

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
імені адмірала Макарова
Херсонська філія
Енерготехнічний факультет
Кафедра автоматики та електроустаткування

Рекомендовано до захисту

Завідувач кафедри автоматики та
електроустаткування

(підпис) Михаліченко П.Є.
(прізвище та ініціали)

« ____ » _____ 202 ____ р.

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ МАГІСТРА

на тему БЕЗЩІТКОВИЙ АСИНХРОНІЗОВАНИЙ
СИНХРОННИЙ ВАЛОГЕНЕРАТОР ІЗ СУМІЩЕНОЮ
МАГНІТНОЮ СИСТЕМОЮ

Виконав: студент 6 курсу, групи 6367м
спеціальності 141. Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка
освітньої-професійної програми:
Експлуатація суднових автоматизованих
систем

Фролов Ю.І.
(прізвище та ініціали)

Керівник: Бугрім Л.І.
(прізвище та ініціали)

Рецензент: Новогрецький С.М.
(прізвище та ініціали)

м. Херсон – 2020 року

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
Херсонська філія
Енерготехнічний факультет
кафедра автоматики та електроустаткування

Ступень вищої освіти: магістр

Галузь знань 14. Електрична інженерія
(шифр і назва)

Спеціальність 141. Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)

Освітньо-професійна програма Експлуатація суднових автоматизованих систем
(назва освітньої програми)

ЗАТВЕРДЖУЮ

зав. кафедри автоматики та
електроустаткування

_____ Михаліченко П.Є.
(підпис) (прізвище та ініціали)

« _____ » _____ 202__ р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну магістерську роботу

студенту _____ Фролову Юрію Олександровичу
(прізвище, ім'я, по батькові студента)

1. Тема кваліфікаційної роботи Безщітковий асинхронізований синхронний валогенератор із суміщеною магнітною системою

Керівник кваліфікаційної роботи Бугрім Леонід Іванович, канд.техн.наук, доцент кафедри автоматики
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від «__» _____ 202__ року №__

2. Строк подання студентом кваліфікаційної роботи _____

3. Вихідні дані кваліфікаційної роботи Розробити конструкцію безщіткового асинхронізованого синхронного генератора для валогенераторної установки

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): конструктивні особливості та електромеханічні властивості асинхронізованої синхронної машини; конструктивна реалізація безщіткового асинхронізованого синхронного генератора; вимоги положень Міжнародної конвенції МАРПОЛ 73/78 щодо контролю за викидами з суден.....

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) валогенераторна установка із напівпровідниковим перетворювачем частоти; структурна схема збудників асинхронізованих машин; типові схеми безщіткових асинхронізованих синхронних генераторів; конструктивна компоновка та функціональна схема пропонувано безщіткового асинхронізованого синхронного генератора (АСГ); система управління; модель роботи безщіткового АСГ; модель АРЗ, АРЧ та системи управління; часові діаграми частоти обертання, напруги і струму статора безщіткового АСГ; часові діаграми напруги інвертора та струму ротора генератора

7. Дата видачі завдання на кваліфікаційну роботу «19» вересня 2019 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/П	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1	Аналіз конструктивних особливостей та електромеханічних властивостей асинхронізованих синхронних генераторів.	10.03.2020 р.	
2	Аналіз особливостей використання суднових валогенераторних установок	25.06.2020 р.	
3	Аналіз існуючих та розробка нової конструкції безщіткового асинхронізованого синхронного генератора.	05.10.2020 р.	
4	Підготовка розділів з охорони праці та охорони навколишнього середовища	15.11.2020 р.	
5	Оформлення магістерської роботи.	24.11.2020 р.	

Студент

(підпис)

Фролов Ю.О.

(прізвище та ініціали)

Керівник
кваліфікаційної роботи

(підпис)

Бугрім Л.І.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

В кваліфікаційній роботі розглянуті проблеми реалізації суднової валогенераторної установки на базі асинхронізованого синхронного генератора безщіткової конструкції. Проведений аналіз електромеханічних властивостей асинхронізованих синхронних машин. Показана можливість забезпечення стійкої роботи в усьому можливому діапазоні робочих режимів та підтримання частоти вихідної напруги на заданому рівні незалежно від частоти обертання ротора. Розглянуті особливості конструктивної реалізації валогенераторних установок в залежності від характеристик судна. Підтверджена висока ефективність використання валогенераторів на судах із тривалими ходовими режимами. Запропонована безщіткова конструкція асинхронізованого синхронного генератора із суміщеним магнітним системами збудника та генератора. Проведене комп'ютерне моделювання електромеханічних процесів, що протікають при роботі генератора на статичне активно-індуктивне навантаження.

