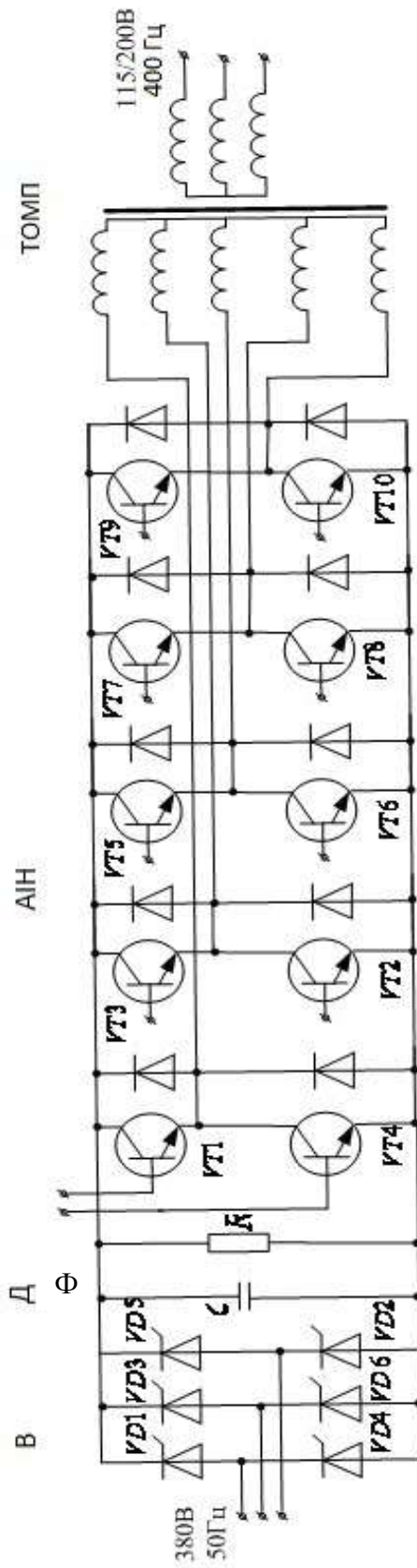


Рис. 2.2. Електрична схема удосконаленого стаціонарного перетворювача частоти змінного струму

застосуванні п'ятифазного інвертора та відповідно п'ятифазного ТОМП значно спрощується проблема отримання синусоїдної напруги. Це показано в роботі далі на прикладі порівняльного гармонічного аналізу випрямленої напруги при трифазному і п'ятифазному випрямленні – при застосуванні п'ятифазного інвертора та відповідно п'ятифазного ТОМП вищі гармоніки відсутні і не має потреби в використанні резонансних фільтрів.

Враховуючи, що в перетворювачі, що розроблюється, використовується керований випрямляч, то в якості трансформатора з обертальним магнітним полем вибираємо некерований трансформатор з шихтованим сердечником.

2.3. Розробка технічних вимог до вдосконаленого статичного перетворювача частоти змінного струму

Наземні авіаційні джерела електроенергії (НАДЕ) змінного трифазного струму високої частоти створюють на номінальне навантаження 200/115 В та номінальну частоту 50 Гц. Фази джерела струму з'єднуються в „зірку” з обов'язковим виводом силової нейтралі. Кут зсуву між векторами напруг будь-яких з'єднаних фаз повинен знаходитися в межах 116° - 124° ($120^{\circ} \pm 4^{\circ}$).

Відхилення напруги. Згідно ГОСТ 19705-89 врівноважене значення фазної напруги повинно відповідати величинам:

- на клеммах споживачів будь-якої фази – від 108 до 120 В;
- в точці регулювання (штепсельний роз'єм аеродромного живлення) середня напруга трьох фаз – 114-118 В.

Примітка: ці дані відносяться до режиму роботи з урівноваженою частотою та нерівномірністю навантаження фаз, що не перевищує 10% номінальної потужності джерела струму та не повинна перевищувати 4 В.

Модуляція фазної напруги у встановленому режимі роботи не повинна перевищувати 3.5 В. Її вимірюють як різницю найбільшого та найменшого значення огибаючої кривої, що побудована за амплітудними значеннями фазної напруги за термін не менше 1 с.

Форма кривої напруги в усталеному режимі повинна бути такою, щоб виконувались наступні вимоги:

- загальне значення зовнішніх гармонік не повинно перевищувати 8% діючого значення основної гармоніки;
- діюче значення будь-якої окремої зовнішньої гармоніки не повинно перевищувати 5% діючого значення основної гармоніки;
- коефіцієнт амплітуди повинен бути 1.41 ± 0.15 .

Зміна напруги в перехідному режимі.

При нормальній роботі системи електрозабезпечення та раптових змінах навантаження від 10 до 160% потужності джерела струму, приведена вихідна напруга не повинна виходити за певні межі. Зона допустимої напруги відображена на рис. 2.3 та має штрихи з нахилом вправо.

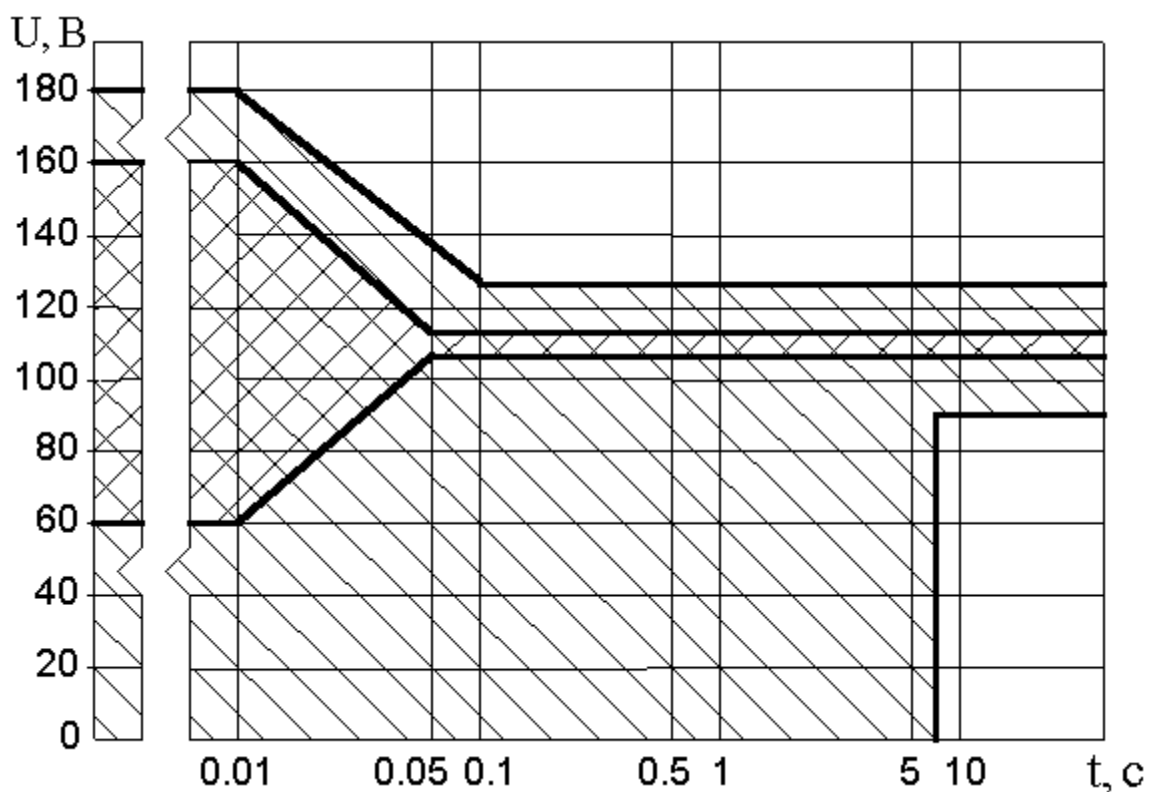


Рис.2.3. Графік допустимої зміни напруги при перехідних процесах

Приведена перехідна напруга – поодинокі скачки синусоїдальних кривих напруги змінного струму прямокутної форми, які по своєму електричному та

тепловому впливу на обладнання еквівалентні впливу на споживачі перехідних напруг зі складними формами при змінному струмі.

Допустима зона перенапружень вказана на рис. 2.3 похилою штриховою вліво. Ненормальним режимом роботи називається режим, при якому якість електроенергії характеризується показниками, які виходять за межі зони допустимих значень для нормальної роботи. Ненормальний режим виникає внаслідок раптової втрати або погіршення керування конкретною системою. В ненормальному режимі система може робити короткочасно, тривала робота може привести до виходу обладнання з ладу. Для запобігання наслідків ненормальних режимів вводять захисні пристрої, які вимикають джерело.

Частота. Врівноважене значення частоти змінного струму повинно підтримуватись в діапазоні від 380 до 420 Гц. Швидкість зміни частоти із-за відхилення її в межах допусків встановленого режиму роботи не повинно перевищувати 15 Гц/хв.

Радіозавади. Рівень напруги радіозавад, створених джерелом змінного струму в точках підключення їх до бортової мережі не повинен перевищувати значень, приведених в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Допустимий рівень напруги радіозавад

Частота, Гц	Напруга радіозавад (в дБ) по відношенню до 1 мкВ
Від 0.15 до 0.5	58
Від 0.5 до 2.5	50
Від 2.5 до 400	44

Проаналізуємо вищеперераховані вимоги щодо перетворювача.

Достатньо просто забезпечуються точність стабілізації і кут зсуву між векторами напруг 116^0 - 124^0 . Забезпечення на клеммах перетворювача, на ШРАЖ

(штепсельному роз'єму аеродромного живлення) напруги 114-118 В з урахуванням падіння напруги в з'єднувальному кабелі проблематично.