ABSTRACT

In the qualification work the problems of realization of the ship's shaft generator set on the basis of the asynchronized synchronous generator of the brushless design are considered. The analysis of electromechanical properties of asynchronized synchronous machines is carried out. It is shown the possibility of ensuring stable operation in all possible range of operating modes and maintaining the frequency of the output voltage at a given level, independently of the rotor speed. Peculiarities of constructive realization of shaft generator set depending on ship characteristics are considered. The high efficiency of the use of shaft generator on ships with long traveling modes is confirmed. The brushless construction of an asynchronized synchronous generator with combined magnetic systems of a exciter and generator is proposed. A computer simulation of electromechanical processes taking place at the generator's operation on a static active-inductive load is carried out.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	9
ВСТУП.....	10
РОЗДІЛ 1. КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ АСИНХРОНІЗОВАНОЇ СИНХРОННОЇ МАШИНИ.....	12
1.1. Структура та принцип дії асинхронізованої синхронної машини	12
1.2. Математичний опис асинхронізованої синхронної машини.....	19
1.3. Система автоматичного керування.....	25
1.4. Статична стійкість асинхронізованих машин	27
1.5. Галузь застосування асинхронізованих синхронних генераторів	35
1.6. Висновки до розділу 1	44
РОЗДІЛ 2. КОНСТРУКТИВНА РЕАЛІЗАЦІЯ БЕЗЩІТКОВОГО АСИНХРОНІЗОВАНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА.....	45
2.1. Загальні відомості по валогенераторним установкам	45
2.2. Відомі конструкції безщіткового асинхронізованого синхронного генератора.....	55
2.3 Розробка нової конструкції безщіткового асинхронізованого синхронного генератора	68
2.4. Розрахунок схеми системи управління	82
2.5. Математичне моделювання безщіткового асинхронізованого синхронного генератора	85
2.6. Висновки до розділу 2	93
РОЗДІЛ 3. ВИМОГИ ПОЛОЖЕНЬ МІЖНАРОДНОЇ КОНВЕНЦІЇ МАРПОЛ 73/78 ЩОДО КОНТРОЛЮ ЗА ВИКИДАМИ З СУДЕН.....	95
3.1 Озоноруйнівні речовини.	95
3.2 Окисли азоту.....	97

3.3 Окисли сірки і тверді частки.....	107
3.4 Летучі органічні сполуки	109
ВИСНОВКИ	111
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	114

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АСГ – асинхронізований синхронний генератор

АСТГ – асинхронізований синхронний турбогенератор

БПЧП – безпосередній перетворювач частоти з природною комутацією

ВГ – валогенератор

ГД – головний двигун

ГЕУ – гребна електрична установка

ГПН – генератор пилкоподібної напруги

ЕРС – електрорушійна сила

ККД – коефіцієнт корисної дії

ЛДХ – лінійний датчик Холлу

МРС – магніторушійна сила

ОП – операційний підсилювач

ПЧ – перетворювач частоти

СЕС – суднова електростанція

СУТ – систему управління тиристорами

ШІМ – широтно-імпульсна модуляція

ВСТУП

В останні десятиліття в світі на електростанціях різних типів все більше починають використовувати асинхронізовані генератори, які по відношенню до синхронних генераторів мають декілька переваг: кращу динамічну та статичну стійкість, можливість генерувати напругу постійної частоти при змінній частоті обертання ротора (в межах $\pm 30\%$), наявна можливість регулювання активної та реактивної потужності, а також глибоке споживання останньої.

Асинхронізовані машини є складнішими конструктивно за синхронні, також вони мають складну систему управління збудженням і деяке підвищення вартості виробництва машин. Але це дає ширші можливості регулювання експлуатаційних характеристик агрегатів, забезпечення кращої адаптації до умов роботи, що змінюються, з метою підвищення економічності і надійності роботи установок.

Асинхронізовані генератори можуть бути технічно і економічно доцільні не лише для традиційних теплових і гідравлічних електростанцій середньої і великої потужності, але і для вітроелектричних установок, деяких типів малих ГЕС. Крім того, асинхронізовані машини можуть ефективно використовуватися для роботи в режимах як генератора, так і двигуна для оборотних агрегатів гідроакумуючих електростанцій і приливних електростанцій, а також в так званих асинхронізованих електромеханічних перетворювачах частоти для гнучкого зв'язку між електричними мережами, що мають різні номінальні частоти. Також асинхронізовані синхронні генератори доцільно використовувати в якості валогенераторів у суднових електроенергетичних системах. Застосування валогенераторів дозволяє значно заощаджувати паливо (до 30 %), збільшувати моторесурс допоміжних дизельних установок, робити судову енергосистему більш гнучкою й економічною.

Об'єктом дослідження магістерської роботи є асинхронізований синхронний генератор.

Предметом дослідження є конструктивна реалізація безщіткової системи збудження асинхронізованого синхронного генератора для валогенераторної установки.