Це підтверджується експериментальними дослідженнями наземних агрегатів. Так, в АПА-5Д кабель трифазного змінного струму виконаний з перетином 50 мм² та довжиною 16 м. В цьому випадку при температурі 50 °С та струмові фази 140-160 А падіння в кабелі складає ≈ 3 В. При цьому не враховується падіння напруги на перехідних контактах. Отже, якщо напруга в точці регулювання буде складати 114-115 В (ГОСТ 19705-89), то на клеммах ШРАЖ напруга буде 111-112 В, що недопустимо для джерел електроенергії.

Отже, регулювати напругу для виконання технічних вимог доцільно в т. В (на борту ЛА) (рис. 2.4). Цю задачу можна вирішити шляхом підключення вимірювального пристрою на клемми ШРАЖ. Або створити систему керування (регулювання напруги) з введенням сигналу по струму навантаження (чим більше навантаження, тим більша напруга).

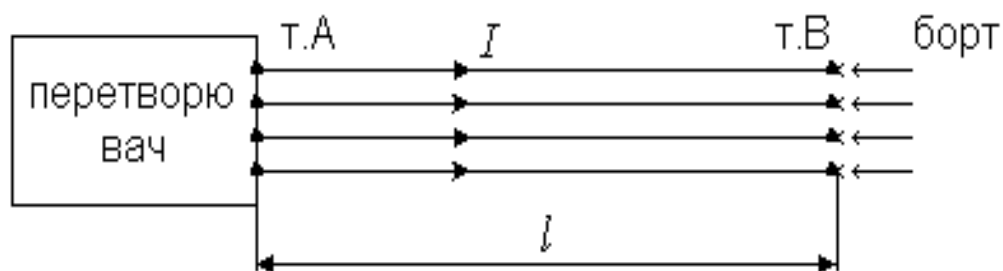


Рис. 2.4. Живлення борту ЛА трифазним струмом перетворювача

Забезпечення синусоїдності кривої вихідної напруги для перетворювача також викликає проблеми. Форма інвертованої напруги як лінійної так і фазної – прямокутна. Лінійна напруга містить крім основної вищі непарні гармоніки – п'яту, сьому, одинадцяту і т.д. Фазна напруга містить всі непарні гармоніки, починаючи з третьої. Для фільтрації використовуються керовані дроселі та ланцюги, що налаштовані в резонанс вищезгаданих гармонік. Кожний ланцюг містить дросель і групу конденсаторів, як, наприклад, в АПЧС-60У1. Загальними недоліками фільтрів є велика маса і габарити, що в свою чергу значно збільшує масу і габарити

перетворювача. Окрім того при застосуванні фільтрів в ланцюгу інвертор-навантаження можуть виникнути складні ферорезонансні або автоколивальні процеси.

Як свідчить аналіз всіх перетворювачів, вибір силових елементів перетворювача і системи керування повинен здійснюватись виходячи не тільки з умов необхідної синусоїдності напруги, надійності роботи, а і необхідних параметрів перехідних процесів.

У відповідності ГОСТ 19705-89 при комутації навантаження мінімальна напруга не повинна бути нижчою 60 В, а максимальна напруга – не перевищувати 160 В. Тривалість мінімальної і максимальної напруги не має перевищувати 10 мс. В АПЧС-60У1 ця вимога забезпечується за допомогою блоку захисту від провалу напруги (рис. 2.5).

Даний пристрій працює лише при перехідних процесах. Так як він виконаний на тиристорах, то потребує окремої системи керування. Отже застосування даного блоку ускладнює не лише схему перетворювача, але й загальну систему керування.

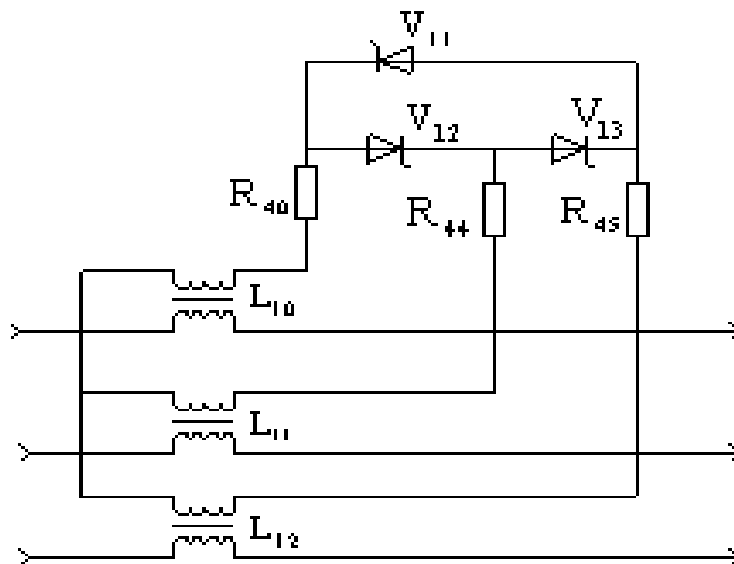


Рис. 2.5. Електрична схема блоку захисту від провалу напруги

Якість електроенергії СЕП ЛА.

Одним із основних вимог, які пред'являють до бортових СЕП ЛА, є надійне та безперебійне живлення приймачів енергією заданої якості. Якість електроенергії

бортових систем електропостачання повинно відповідати вимогам ОТТ ВПС, ГОСТ 19705-89 та іншим документам. Вказані документи визначають види систем електропостачання, допустимі до установки на ЛА, а також параметри, які характеризують якість електроенергії систем при їх роботі як в усталених так і в перехідних режимах.

Слід відмітити, що вимоги до якості електричної енергії, встановлені ГОСТ 19705-89, знаходяться у відповідності з міжнародними вимогами ІСАО.

В якості основних СЕП на ЛА, як вже було відмічено, дозволяється застосування систем змінного трифазного струму напругою 115/220 В частотою 400 Гц та постійного струму напругою 27 В.

В системах змінного струму базовими параметрами прийняті параметри фази.

При пускові авіадвигунів та бортових допоміжних силових установок від наземних джерел напруга може знижуватись до 10 В протягом не більше 1 с та до 14 В протягом не більше 5 с з відновленням напруги до значення не менше 16 В протягом не більше 40 с.

Параметри, які визначають якість електроенергії наземних авіаційних джерел повинні відповідати приведеним значенням для систем змінного та постійного струму. При цьому в якості точки регулювання повинні бути прийняті виводи бортового штепсельного роз'єму аеродромного живлення.

Параметри перехідних процесів частоти та напруги доцільно оговорювати для комутації навантаження від 10 до 100% номінальної потужності джерела. Коефіцієнт потужності навантаження змінного струму повинен дорівнювати 0.8-1.

Для джерел постійного струму слід допустити можливість короткочасного перенавантаження (до 160%) з низьким коефіцієнтом потужності (пуск асинхронних двигунів). При цьому сумарна активна потужність не повинна перевищувати номінальної потужності джерела.

Для систем постійного струму режим перенавантажень доцільно обговорити з умов забезпечення електростартерного пуску ГТД. При прямому електростартерному пуску ГТД (по системі 24 В) параметри електроенергії на клеммах роз'єму аеродромного живлення повинні відповідати ГОСТ 19705-89.

На перспективних ПС можливе застосування систем електропостачання постійного струму підвищеної напруги 270 (240) В, а також змінного трифазного струму напругою 220/380 (380/600) В.

Відповідно НАДЕ повинні виробляти електроенергію перелічених видів.

РОЗДІЛ 3

ВИБІР ТА РОЗРАХУНОК СИЛОВОЇ ЧАСТИНИ УДОСКОНАЛЕНОГО СТАТИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЧАСТОТИ ЗМІННОГО СТРУМУ

3.1. Аналіз гармонічних складових вихідних струмів перетворювача та магніторушійної сили ТОМП

Як показано вище, а також що слідує із структурної схеми типових СПЧ, одним із основних елементів перетворювача є трансформаторно-фільтруючий пристрій, який включає в себе трансформатор, який забезпечує узгодження напруги промислової мережі змінного струму з напругою на виході перетворювача, а також фільтри, які забезпечують синусоїдність вихідної напруги при всіх умовах та режимах роботи перетворювача. В якості трансформатора може застосовуватись трифазний трансформатор або автотрансформатор звичайної конструкції. При цьому вторинні обмотки трансформатора або обмотки автотрансформатора повинні з'єднуватись „зіркою”, щоб забезпечувати живлення однофазних приймачів напругою 115 В.

В якості трансформатора або автотрансформатора можуть бути використані також трансформатори з обертовим магнітним полем. В цьому випадку трансформатор може бути виконаний з різним числом фаз первинної та вторинної обмотки. В таких трансформаторах забезпечується магнітне підсумовування магніторушійних сил, струмів інвертора, що може спростити рішення питань отримання синусоїдальної напруги. Крім того, обмотки таких трансформаторів або автотрансформаторів можуть виконуватись з вкороченим шагом, з дрібним числом пазів на полюс та фазу і т.п., що також може сприяти спрощенню отримання синусоїдальної напруги. В зв'язку з цим проведемо аналіз гармонічних складових вихідних струмів перетворювача та магніторушійної сили ТОМП.

Виконаємо порівняльний гармонічний аналіз випрямленої напруги при трифазному і п'ятифазному випрямленні.

Вихідна напруга інвертора має прямокутну форму. Як показує аналіз та експериментальні дослідження з достатньою для практики точністю можна прийняти струм також прямокутним. Тоді в трифазному перетворювачі з тривалістю провідності тиристора 120° гармонічна складова струму буде:

$$\begin{aligned} I_{\phi 3} &= \frac{4I_m}{\pi} \left(\sin \frac{120}{2} \cos \omega t + \frac{1}{3} \sin \frac{3 \cdot 120}{2} \cos 3\omega t + \frac{1}{5} \sin \frac{5 \cdot 120}{2} \cos 5\omega t + \frac{1}{7} \sin \frac{7 \cdot 120}{2} \cos 7\omega t + \dots \right) = \\ &= \frac{4I_m}{\pi} \left(\sin 60 \cos \omega t + \frac{1}{3} \sin 180 \cos 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 300 \cos 5\omega t + \frac{1}{7} \sin 420 \cos 7\omega t + \dots \right) = \frac{4I_m}{\pi} \times \\ &\times \left(0,866 \cos \omega t - \frac{1}{5} \cdot 0,866 \cos 5\omega t + \frac{1}{7} \cdot 0,866 \cos 7\omega t + \dots \right) = 1,1 \cos \omega t - 0,22 \cos 5\omega t + 0,16 \cos 7\omega t + \dots \end{aligned}$$

Для п'ятифазного перетворювача з тривалістю провідності транзистора 72° гармонічна складова струмів визначається таким виразом:

$$\begin{aligned} I_{\phi 5} &= \frac{4I_m}{\pi} \left(\sin \frac{72}{2} \cos \omega t + \frac{1}{3} \sin \frac{3 \cdot 72}{2} \cos 3\omega t + \frac{1}{5} \sin \frac{5 \cdot 72}{2} \cos 5\omega t + \frac{1}{7} \sin \frac{7 \cdot 72}{2} \cos 7\omega t + \dots \right) = \\ &= \frac{4I_m}{\pi} \left(\sin 36 \cos \omega t + \frac{1}{3} \sin 108 \cos 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 180 \cos 5\omega t + \frac{1}{7} \sin 252 \cos 7\omega t + \dots \right) = \frac{4I_m}{\pi} \times \\ &\times \left(0,5878 \cos \omega t + \frac{1}{3} \cdot 0,9511 \cos 3\omega t - \frac{1}{7} \cdot 0,9511 \cos 7\omega t + \dots \right) = 0,5878 \cos \omega t + 0,317 \cos 3\omega t - \\ &- 0,136 \cos 7\omega t + \dots \end{aligned}$$

Приймаємо, що МРС фази пропорційна струму фази, тобто $F_{\phi m} \equiv I_{\phi}$, тоді при симетричній системі та відповідно рівних струмах фаз МРС в трифазній системі дорівнюють:

$$\begin{aligned} F_A &= F_{\phi \max} \sin \omega t \cos \nu a; \\ F_B &= F_{\phi \max} \sin(\omega t - 120^\circ) \cos \nu(a - 120^\circ); \\ F_C &= F_{\phi \max} \sin(\omega t - 240^\circ) \cos \nu(a - 240^\circ), \end{aligned}$$

де ν – порядковий номер гармоніки.

Рішення даної системи показує, що МРС трифазного ТОМП містить 5,7,11 та інші високочастотні гармоніки, крім 3 та кратні їй.

Для п'ятифазної системи фазні МРС дорівнюють:

$$F_A = F_{\phi_{\max}} \sin \omega t \cos \nu a;$$

$$F_B = F_{\phi_{\max}} \sin(\omega t - 72^\circ) \cos \nu(a - 72^\circ);$$

$$F_C = F_{\phi_{\max}} \sin(\omega t - 144^\circ) \cos \nu(a - 144^\circ);$$

$$F_D = F_{\phi_{\max}} \sin(\omega t - 216^\circ) \cos \nu(a - 216^\circ);$$

$$F_E = F_{\phi_{\max}} \sin(\omega t - 288^\circ) \cos \nu(a - 288^\circ).$$

Рішення даної системи показує, що МРС першої гармоніки дорівнює $\frac{5}{2} F_m \cos(\omega t - a)$. Гармоніки 3,5,7 та інші дорівнюють нулю. Тобто при застосуванні п'ятифазного перетворювача та відповідно п'ятифазного ТОМП значно спрощується проблема отримання синусоїдної напруги.

Отже, в якості трансформатора вибираємо трансформатор-перетворювач числа фаз, тобто перетворювач з п'ятифазною первинною обмоткою та вторинною трифазною обмоткою (рис. 2.2).

3.2. Аналіз та вибір трансформатора з обертальним магнітним полем

ТОМП може бути виконаний з шихтованим або витим магнітопроводом. Цей та інший можуть бути керованим та некерованим.

Розглянемо складений з трьох частин шихтованого магнітопроводу керованого трансформатора з первинною та вторинною трифазними обмотками ω_1 та ω_2 звичайного типу, розташованими в двох концентричних рядах пазів по колу. В тих же пазах розміщені сторони багатовиткових секцій тороїдальної обмотки $\omega_{o.n.}$, призначеної для підмагнічування випрямленим струмом проміжного кільцевого магнітного шунта. Магнітопровід керованого трансформатора складається із зовнішнього (полого) шихтованого циліндра з трапецеїдальними пазами на внутрішній циліндричній поверхні для первинної розподіленої трифазної

обмотки ω_1 із вкороченим шагом, внутрішнього шихтованого (полого) циліндра з трапецеїдальними пазами на зовнішній циліндричній поверхні для вторинної багатофазної або трифазної обмотки ω_2 , розподіленої в пазах по колу з вкороченим шагом, проміжного магнітного шунта, виконаного у вигляді шихтованого (полого) циліндра з пазами на внутрішній та зовнішній циліндричних поверхнях для тороїдальної обмотки підмагнічування шунта $\omega_{o.n.}$.

Основними розрахунковими розмірами магнітопроводу керованого трансформатора є діаметр кола стику зубців внутрішньої та проміжної частин магнітопроводу D , а також вісьова довжина l шихтованого пакету. Для зменшення основних розмірів та маси магнітопроводу трансформатора його первинна та вторинна обмотки виконуються двополюсними.

Діапазон регулювання вторинної напруги розширюється при зменшенні величини магнітного потоку $\Phi_{\text{я}2}$, який зчеплений з вторинною обмоткою при мінімальному струмі підмагнічування шунта. При цьому зазор між зубцями внутрішнього та проміжної частин магнітопроводу δ_2 повинен бути в 3...4 рази більшим невеликого технологічного зазору $\delta_1=0.03...0.05$ мм між зубцями зовнішньої та проміжної частин. В цьому випадку при дуже малому струмі в обмотці підмагнічування шунта та однакових радіальних розмірах внутрішнього ярма $h_{\text{я}2}$ та шунта $h_{ш}$ близько 80% магнітного потоку зовнішнього ярма $\Phi_{\text{я}1}$ замикається через шунт і тільки близько 20% – через внутрішнє ярмо. В зв'язку з цим ЕРС, що індукуються в фазах вторинної обмотки, складають близько 20% своїх максимальних значень, так як

$$\Phi_{ш \max} \approx 0.8\Phi_{\text{я}1}, \text{ а } \Phi_{\text{я}2 \min} \approx 0.2\Phi_{\text{я}1}.$$

При максимальному струмі в обмотці підмагнічування шунта його магнітний опір із-за сильного насичення постійним потоком дуже великий, тому

$$\Phi_{ш \min} \approx 0.04\Phi_{\text{я}1}, \text{ а } \Phi_{\text{я}2 \max} \approx 0.96\Phi_{\text{я}1}.$$

Величина магнітного потоку, зчепленого з первинною обмоткою $\Phi_1 = 2\Phi_{\text{я}1}$ при незмінній величині напруги на клеммах первинної обмотки U_1 , практично постійна,

якщо не враховувати невеликі коливання величини втрати напруги в опорах обмотки. З цього слідує, що діапазон зміни магнітного потоку, зчепленого з вторинною обмоткою барабанного типу $\Phi_2 = 2\Phi_{я2}$ та індукуємих ним ЕРС у фазах вторинної обмотки $E_{\Phi 2}$ у випадку, який розглядаємо, дорівнює

$$D_e = E_{2\max} / E_{2\min} = \Phi_{2\max} / \Phi_{2\min} = 4.8.$$

До недоліків керованих трансформаторів з шихтованим магнітопроводом з круглих штампованих листків з пазами та порівняно великим центральним круглим отвором слід віднести складність та велику трудоемність технології виробництва, а також підвищену витрату трансформаторної сталі. При штамповці круглих листків з пазами та внутрішнім отвором більш 30% трансформаторної сталі перетворюється у відходи.

Втрати сталі у вигляді відходів при виробництві керованих трансформаторів з магнітним полем, що обертається, можна зменшити майже в 3 рази, якщо замість шихтованих магнітопроводів виконувати виті із стрічкової трансформаторної сталі циліндричні складові магнітопроводи з радіальними відкритими пазами на торцевих стикових поверхнях. При цьому широкі листки ріжуть на декілька більш вузьких смужок потрібної ширини і відходами є тільки невелика частина сталі, пропорційна загальному об'єму пазів, профрезованих на торцях витих (полих) циліндрів складового (з трьох частин) магнітопроводу.

Радіальні пази на торцях (полих) витих циліндрів можна зробити штамповкою в процесі навивки (полого) циліндра. Для цього необхідно лише узгодити роботу штампу з роботою навивочного верстата так, щоб після кожного повороту валу верстата на кут $\alpha = 360^\circ / z$ штамп вирубав в момент короткочасної зупинки один паз на одній стороні стрічки або по одному пазу на обох сторонах, якщо пази повинні бути на обох торцях (полого) витого циліндра.