Цілі та задачі дослідження:

- аналіз конструктивних особливостей асинхронізованих синхронних генераторів;
- аналіз особливостей роботи та конструктивної реалізації валогенераторної установки
- аналіз існуючих рішень та визначення нової конструкції безщіткового збудження асинхронізованих синхронних генераторів;
- аналіз особливостей та схемної реалізації системи управління автономним інвертором напруги;
- побудова математичної моделі асинхронізованого синхронного генератора та вивчення електромеханічних процесів шляхом комп'ютерного моделювання.

Методи дослідження. Для аналізу та моделювання роботи асинхронізованого синхронного генератора було використано пакета Simulink, який входить до складу програмного забезпечення Matlab.

Наукова новизна отриманих результатів:

- вперше запропонована конструктивна реалізація безщіткового асинхронізованого синхронного генератора із суміщеною магнітною системою збудника та основного генератора
- вперше складена математична модель безщіткового асинхронізованого синхронного генератора для аналізу електромеханічних перехідних процесів при зміні навантаження та частоти обертання.

За результатами досліджень опубліковано тези доповіді у матеріалах наукової конференції:

1. Швыдкий Н. Н. Перспективные направления модернизации элементов судовой электростанции. [Електронний ресурс] / Е.А. Захаров, Н.Н. Швыдкий, П.Н. Халанчук // Автоматика та електротехніка: Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених – Миколаїв: НУК, 2018. – С. 104-105.

РОЗДІЛ 1. КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ АСИНХРОНІЗОВАНОЇ СИНХРОННОЇ МАШИНИ

1.1. Структура та принцип дії асинхронізованої синхронної машини

Асинхронізована машина є електромеханічним комплексом, що складається з власне електричної машини, збудника, автоматичного регулятора збудження. Структура асинхронізованої машини показана на рис. 1.1.

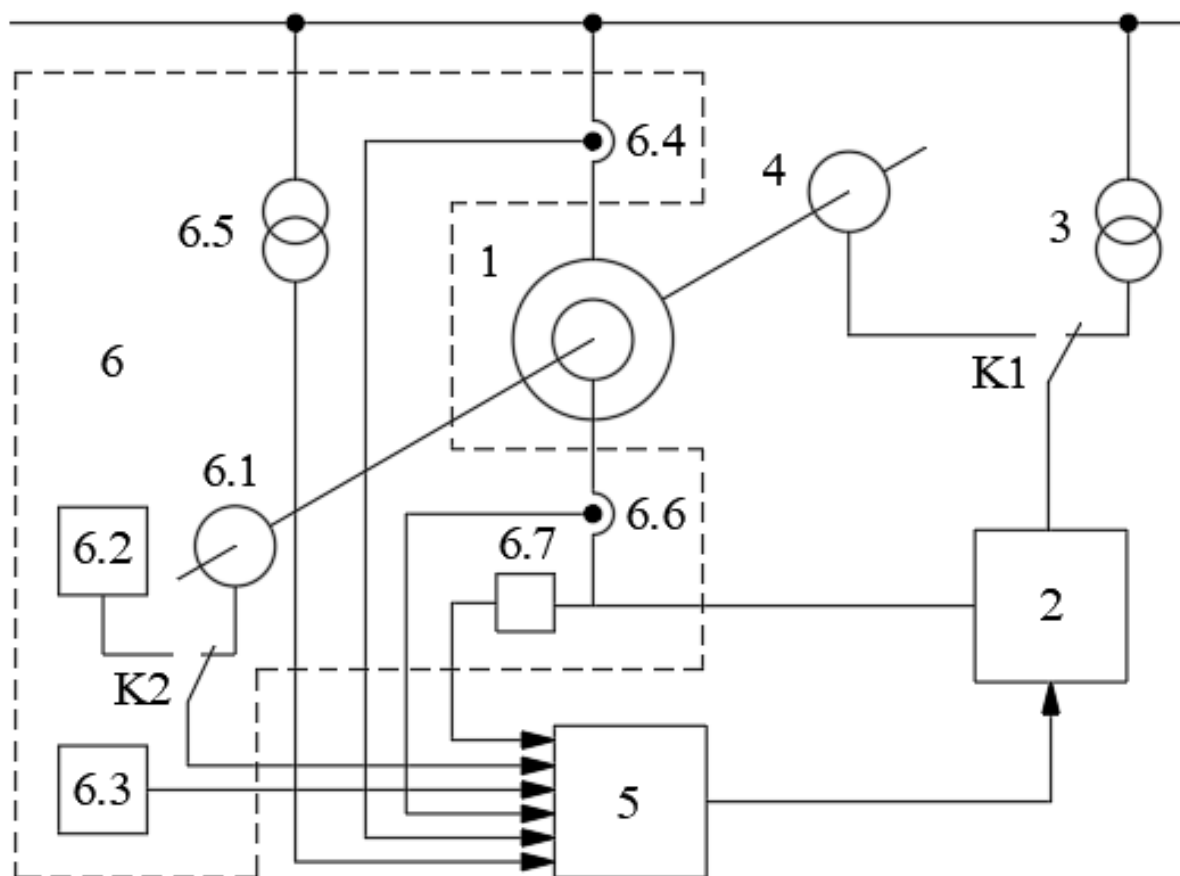


Рисунок 1.1. – Структура асинхронізованої синхронної машини.