Конструкція керованого трифазного трансформатора з витим складеним із трьох частин циліндричним магнітопроводом показана в повздовжньому та поперечному розрізах на рис. 3.1

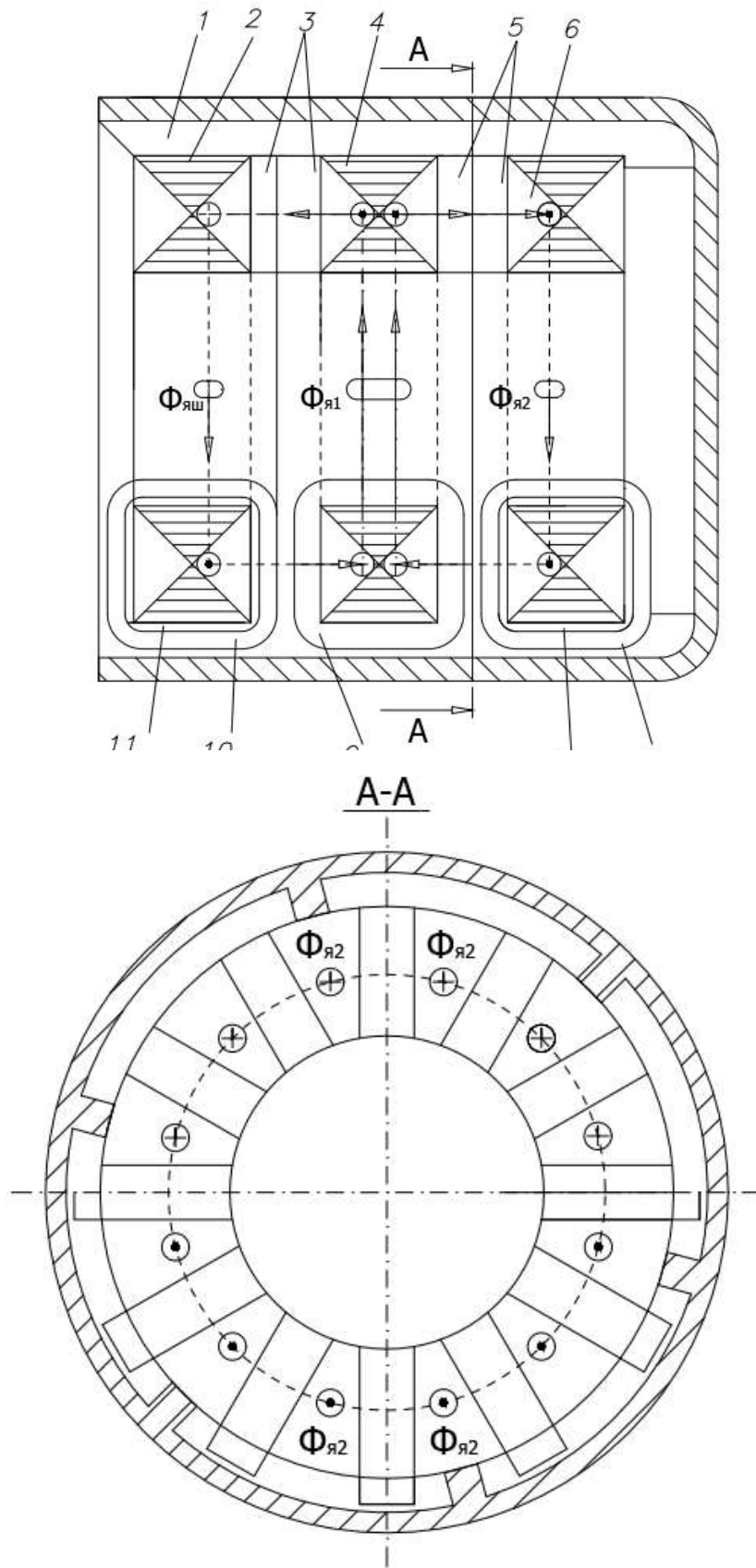


Рис. 3.1. Витий складений магнітопровід керованого трифазного трансформатора

На рис. 3.1 позначено:

- 1 – циліндричний корпус з внутрішніми вісєвими ребрами,
- 2 – витий (полий) циліндр із трансформаторної сталі з радіальними пазами на одному торці, який виконує роль магнітного шунта,
- 3 – радіальні відкриті пази на стикових торцях крайнього та середнього витих циліндрів,
- 4 – ярмо середньої (первинної) частини складового магнітопроводу,
- 5 – радіальні відкриті пази на торцях середнього та крайнього правого витків циліндрів,
- 6 – ярмо вторинної частини складового магнітопроводу,
- 7 – вторинна трифазна або багатофазна обмотка тороїдального типу,
- 8 – тороїдальна обмотка підмагнічування вторинного ярма випрямленим струмом,
- 9 – первинна трифазна тороїдальна обмотка,
- 10 – обмотка підмагнічування магнітного шунта,
- 11 – трифазна тороїдальна обмотка, яка живить через випрямляч обмотку підмагнічування вторинного ярма.

На перерізі А-А показаний вигляд з торця вторинної частини складного магнітопроводу, число радіальних пазів та їх ширина на доторкаючихся торцях всіх частин складного магнітопроводу однакові.

З метою зменшення зазорів в стиках частин складового магнітопроводу стикові торці повинні достатньо точно оброблятися, а для запобігання зсуву зубців під дією електромагнітного моменту, який обертається, всі три обмотані частини вставляються в немагнітний циліндричний корпус та закріплюються в ньому гвинтами.

Враховуючи, що в перетворювачі, який розроблюється, регулювання вихідної напруги забезпечується керованим випрямлячем, тоді в якості трансформатора вибираємо некерований трансформатор з шихтованим сердечником.

Вибір даного трансформатора зумовлений тим, що його можна виконати на основі магнітопроводу асинхронної машини. При цьому обмотки трансформатора

можна виконати із вкороченим шагом, що також буде сприяти покращенню синусоїдності напруги.

3.3. Розрахунок силового трансформатора удосконаленого статичного перетворювача частоти змінного струму

Вихідні дані:

$$U_1=158 \text{ В,}$$

$$I_1=95 \text{ А,}$$

$$U_2=130 \text{ В,}$$

$$I_2=167 \text{ А,}$$

$$m_2=3, \quad m_1=5,$$

$$\cos \varphi_2=0.8,$$

$$\cos \varphi_1=0.75,$$

$$\eta=0.93.$$

Трансформатор некерований, шихтований сердечник, обмотки w_1 та w_2 в одних і тих же пазах.

$$S'_1 = \kappa_e \cdot S_1 = 0.95 \cdot 75 = 67.5 \text{ кВА}$$

$$B_\delta=0.75, \quad A=300 \text{ А/см,} \quad \alpha_i=0.715$$

$$\kappa_{\sigma\sigma} = 0.92, \quad \kappa_\phi = 1.1, \quad \lambda = \frac{l}{D} = 1$$

Діаметр кола полого циліндричного магнітопроводу, який складається з трьох частин:

$$D = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot \kappa_e \cdot S'_1}{\kappa_\phi \cdot \kappa_{\sigma\sigma} \cdot \alpha \cdot B_\delta \cdot A \cdot f \cdot \lambda}} = \sqrt[3]{\frac{6.1 \cdot 10^7 \cdot 67.5}{0.715 \cdot 1.1 \cdot 0.92 \cdot 0.75 \cdot 300 \cdot 24000 \cdot 1}} = 11$$

$$D = 11 \text{ см} \quad l = 11 \text{ см}$$

Полюсне ділення: $\tau = \frac{\pi \cdot 11}{2} = 17.27 \text{ см}$

Величина магнітного потоку в зазорі :

$$\Phi_{\delta} = \alpha \cdot \tau \cdot B_{\delta} \cdot l = 0.75 \cdot 17.27 \cdot 0.75 \cdot 11 = 9.465 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}$$

Число витків в фазі первинної обмотки:

$$w_{\phi 1} = \frac{\kappa_e \cdot U_1}{4 \cdot \kappa_{\phi} \cdot \kappa_{об} \cdot \Phi_{\delta} \cdot f} = \frac{0.9 \cdot 158}{4 \cdot 1.1 \cdot 0.92 \cdot 400 \cdot 9.465 \cdot 10^{-3}} = 9, \quad w_{\phi 1} = 9$$

Число витків в фазі і в секції вторинної обмотки:

$$w_{\phi 2} = \frac{\kappa_e \cdot U_2}{4 \cdot \kappa_{\phi} \cdot \kappa_{об} \cdot \Phi_{\delta} \cdot f} = \frac{1.05 \cdot 130}{4 \cdot 1.1 \cdot 0.92 \cdot 400 \cdot 9.465 \cdot 10^{-3}} = 10, \quad w_{\phi 2} = 10$$

$$D = 11 \text{ см}; \quad l = 11 \text{ см}$$

Приймаємо первинну та вторинну обмотки з цілим числом пазів на полюс та фазу. Тоді :

$$Z = 2p m_1 q_1 = 2p m_2 q_2$$

$$2 \cdot 1 \cdot 5 \cdot q_1 = 2 \cdot 1 \cdot 3 \cdot q_2 \quad 10q_1 = 6q_2$$

Відповідно:

$$Z = 30; \quad q_1 = 3; \quad q_2 = 5$$

$$w_{\phi 1} = 9; \quad w_{\phi 2} = 10$$

$$u_{n1} = 3; \quad u_{n2} = 2$$

Таким чином, при цілих q_1 та q_2 число пазів повинно бути кратним 10 та 6.