Власне електрична машина 1 – неявнополюсна безколекторна машина змінного струму, що містить в загальному випадку m фаз на статорі і m_f на роторі.

Для більшості випадків на статорі розташовується трифазна симетрична обмотка, підключена до трифазної мережі безпосередньо або через трансформатор, а на роторі – симетрична двох- чи трифазна обмотка, що під'єднується через контактні кільця до збудника. Збудник 2, що підключається до кілець ротора машини 1, отримує живлення або від мережі через трансформатор 3, або від додаткової електричної машини 4 (як правило, синхронної), розташованої на одному валу з основною машиною 1. Можливий варіант, коли машина 4 входить до складу окремої двигун-генераторної установки.

Частота напруги на виході збудника (контакти збудника, підключені до кілець ротора) може змінюватися за необхідним законом і дорівнює в усталеному режимі різниці частот обертання поля статора і ротора (частоті ковзання) машини. Це означає, що збудник асинхронізованої машини є в загальному випадку перетворювачем частоти напруги джерела живлення в частоту ковзання.

Автоматичний регулятор збудження 5 служить для формування необхідної функції регулювання машини, що посилюється збудником. Очевидно, що число вихідних сигналів регулятора відповідає числу фаз ротора машини. Функція регулювання формується на основі інформації, отриманої з тієї або іншої змінної, що характеризує режим роботи машини. Ця інформація отримується від системи датчиків 6, яка в загальному випадку складається з наступних:

6.1 – датчик тригонометричних функцій кута повороту ротора (датчик кутового положення ротора);

6.2 – задавач незалежної частоти;

6.3 – датчик тригонометричних функцій кута зображаючого вектора напруги електричної системи (ця інформація може бути отримана, наприклад, за допомогою облаштування телепередачі кута);

6.4 і 6.6 – датчики струмів статора і ротора;

6.5 і 6.7 – датчики напруги статора і ротора.

На рис. 1.1 ключі K1 і K2 можуть знаходитися в одному з положень – правому або лівому. Збудник 2 може отримувати живлення або від трансформатора 3, або від допоміжної машини 4, хоча в окремих випадках для

підвищення надійності асинхронізованої машини можливе живлення збудника від двох джерел.

Якщо на регулятор 5 поступають сигнали від датчика 6.1 (ключ K2 в правому положенні), то вихідна частота сигналів регулятора являється функцією частоти обертання ротора і машина набуває асинхронних властивостей відносно стійкості; якщо ж на регулятор поступають сигнали від датчика 6.2, то вихідна частота сигналів регулятора не залежить від частоти обертання ротора, а машина набуває синхронних властивостей відносно стійкості.

В якості електричної машини, що входить до складу асинхронізованої машини може використовуватися асинхронна машина з фазним ротором як серійного виготовлення, так і спеціально спроектована. У першому випадку знадобляться деякі незначні зміни – посилення бандажа ротора для роботи з надсинхронною швидкістю, іноді виведення шести контактних кілець та ін. В другому випадку який, як правило, має місце при створенні потужних асинхронізованих машин, вдається отримати систему з кращими техніко-економічними показниками, оскільки машина проектується з урахуванням властивостей усіх інших елементів цього електромеханічного комплексу.

Збудник асинхронізованої машини може бути створений на основі як електричних машин, так і вентильних пристроїв.

Сучасна система збудження складається з керуючих тиристорних перетворювачів частоти. З більшого числа таких перетворювачів – інверторів струму і напруги, безпосередніх перетворювачів частоти з природною комутацією (БПЧП) – найбільш придатним для асинхронізованих машин являються БПЧП з синусоїдальною формою вихідного струму.

Чинником, що обумовлює застосування БПЧП для даних машин, являється здатність таких перетворювачів забезпечити простий реверс вихідного струму або отримання постійного струму, що дозволяє асинхронізованій машині працювати з синхронною, вище- і нижче синхронними частотами обертання, забезпечити простий перехід від одних частот обертання до інших. В той же час відомі недоліки БПЧП – обмежене значення найбільшої вихідної частоти (не більше

половини частоти джерела живлення) і значне споживання ними реактивної потужності джерела – не грають для асинхронізованих машин визначальної ролі, хоча в певних умовах і створюють деякі проблеми.