Тобто 30, 60 і т.д. приймаємо $z = 30$.

$$\text{Зубцеве ділення: } t_z = \frac{\pi \cdot D}{z} = \frac{\pi \cdot 11}{30} = 1.15 \text{ см}$$

$$\text{Щільність струму: } j = 10 \text{ А/мм}^2$$

$$g_1 = 9.5 \text{ мм}^2 \longrightarrow 4 \times 2.8 = 10.85$$

$$g_2 = 16.7 \text{ мм}^2 \longrightarrow 5 \times 3.55 = 17.2$$

Вибираємо провід ПЕТВТ, з урахуванням ізоляції, розміри сторін прямокутного проводу будуть :

$$q_1 = 5 \times 2.5 = 11.95 \rightarrow 5.52 \times 3.09$$

$$q_2 = 5 \times 3.55 = 17.2 \rightarrow 5.52 \times 4.18$$

Паз вибираємо відкритий, прямокутний. Пазова ізоляція – приймаємо полімідну плівку товщиною 0.1 мм, два-три шари – 0.2 ÷ 0.3 мм . Тоді розміри паза будуть:

$$\text{Ширина паза: } b_n = 6 \text{ мм}$$

$$\text{Ширина зубця: } b_z = 5.5 \text{ мм}$$

$$\text{Висота паза заповненого проводу: } h_n = 3.09 \times 3 + 4.18 \times 2 = 9.27 + 8.36 = 17.63 \text{ мм}$$

$$\text{Висота паза: } h_n = 2 \text{ см}$$

Для розрахунку довжини лобових частин обмоток визначаємо:

$$\tau_y = \frac{\pi(D + h_n + h_k) \cdot y_n}{z} = \frac{\pi(11 + 2) \cdot 9}{30} = 12.246 \text{ см}$$

$$\sin a_c = \frac{0.6 + 0.1}{t_c};$$

$$t_c = \frac{\pi(11 + 0.2)}{z} = 1.17$$

$$\sin a_c = \frac{0.7}{1.17} \approx 0.6$$

Таким чином, довжина лобової частини обмотки буде дорівнювати:

$$l_s = \frac{12.246}{1.8} + 1 + 2 \cong 18 \text{ см}$$

$$\text{Довжина витка обмотки: } l_{\text{вср}} = 2(11 + 18) = 58 \text{ см}$$

$$\text{Довжина фази: } l_{\phi 1} = 522 \text{ см}$$

$$\text{Активний опір первинної обмотки: } R_{\phi 1} = \frac{5.22}{57 \cdot 11.95} = 0.00766 \text{ Ом}$$

$$\text{При температурі } 100^{\circ}\text{C: } R_{\phi 100} = 0.01 \text{ Ом}$$

Втрата потужності в первинній обмотці (фазі) та в п'ятифазній обмотці:

$$\Delta P_{\phi} = 95^2 \cdot 0.01 = 90.25 \text{ Вт}$$

$$\Delta P_{.m1} = 451.25 \text{ Вт}$$

Довжина фази вторинної обмотки: $l_{\phi 2} = 580 \text{ см}$

Активний опір вторинної обмотки: $R_{\phi 2} = \frac{5.8}{57 \cdot 17.2} = 0.0059 \text{ Ом}$

При температурі 100°C : $R_{\phi 2} = 0.0078 \text{ Ом}$

Втрата потужності у вторинній обмотці:

$$\Delta P_{.m2} = 3 \cdot 167^2 \cdot 0.0078 = 652.6 \text{ Вт}$$

$$z = 30$$

При $\Phi_1 = 9.75 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}$ висота спинок статора h_{ja1} і ротора h_{ja2} будуть дорівнювати:

$$h_{ja} = \frac{\Phi_1 \cdot x}{2l \cdot \kappa_{z.c} \cdot B_{ja}} = \frac{9.75 \cdot 10^{-3} \cdot 10^4}{2 \cdot 11 \cdot 0.95 \cdot 1.5} = 3.11 \text{ см}$$

$$h_{ja} = 3 \text{ см}; \quad B_{ja} = 1.55 \text{ см}; \quad h_{ja1} = h_{ja2} = 3 \text{ см}$$

$$\text{Тоді:} \quad D_{\text{зовн}} = 21 \text{ см}; \quad D_{\text{вн}} = 5 \text{ см}; \quad l = 11 \text{ см}$$

При визначенні маси магнітопроводу визначаємо об'єм паза та пазів:

$$Q_{\text{паза}} = 2 \cdot 0.6 \cdot 11 = 13.2 \text{ см}^3 \quad Q_{\text{п}} = 396 \text{ см}^3$$

$$Q = \pi \cdot 11(10.5^2 - 2.5^2) = 3592.16 = 3196.16$$

$$\text{Маса сталі магнітопроводу:} \quad M_{\text{ст}} = 3196.16 \cdot 7.65 \cdot 10^{-3} = 24.45 \text{ кг}$$

Маса міді первинної обмотки:

$$M_{\text{мф1}} = l_{\phi 1} \cdot z \cdot q_1 \cdot \omega_{\phi 1} \cdot 8.9 \cdot 10^{-3} = 522 \cdot 0.1195 \cdot 8.9 \cdot 10^{-3} = 0.555 \text{ кг}$$

$$M_{\phi 1} = 2.775 \text{ кг}$$

Маса міді вторинної обмотки:

$$M_{\text{мф}2} = 588 \cdot 0.172 \cdot 8.9 \cdot 10^{-3} = 0.9 \text{ кг}$$

$$M_{\text{ф}2} = 2.7 \text{ кг}$$

Загальна маса обмоточної міді:

$$M_{\text{м}} = M_{\text{ф}1} + M_{\text{ф}2} = 2.775 + 2.7 = 5.475 \text{ кг}$$

Загальна сума активних металів:

$$M_{\text{ак.м}} = 29.925 \text{ кг}$$

При конструктивному коефіцієнті рівному 1.5, маса трансформатора буде дорівнювати: $M_{\text{тр}} \cong 45 \text{ кг}$

Вибираємо сталь 2013.

$$\beta = 1.4; \quad \kappa_{\text{млм}} = 1.7; \quad P_{1.0/50} = 1.75 \text{ Вт/кг}$$

Тоді втрати в сталі будуть дорівнювати:

$$P_{\text{ст1}} = \kappa_{\text{млм}} \cdot P_{1.0/50} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^{\beta} \cdot B_{\text{ст1}}^2 \cdot G_{\text{ст1}}$$

$$P_{\text{ст}} = 1.7 \cdot 1.75 \cdot \left(\frac{400}{50}\right)^{1.4} \cdot 1.55 \cdot 24.45 = 3836 \text{ Вт}$$

$$P_{\text{ст}} = 3836 \text{ Вт}; \quad P_{\text{м}} = 1104 \text{ Вт}$$

Сумарні втрати: $\Delta P = 4940 \text{ Вт}$

При коефіцієнті потужності навантаження $\cos \varphi_2 = 0.8$ ККД буде дорівнювати:

$$\eta = \frac{60 \cdot 0.8}{60 \cdot 0.8 + 4.940} \cong 0.91$$

При коефіцієнті потужності навантаження $\cos \varphi_2 = 1$ ККД буде дорівнювати:

$$\eta = \frac{60}{64.94} \cong 0.92$$

Максимальна індукція з зубці:

$$B_{z \max} = \frac{B_{\delta} \cdot \pi \cdot D}{b_z \cdot \kappa_{zc} \cdot \gamma_B \cdot z} = \frac{0.72 \cdot \pi \cdot 11}{0.55 \cdot 0.95 \cdot 0.94 \cdot 30} = 1.687 \text{ Тл}$$

МРС первинної обмотки буде дорівнювати :

$$F = \pi \cdot D_{cp1} \cdot H_{\gamma 1} + \pi \cdot D_{cp2} \cdot H_{\gamma 2} + 2 \cdot h_z \cdot H_z + 1.6 \cdot \delta \cdot B_{\delta} = \pi \cdot 18 \cdot 6.3 + \pi \cdot 8 \cdot 6.3 + 2 \cdot 2 \cdot 14 + \\ + 1.6 \cdot 0.01 \cdot 0.72 = 356 + 158 + 56 + 115 = 685$$

Тоді намагнічуючий струм трансформатора (струм х.х.) буде:

$$I_{\mu 0} = \frac{F_0}{0.9 \cdot m_1 \cdot w_{\phi} \cdot \kappa_{об1}} = \frac{685}{0.9 \cdot 5 \cdot 9 \cdot 0.92} = 18.4 \text{ А}$$

Приведений струм вторинної обмотки:

$$I_2' = I_2 \frac{w_2 \cdot m_2 \cdot \kappa_{об2}}{w_1 \cdot m_1 \cdot \kappa_{об1}} = 167 \frac{10 \cdot 3}{9 \cdot 5} = 111.3 \text{ А}$$

Струм первинної обмотки при номінальному навантаженні:

$$I_{1н} = \sqrt{I_2'^2 + I_{\mu 0}^2 - 2I_2' I_{\mu 0} \cos(90^0 + 10^0)} = \sqrt{111.3^2 + 18.4^2 - 2 \cdot 111.3 \cdot 18.4 \cdot \cos 100} = \\ = \sqrt{12391 + 338 + 711} = 116 \text{ А}$$

Коефіцієнт потужності буде:

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{S_1} = \frac{(P_2 + \Sigma \Delta P)}{S_1} = 0.725 .$$

Для визначення індуктивного опору обмоток проведемо розрахунок пазових провідностей за формулою:

$$\lambda_n = \kappa_{\beta} \left(\frac{h_1}{3b_n} + \frac{h_2}{b_n} \right), \quad \kappa_{\beta} = 1$$