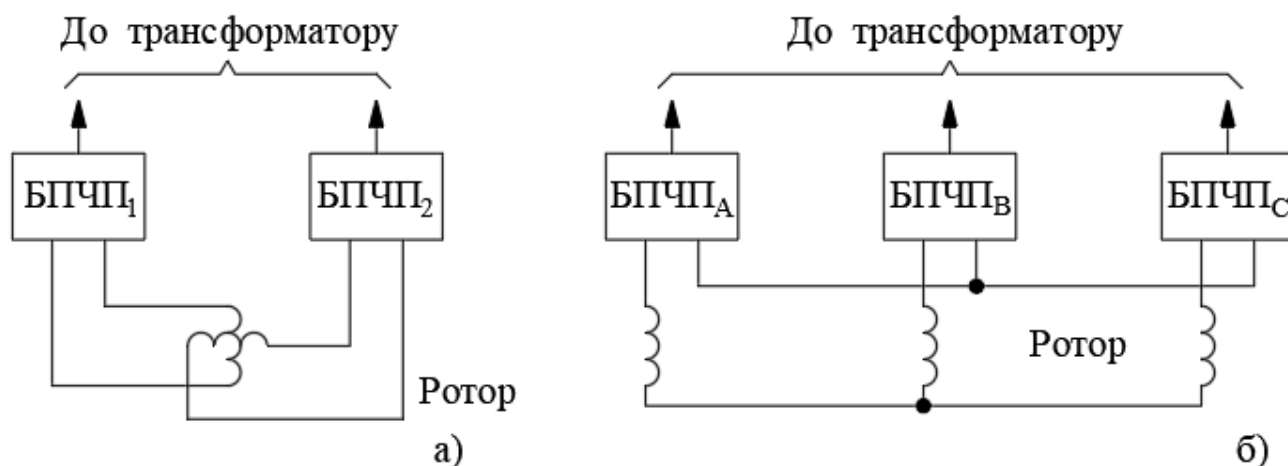


Рисунок 1.2. – Структурна схема збудників асинхронізованих машин :

а – при двофазній обмотці ротора; б – при трифазній обмотці ротора

На рис. 1.2 приведені структурні схеми збудника асинхронізованої машини на базі БПЧП для двох- і трифазного роторів. Дві основні електричні схеми однієї фази БПЧП – нульова і мостова – приведені на рис. 1.3. Силове живлення фаз БПЧП може здійснюватися як від одного погоджувачого трансформатора або однієї системи обмоток допоміжної машини, так і індивідуально, коли кожна фаза живиться від свого погоджувачого трансформатора (системи обмоток допоміжної машини).

У разі двофазного ротора і наявності чотирьох контактних кілець, коли обмотки гальванічно не пов'язані, може бути використаний будь-який спосіб живлення.

Для трифазного ротора з трьома контактними кільцями живлення фаз БПЧП обома способами може здійснюватися тільки для БПЧП, побудованого за нульовою схемою. Якщо ж використовується мостова схема, то допускається лише індивідуальна схема живлення фаз БПЧП, наприклад від трьох трифазних трансформаторів або від одного трансформатора з трьома вторинними обмотками.

Живлення від однієї системи обмоток (один трансформатор) припустиме лише за наявності шести контактних кілець на роторі.

Регулятор асинхронізованої машини будується на базі елементів інтегральної аналогової і дискретної мікромодульної техніки; для управління асинхронізованою машиною можуть використовуватися мікропроцесори.

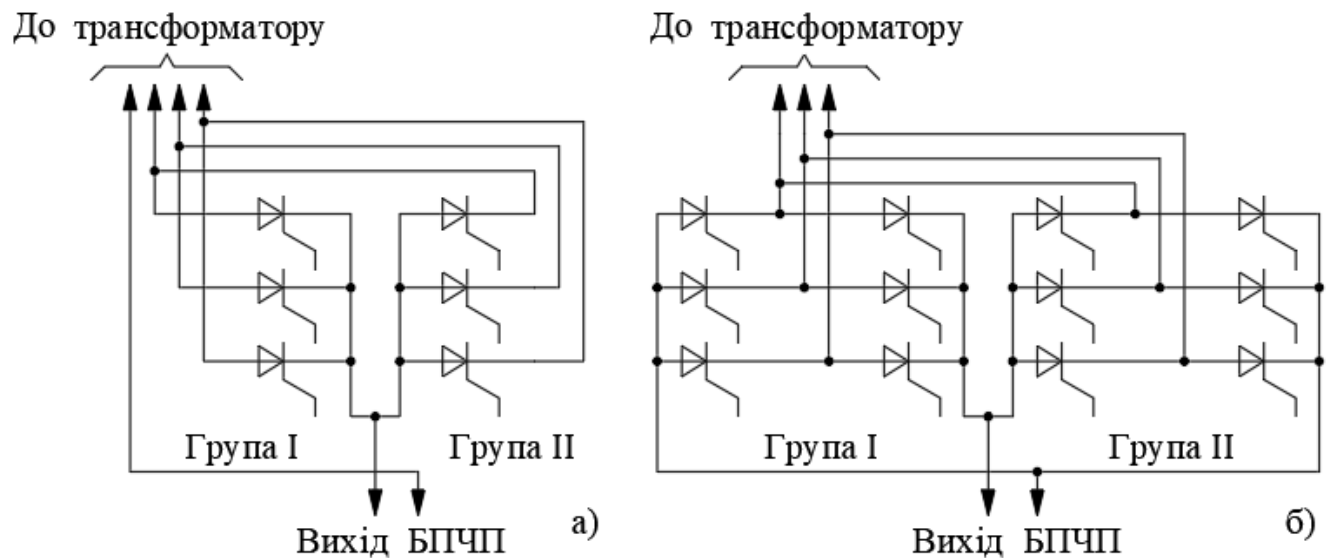


Рисунок 1.3. – Електричні схеми однієї фази перетворювача частоти:

а – нульова схема; б – мостова схема.

Нормальним усталеним режимом називають такий режим роботи електричної машини, при якому активні і реактивні потужності ланцюгів статора і ротору не залежать від часу і є постійними, кутова швидкість ротора при цьому залишається також незмінною при постійному механічному моменті на валу.

Для будь-якої електричної машини нормальний усталений режим існує у тому випадку, якщо магнітні потоки, створені струмами статорів і роторів, виявляються в просторі взаємно нерухомими при довільному значенні кутової швидкості ротора. З цієї умови випливає також, що МРС, які створюють вказані магнітні потоки або зображуючі вектори струмів і напруг і статора, і ротора, також мають бути взаємно нерухомими. Ця умова записується наступним чином:

$$\omega_f = \omega - \omega_R = -s\omega, \quad (1.1)$$

де ω – кутова швидкість векторів напруги, магнітних потоків і струмів статора відносно статора; ω_f – кутова швидкість векторів напруги, магнітних потоків і струмів ротора відносно тіла ротора; ω_R – кутова швидкість ротора.

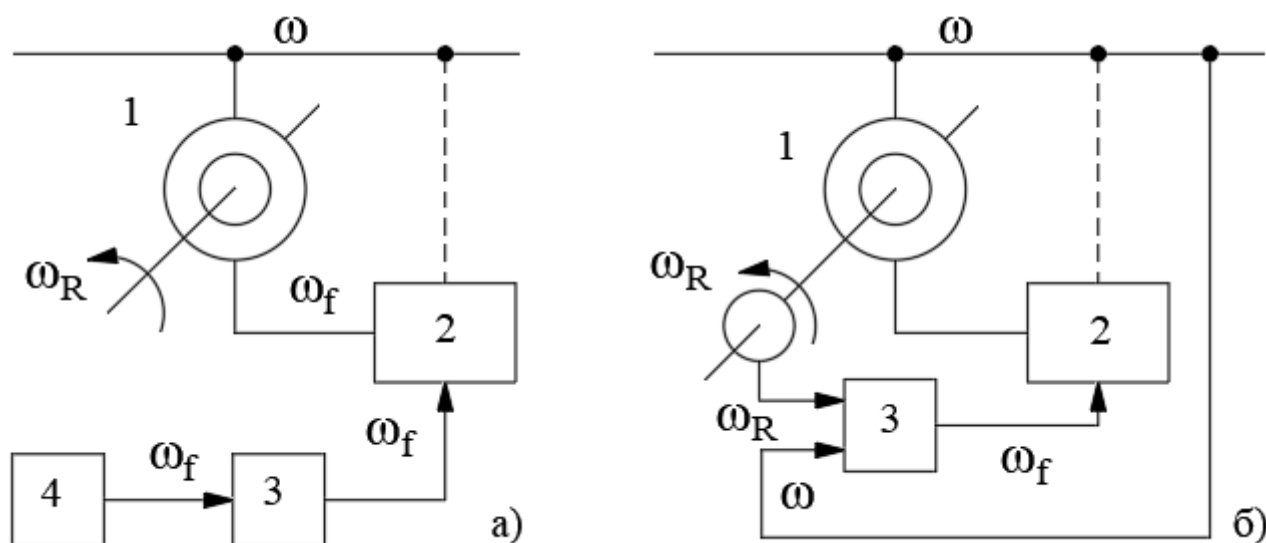


Рисунок 1.4. – Структурна схема машини, що працює в узагальненому синхронному (а) і узагальненому асинхронному (б) режимах.

Практична реалізація умови (1.1) може досягатися двома принципово різними способами: коли ω_f є незалежною змінною, а швидкість ω_R – є функцією швидкостей ω і ω_f ; коли ω_R є незалежною змінною, а ω_f – є функцією швидкостей ω і ω_R .