Пазова провідність первинної обмотки:

$$\lambda_{n1} = 1 \left(\frac{18}{3 \cdot 6} + \frac{2}{6} \right) = 1.33 - \text{виток}$$

$$\lambda_{n1} = 0.25 \left[\frac{2.67 \cdot 9}{6} + 4 \left(\frac{2 \cdot 2 + 0.1}{6} + \frac{2}{6} \right) \right] = 0.25 [4 + 4] = 2$$

Пазова провідність вторинної обмотки:

$$\lambda_{n2} = 0.25 \left[\frac{4.67 \cdot 8}{6} + 0.68 \right] \approx 1.4$$

Провідність лобових частин:

$$\lambda_{r1} = \left(0.34 - 0.22 \cdot 1 \cdot \frac{17.27}{18} \right) \cdot 3 = 0.3$$

$$\lambda_{r2} = 0.6$$

Тоді індуктивний опір первинної та вторинної обмоток:

$$x_1 = 15.8 \cdot 10^{-8} \cdot f \cdot w_{\phi 1}^2 \cdot h_{\gamma} \cdot \lambda_1 / q_1 = \frac{1.58 \cdot 400 \cdot 110 \cdot 9^2}{1 \cdot 3 \cdot 10^8} \cdot 6.8 = 0.13 \text{ Ом}$$

$$x_2 = 15.8 \cdot 10^{-8} \cdot f \cdot h_{\gamma} \cdot \lambda_2 \cdot w_{\phi 2}^2 / q_2 = \frac{1.58 \cdot 400 \cdot 110 \cdot 10^2}{1 \cdot 5 \cdot 10^2} \cdot 4 = 0.06 \text{ Ом}$$

Падіння напруги:

$$\Delta U_{x1} = \frac{I_1}{x_1} \cong 13 \text{ В}; \quad \Delta U_{x2} = \frac{I_2}{x_2} \cong 9.3 \text{ В}$$

$$x_1 = 0.13 \text{ Ом} \quad R_1 = 0.01 \text{ Ом}$$

$$x_2 = 0.06 \text{ Ом} \quad R_2 = 0.008 \text{ Ом}$$

Повний опір первинної та вторинної обмоток:

$$z_1 = \sqrt{R_1^2 + x_1^2} = \sqrt{0.01^2 + 0.13^2} = 0.13 \text{ Ом}$$

$$z_2 = \sqrt{R_2^2 + x_2^2} = \sqrt{0.008^2 + 0.06^2} = 0.06 \text{ Ом}$$

Падіння напруги:

$$\Delta U_1 = 116 \cdot 0.13 = 15 \text{ В}; \quad \Delta U_2 = 167 \cdot 0.06 = 10 \text{ В}$$

Коефіцієнт трансформації по струму:

$$\kappa_i = \frac{m_1 \cdot w_1 \cdot \kappa_{об1}}{m_2 \cdot w_2 \cdot \kappa_{об2}} = \frac{5 \cdot 9}{3 \cdot 10} = 1.5$$

Коефіцієнт трансформації по напрузі:

$$\kappa_u = \frac{w_1 \cdot \kappa_{об1}}{w_2 \cdot \kappa_{об2}} = \frac{9}{10} = 0.9$$

$$\kappa = \kappa_u \cdot \kappa_i = 0.9 \cdot 1.5 = 1.35$$

Приведені значення активного та індуктивного опору будуть дорівнювати:

$$x_2' = \kappa \cdot x_2 = 1.35 \cdot 0.06 = 0.081$$

$$r_2' = \kappa \cdot R_2 = 1.35 \cdot 0.008 = 0.0108$$

Опір к.з. трансформатора дорівнює:

$$z_k = r_1 + r_2' + j(x_1 + x_2') = 0.01 + 0.0108 + j(0.13 + 0.08)$$

$$z_k = 0.0208 + j0.21 = 0.21$$

Напруга к.з. трансформатора дорівнює:

$$U_{k1} = I_{IH} \cdot z_k = 116 \cdot 0.21 = 24.5 \text{ В}$$

Розрахункові параметри та характеристики трансформатора приведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Параметри трансформатора

P_2	I_2	I_1	$\cos \varphi_1$	η	ΔP_{M1}	ΔP_{M2}	ΔP_M	ΔP	S_1
-------	-------	-------	------------------	--------	-----------------	-----------------	--------------	------------	-------

0	0	18.4	0.26	0	16.93	0	16.93	3852.93	14.5
19.5	50	32.14	0.77	0.83	51.6	58.5	110.1	3946.1	25.4
39	100	66.3	0.75	0.9	219.8	234	453.8	4289.8	52.38
65.13	167	116	0.725	0.93	672.8	652.6	1325.4	5161.4	91.64

Прийmemo $I_2=100$ А, $I_2=50$ А, тоді $I_2'=I_2*0.67$ А.

$$I_{\mu 0}=18.4 \text{ А}, \quad I_1=116 \text{ А.}$$

$$I_2'=100*0.67=67 \text{ А}, \quad I_2'=50*0.67=33.$$

$$I_1 = \sqrt{I_2'^2 + I_{\mu 0}^2 - 2 \cdot I_2' \cdot I_{\mu 0} \cdot \cos 100}$$

$$I_1 = \sqrt{67^2 + 18.4^2 - 2 \cdot 67 \cdot 18.4 \cdot 0.1736} = 66.3 \text{ А}$$

$$I_1 = \sqrt{33.5^2 + 18.4^2 - 2 \cdot 33.5 \cdot 18.4 \cdot 0.1736} = 32.14 \text{ А}$$

$$R_{\phi 1}=0.01 \text{ Ом} - 5 \text{ фаз}$$

$$R_{\phi 2}=0.0078 \text{ Ом} - 3 \text{ фази}$$

$$\Delta P_{.m1} = 5 \cdot I_1^2 \cdot R_{\phi 1}$$

$$\Delta P_{.m2} = 3 \cdot I_2'^2 \cdot R_{\phi 2}$$

$$\Delta P_{.m} = \Delta P_{.m1} + \Delta P_{.m2}, \quad P_{ст}=3836 \text{ Вт}$$

$$\Delta P_{.m1} = 5 \cdot 18.4^2 \cdot 0.01 = 16.93 \text{ Вт}$$

$$\Delta P_{.m1} = 5 \cdot 32.14^2 \cdot 0.01 = 51.6 \text{ Вт}$$

$$\Delta P_{.m1} = 5 \cdot 66.3^2 \cdot 0.01 = 219.8 \text{ Вт}$$

$$\Delta P_{.m1} = 5 \cdot 116^2 \cdot 0.01 = 672.8 \text{ Вт}$$

$$\Delta P_{.m2} = 3 \cdot 50^2 \cdot 0.0078 = 58.5 \text{ Вт}$$

$$\Delta P_{.m2} = 3 \cdot 100^2 \cdot 0.0078 = 234 \text{ Вт}$$

$$\Delta P_{.m2} = 3 \cdot 167^2 \cdot 0.0078 = 652.6 \text{ Вт}$$

$$P_2 = 3 \cdot U_2 \cdot I_2, \quad S_1 = 5 \cdot U_1 \cdot I_1$$

$$S_1 = 5 \cdot 158 \cdot 116 = 91.64 \text{ кВА}, \quad P_2 = 3 \cdot 130 \cdot 167 = 65.13 \text{ кВА}$$

$$S_1 = 5 \cdot 158 \cdot 66.3 = 52.38 \text{ кВА}, \quad P_2 = 3 \cdot 130 \cdot 100 = 39 \text{ кВА}$$

$$S_1 = 5 \cdot 158 \cdot 32.14 = 25.4 \text{ кВА}, \quad P_2 = 3 \cdot 130 \cdot 50 = 19.5 \text{ кВА}$$

$$S_1 = 5 \cdot 158 \cdot 18.4 = 14.5 \text{ кВА}$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_2 + \Delta P_{.m}}{S_1}$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{65.13 + 1.325}{91.64} = 0.725,$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{39 + 0.453}{52.38} = 0.75$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{19.5 + 0.11}{25.4} = 0.77,$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{3.85 + 0.017}{14.5} = 0.26$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P}$$