На цьому принципі заснована класифікація машин подвійного живлення. Машина першого типу визначена такою що має синхронні властивості, тобто працює в "узагальненому синхронному" режимі. Машина другого типу визначена такою що має асинхронні властивості, тобто працює в "узагальненому асинхронному" режимі. Ці обидва режими однієї і тієї ж машини мають свої особливості, переваги і недоліки.

На рис. 1.4 показані структурні схеми асинхронізованої машини, що працює в "узагальненому синхронному" і "узагальненому асинхронному" режимах. Ці схеми відрізняються тим, що в першому випадку система автоматичного регулювання машини 1, ротор якої сполучений з перетворювачем частоти

2, розімкнена по швидкості, оскільки сигнал ω_f поступає на вхід регулятора 3 від незалежного задатчика 4, в іншому випадку система автоматичного регулювання машини 1 замкнута за швидкістю, на вхід регулятора 3 поступає сигнал кутової швидкості ротора від датчика положення 5.

У першому випадку при зміні, наприклад, механічного моменту на валу і незмінних значеннях швидкостей ω і ω_f новий усталений режим настане тільки у тому випадку, коли швидкість $\omega_R = \omega + \omega_f = \text{const}$, тобто швидкість ротора в усталеному режимі для даного випадку не буде змінюватися при зміні навантаження на валу. У цьому полягає повна аналогія даного режиму асинхронізованої і синхронної машин.

У другому випадку при зміні моменту на валу і незмінному значенні швидкості ω новий усталений режим настане при довільних значеннях швидкості ротора. Швидкість же ω_f змінюватиметься відповідно до (1.1). Значення ω_R і ω_f , які встановляться в новому нормальному усталеному режимі визначаються механічною характеристикою машини. Тут важливо відмітити, що нормальний режим усталеної роботи в даному випадку супроводжується зміною швидкості ротора разом зі зміною навантаження точно так, як це має бути в асинхронних машинах. Очевидно, що як в першому випадку (при незмінних ω і ω_f), так і в другому випадку (при незмінних ω і ω_R) зі зміною струму ротора в асинхронізованій машині можна змінювати реактивну потужність статора так само, як і в синхронній машині.

Кутова швидкість ротора для узагальненого синхронного режиму регулюється зміною частоти ω_f напруги на обмотках ротора, а в машині узагальненого асинхронного режиму – зміною фази напруги статора і напруги ротора, внаслідок чого змінюється співвідношення між моментом, що розвивається машиною, і механічним моментом на валу, що призводить до зміни швидкості ротора. У тому і іншому випадку новий нормальний усталений режим настане тоді, коли момент, що розвивається машиною, і механічний момент знову будуть рівні.

Асинхронізована машина незалежно від способу формування напруги

ротора дозволяє регулювати реактивну потужність і може працювати в нормальному усталеному режимі з різною частотою обертання ротора. При цьому відмітимо, що характеристики та статичні і динамічні властивості машини визначаються законом і параметрами регулювання амплітуди і фази просторового вектора напруги (струму) ротора.

1.2. Математичний опис асинхронізованої синхронної машини

Для опису перехідних процесів, що протікають власне в електричній машині, скористаємося загальновідомими рівняннями Парка - Горєва. Рівняння записані для ідеальної машини, в якій відсутні втрати в сталі, а також нелінійні магнітні явища, не враховуються гістерезис, вищі гармонійні у складі магнітного поля та ін.

Розглянемо дво полюсну машину з симетричним двофазним статором і з симетричним в магнітному і електричному відношеннях ротором, тобто у припущенні, що на роторі розташована двофазна симетрична система обмоток. Не враховуватимемо демпферних контурів на роторі машини. Із цього приводу необхідно зробити наступні пояснення. Асинхронізована машина може мати на роторі явні і неявні демпферні контури, наприклад, в асинхронізованому турбогенераторі. Наявність таких контурів обумовлює в асинхронних режимах додаткові втрати і не дозволяє працювати машині тривало в широкому діапазоні зміни швидкості ротора, що вимагається, наприклад, для асинхронізованих двигунів. Для машин, працюючих з синхронною швидкістю або близькою до синхронної, наявність демпферних контурів можлива.

Вважатимемо, що ротор шихтований, не містить демпферних контурів. По цій же причині не зупинятимемося на питаннях нагріву і втрат в роторі в асинхронних режимах, оскільки при прийнятих припущеннях ці питання не відрізняються від аналогічних і добре вивчених проблем втрат і нагріву в асинхронних двигунах з фазним ротором.

Рівняння машини з симетричними обмотками статора і ротора запишемо в осях x_u , що обертаються в просторі з довільною швидкістю ω_k . На рис. 1.5

наведені прийняті позитивні напрямки осей обертання ротора і відліку кутів.