$$\eta = \frac{65.13}{65.13 + 5.161} = 0.93;$$

$$\eta = \frac{39}{39 + 4.289} = 0.9;$$

$$\eta = \frac{19.5}{19.5 + 3.853} = 0.83$$

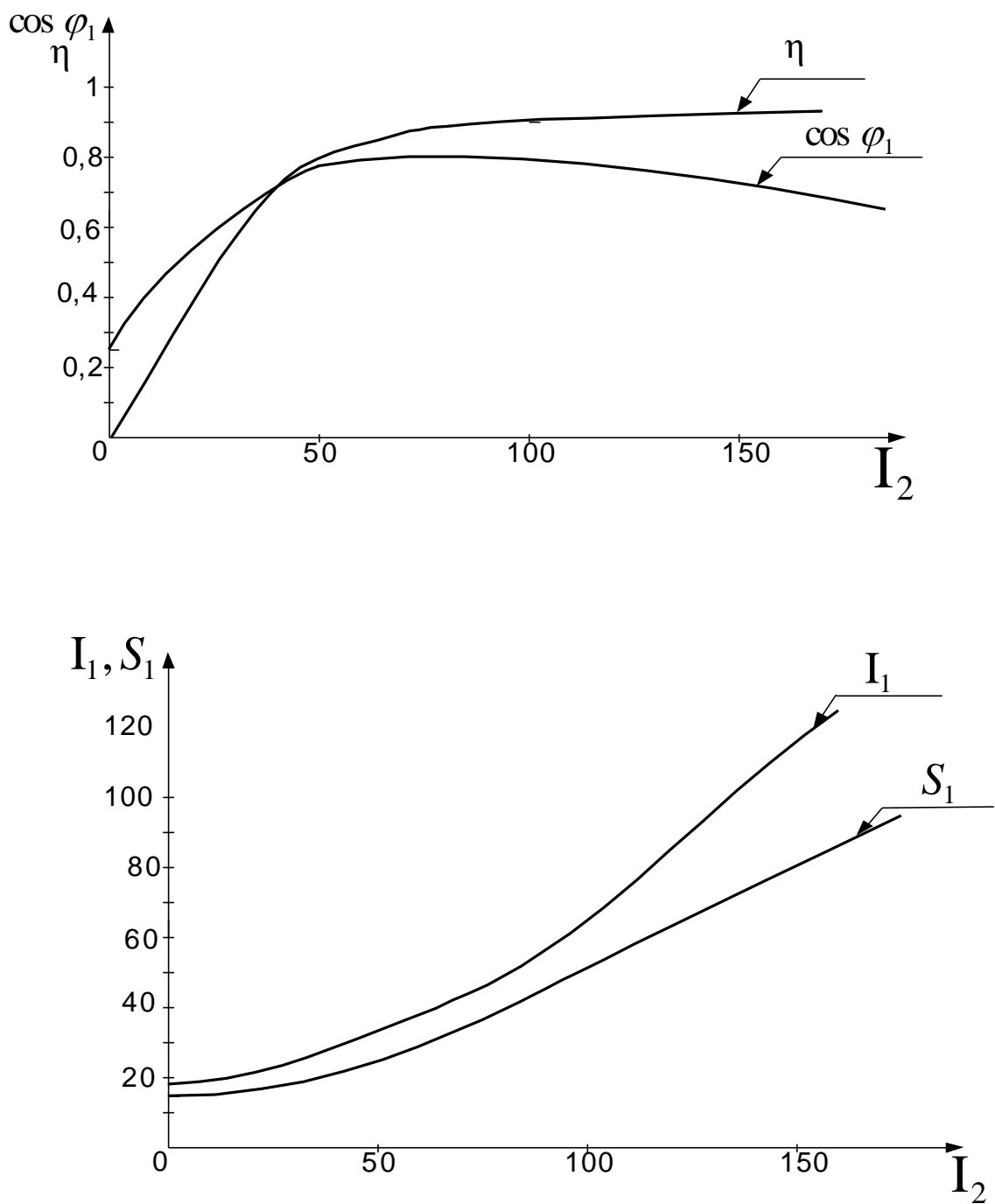


Рис.3.2. Характеристики трансформатора

3.4. Вибір та розрахунок керованого дроселя вихідного фільтра

Як показано вище, величина падіння напруги на силовому кабелі на НАДЕ може складати 3 В та більше, що ускладнює вирішення проблеми забезпечення необхідної

якості електроенергії на клеммах ШРАЖ. Вирішення цієї проблеми може бути забезпечено підключенням вимірювального органу регулятора напруги НАДЕ безпосередньо до клем ШРАЖ. Для цього потрібне використання окремого допоміжного кабелю, що знижує надійність роботи джерела та вимагає обов'язкового використання швидкодіючих систем захисту від перенапруги, тому що обрив хоча б одного з проводів вимірювального органу призводить до перенапруги в системі. Разом з тим для покращення форми кривої напруги, як показує досвід, на виході перетворювача (трансформатора) потрібна установка LC-фільтра.

Наявність дроселя на виході трансформатора може бути використано для регулювання загального опору лінії передач в залежності від струму навантаження. Тобто забезпечити стійкість падіння напруги незалежно від величини навантаження. З цією метою доцільно встановити керований дросель.

Існують різноманітні конструкції керованих дроселів. Для наземних джерел, як показує аналіз, найбільш доцільною конструкцією є конструкція дроселя з витим циліндричним магнітопроводом. Конструкція дроселя з витим циліндричним магнітопроводом з двох частин з шістьма радіальними пазами прямокутного перерізу на торці одного полого циліндра приведена на рис. 3.3. Для більшої наочності на рис. 3.3 зображені не всі, а тільки по три котушки трифазної обмотки підмагнічування.

Для монтажу окремо виготовлених котушок обмотки підмагнічування 5 на ярмі 4, воно розрізане по діаметру на дві частини, які після надівання на них ізольованих котушок щільно стискаються та зварюються по лініях розрізу 7. Після рівномірного розташування котушок 5 ярмо 4 стикується з зубцями ярма 1 так, щоб сторони котушок 5 ввійшли в відкриті пази 2 на торці ярма 1. Дві циліндричні частини складеного магнітопроводу з надітими на них котушками обмоток 3 та 5 міцно з'єднуються за допомогою торцевих дисків та центрального болта з гайкою.

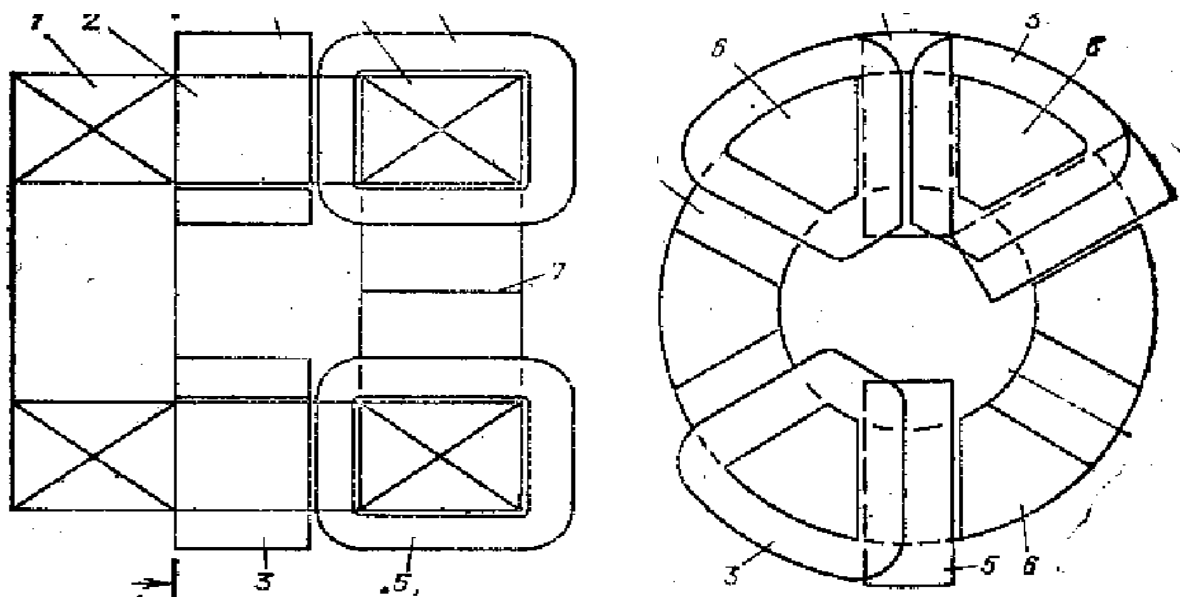


Рис.3.3. Конструкція керованого дроселя з витим магнітопроводом

На рисунку позначено:

- 1 – ярмо циліндричної частини магнітопроводу з більш широкої стрічки,
- 2 – радіальний паз прямокутного перерізу,
- 3 – діаметрально розташовані котушки однієї фази трифазної обмотки,
- 4 – циліндричне ярмо магнітопроводу з вузької стрічки,
- 5 – котушки обмотки підмагнічування ярма 4,
- 6 – зубці, на які надіті котушки 3 трифазної обмотки.

Якщо прийняти, що падіння напруги на дроселі при номінальному навантаженні (167 А) складає 2 В, тоді потужність дроселя складе приблизно 1 кВА.

$$S_{др} = m \cdot \Delta U_{др} \cdot I_{ном} = 2 \cdot 3 \cdot 167 \approx 1000 \text{ ВА}$$

Розрахункова величина середнього діаметра магнітопроводу дроселя, показаного на рис. 2.3, складе 6 см, зовнішній діаметр – 7.5 см, внутрішній діаметр – 4.5 см.

Висота ярма 1.5 см.

Ширина паза 1.5 см.

Площа паза 2.35 см².

Потік в зубці $3.28 \cdot 10^{-4}$ Вб.

Число витків фази – 18, тобто на кожній котушці зубця по 9 витків.

Переріз проводу такий же як вторинної обмотки трансформатора.

МРС обмотки підмагнічування:

$$F_{o.n.} = 2m \cdot W_{\phi} \cdot I_{op} = 2 \cdot 3 \cdot 17 \cdot 167 = 17034 \text{ А}$$

Вибираємо струм обмотки підмагнічування рівний 10 А. Тоді кожна котушка обмотки підмагнічування повинна мати 284 витка.

Живлення обмотки підмагнічування може здійснюватись від випрямляча, підключеного до трансформаторів струму, встановлених на виході джерела. В цьому випадку індуктивний опір дроселя залежить від струму навантаження.

3.5. Аналіз можливих аварійних режимів перетворювача, вибір апаратури керування, контролю та сигналізації

До характерних відмов та несправностей перетворювача, зазвичай, відносять відмови силових агрегатів перетворювача та відмови схем керування, регулювання та захисту. При цьому на основі вказаних відмов звичайно проводять вибір захисної апаратури. В розробленому перетворювачі характерними відмовами випрямляча можна вважати наступні.

Пробій силових тиристорів або втрати ними провідної властивості, що характеризується закритим станом в будь-яких режимах (обрив силового тиристора або зникнення керуючого імпульсу). При пробії тиристора відбувається коротке замикання фаз напруги, яка живить. При цьому можливий пробій налагоджених тиристорів та вихід з ладу одного із плечей випрямляча. Для захисту від вказаної аварії необхідно установити на вході перетворювача швидкодіючі максимальні струмові захисти (МСЗ). При обриві силового тиристора система керування випрямляча може забезпечити підтримку середнього значення напруги на виході випрямляча в заданих межах, однак пульсації випрямленої напруги та їх частота значно змінюються, що може привести до виходу з ладу конденсатора фільтра на виході випрямляча, а також погіршить роботу інвертора. Отже доцільно

застосовувати захист від збільшення пульсацій випрямленої напруги вище допустимих значень.

Пробій конденсатора силового фільтра призводить до КЗ роботи випрямляча та спрацювання відміченого вище МСЗ.

Для інвертора характерними відмовами також слід розглядати пробій силових транзисторів, а також втрати їх провідності. В першому випадку інвертор переходить в режим КЗ, при цьому збільшуються струми, як на їх виході, так і на вході. Тому МСЗ повинен вибиратись з врахуванням відміченої відмови інвертора.

При втраті стану провідності транзистора (обриві) інвертор переходить в неповнофазний режим роботи, що приведе до порушення режимів роботи вихідного трансформатора, відповідних зміні його струмів, порушення первинної обмотки, викривлення синусоїдності кривої напруги. Тому в перетворювачі необхідно передбачити захисти від постійної складової первинного струму трансформатора, несиметрії вторинної напруги та викривлення її синусоїдності.

В силовому трансформаторі можливі міжфазні та міжвиткові КЗ первинної та вторинної обмоток. При цьому струми інвертора та відповідно перетворювача значно збільшуються, тому вибір зазначеного вище МСЗ повинен бути розрахований на спрацювання при вказаних КЗ. Слід зазначити, що при вказаних пробоях транзисторів та КЗ трансформаторів може виявитись доцільним застосування повздовжньо-диференціального захисту. При обриві первинної та вторинної обмоток інвертор переходить в несиметричний режим, що призводить до появи несиметричних режимів.

Крім зазначених вище несправностей, можливе зниження опору ізоляції інвертора, випрямляча та трансформатора. Тому повинен бути установлений захист по зниженню опору ізоляції перетворювача.

Для контролю, підготовки та перевірки перетворювача доцільно, як показує проведений аналіз, установлювати наступну апаратуру контролю та сигналізації:

- 1) світлова сигналізація нормальної та аварійної роботи перетворювача (зелена лампа – нормальна робота, червона лампа – аварійна робота);

- 2) вольтметри для вимірювання вхідної напруги 380/220 В, 50 Гц та вихідної напруги 120/208 В, 400 Гц;
- 3) амперметри для вимірювання струмів на вході та виході перетворювача;
- 4) частотомір;
- 5) сигналізатор роботи системи контролю ізоляції;
- б) апаратура керування комутації, яка забезпечує включення та виключення перетворювача та переключення вказаних вище приладів.

В якості вказаних приладів можуть бути використані класи точності $\mathcal{U} = 1.5$ та вище, тобто індикатори. При проведенні повірок, регламентних робіт, ремонту для контролю вихідної напруги перетворювача, його частоти, необхідно використовувати прилади класу точності не гірше $\mathcal{U} = 0.5$.

Перетворювач повинен бути виконаний на сучасній елементній базі. Тому при експлуатації достатньо періодично перевіряти його вихідні характеристики та параметри. А також забезпечувати збереження від зовнішніх впливів на корпус приладів та сигналізацію. Періодичність регламентних робіт може бути встановлена в процесі розробки та створення.

ВИСНОВКИ

- 1) В дипломній роботі проведений аналіз наземних аеродромних джерел електроенергії (НАДЕ) та показано, що від надійності їх роботи та якості електроенергії в повній мірі залежить рівень підготовки ЛА до польотів, а відповідно й безпека польоту. Тому питанням підвищення надійності НАДЕ, підвищення якості їх електроенергії постійно приділяється особлива увага.
- 2) Одним з напрямів підвищення надійності роботи НАДЕ, простоти їх обслуговування є упровадження на аеродромах статичних напівпровідникових перетворювачів, цікавість до створення яких в останній час значно підвищилась в зв'язку з освоєнням промисловістю транзисторів та транзисторних модулів великої потужності. Разом з тим одним із складних питань при створенні транзисторних перетворювачів залишається питання забезпечення синусоїдності кривої вихідної напруги.
- 3) В результаті проведеного в роботі аналізу гармонічних складових вихідної напруги різноманітних перетворювачів показано, що найбільш доцільною схемою є перетворювач, що має п'ятиканальний автономний інвертор напруги та трансформатор з обертальним магнітним полем з п'ятифазною первинною обмоткою та трифазною вторинною обмоткою, який дозволяє принципово спростити отримання синусоїдної напруги, відмовившись від фільтрації на виході інвертора.
- 4) В роботі обґрунтовано вибір типу ТОМП та проведений його розрахунок. При цьому вибір параметрів та показників трансформатора проведений з урахуванням особливостей роботи наземних джерел та вимог, які пред'являються до них. Запропонована схема вихідного фільтра з керованим дроселем дозволяє підвищити точність стабілізації напруги в кінці кабеля (на борту ЛА на клеммах ШРАЖ) може знайти застосування в різноманітних НАДЕ і в тому числі тих, які знаходяться в експлуатації. На основі аналізу

аварійних режимів перетворювача надані рекомендації по керуванню, контролю та сигналізації режимів роботи.

- 5) В дипломному проекті проведений аналіз небезпечних та шкідливих виробничих чинників, що виникають під час роботи з перетворювачами, та вивчено їх усунення. Розглянуто також пожежну безпеку та правила техніки безпеки, проведений розрахунок блискавковідводу.
- 6) В проекті зроблений аналіз екологічної небезпеки об'єкту, який проектується, та розроблені заходи для підвищення екологічної безпеки. Проведений розрахунок рівня інтенсивності шуму проектованого перетворювача, з якого видно, що рівень інтенсивності шуму відповідає встановленим нормам на території виробничих підприємств. Отже запропонований пристрій можна вважати безпечним в екологічному відношенні.
- 7) Доцільно вдосконалювати систему попередження авіаційних подій, розробляючи досконалішу та модернізуючи експлуатовану авіаційну техніку, застосовуючи запропонований ІКАО комплексний підхід, здійснюючи оптимізацію планів щодо підвищення рівня безпеки польотів.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Сосков А. Г. Промислова електроніка: Теорія і практикум : підручник / А. Г. Сосков, Ю. П. Колонтаєвський. - К. : Каравела, 2013. - 496 с.
2. Величко Ю.К. Электроснабжение аэропортов.- Киев.: КИИГА, 1996. - 136 с.
3. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). – К.: Мінпаливенерго України, 2010. - 736 с.
4. Готлиб А., Ирвинг М. Источники питания. Инверторы, конверторы, линейные и импульсные стабилизаторы. 2000, - 169 с.
5. Протоерейський О.С. Безпека праці на авіапідприємствах: навч. посібник.- К.: НАУ, 2002. – 243 с.
6. Буриченко Л.А. Охрана труда в гражданской авиации: учеб. для вузов.- М.: Транспорт, 1993.
7. Красношарпа М.М., Г.А. Коваленко, Д. М. Красношарпа – Плавнорегулируемые трансформаторы, асинхронные и бесконтактные синхронные машины. / М. „Радио и связь”, 1992.
8. ДБН В.2.5-27-2006 Захисні заходи електробезпеки в електроустановках будинків і споруд.
9. ГОСТ 12.1.030-81. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление.
10. ДСТУ БВ.2.5-38:2008 Улаштування блискавкозахисту будівель і споруд.
11. ГОСТ 19705-89 Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии.
12. Будіщев М.С. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка. – Львів: Афіша, 2001. – 376 с.
13. Воробьев Н.И. Проектирование электронных устройств. – М.: "Высшая школа". 1989, – 233с.
14. Куклев Ю.И. Физическая экология: учеб. пособие.- М.: Высшая школа, 2001. – 203 с.

15. Плачкова С.Г., Плачков І.В. та ін. Енергетика: історія, сучасність і майбутнє. Книга 5. Електроенергетика та охорона навколишнього середовища. Функціонування енергетики в сучасному світі, 2013.

16. Защита окружающей среды при авиатранспортных процессах/ Под ред. В.Г. Ененкова.- М.: Транспорт, 1986

17. Ансеров Ю.М., Дурнев В.Л. Машиностроение и охрана окружающей среды.- Л.: Машиностроение, 1989.

18. ГОСТ 17.2.2.02 – 76 (СТСЭВ 1365 - 78). Атмосфера. Выбросы вредных веществ автомобилями, тракторами и двигателями. Термины и определения;

19. Егорычев В.А. Агрегаты технического обслуживания самолетов и вертолетов. 1973, 218 с.

20. Чиженко И.М. Руденко В.С. Сенько В.И. Основы преобразовательной техники.- К.: Вища школа, 1983.

21. Руденко В.С., В.И. Сенько, В.В. Трифонюк Основы промышленной электроники.- К.: Вища школа, 1985.

22. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах.- М.: Высшая школа, 1978.

23. Моин В.С, Лаптев Н.Н. Стабилизированные транзисторные преобразователи.- М.: Энергия, 1972.