За позитивні напрями струмів статора і ротора будемо приймати напрями, співпадаючі з напрямом осей відповідних обмоток. Позитивні напрями для напруг статора прийняті протилежними до напрямів струмів, а позитивні напрями для напруг ротора прийняті співпадаючими з напрямками відповідних струмів. Моменти прийняті позитивними в генераторному режимі роботи машини, тобто механічний момент на валу позитивний, коли він являється прискорюючим, а електромагнітний момент позитивний, коли він гальмує ротор. Ковзання вважатимемо позитивним при частоті обертання ротора вище за синхронну. Параметрам статора не надаватимемо ніякого індексу, параметрам ротора – індекс f , взаємним параметрам статора і ротора, – a , кутовій швидкості ротора – R . Параметри контурів ротора приведені до параметрів контурів статора загальновідомими методами.

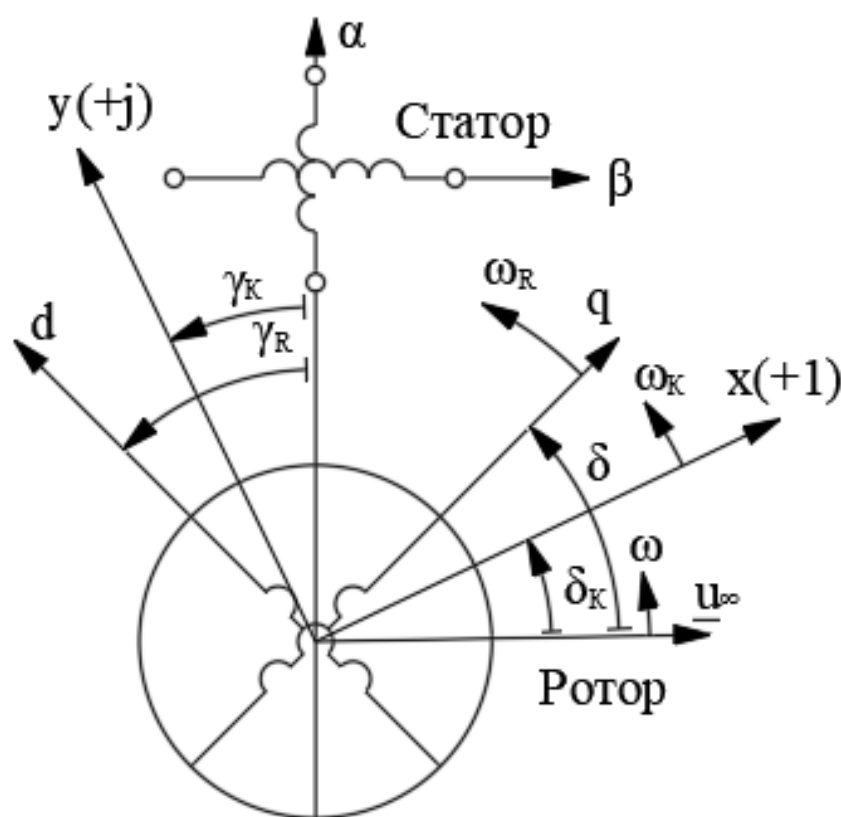


Рисунок 1.5. – Оси обмоток і координатні осі машини

Рівняння записуємо в системі відносних одиниць, прийнявши як базисні величини для статорних і роторних змінних амплітуди номінальних значень фазної напруги і струму статора, номінальну потужність статора (кВ·А), для кутової швидкості синхронну кутову швидкість ω_0 . Час і відповідно постійні часу і інерції виражатимемо в радіанах:

$$t = \omega_0 t'; \quad T = \omega_0 T',$$

де t' – час, с; T – постійна часу, с.

Замість індуктивностей обмоток статора L , ротора L_f і взаємній індукції L_a введемо відповідні опори:

$$x = \omega_0 L; \quad x_f = \omega_0 L_f; \quad x_a = \omega_0 L_a; \quad (1.2)$$

де $x = x_d = x_q$ – повний індуктивний опір обмотки статора; $x_f = x_{fd} = x_{fq}$ – те ж саме обмотки ротора; $x_a = x_{ad} = x_{aq}$ – індуктивний опір, обумовлений реакцією якоря.

Рівняння машини у відносних одиницях:

$$-u_x = r i_x + p \psi_x + \omega_k \psi_y; \quad (1.3)$$

$$-u_y = r i_y + p \psi_y - \omega_k \psi_x; \quad (1.4)$$

$$u_{fx} = r_f i_{fx} + p \psi_{fx} + (\omega_k - \omega_R) \psi_{fy}; \quad (1.5)$$

$$u_{fy} = r_f i_{fy} + p \psi_{fy} - (\omega_k - \omega_R) \psi_{fx}; \quad (1.6)$$

$$M_R = T_j p \omega_R + M_\vartheta, \quad (1.7)$$

де $u_x, u_y, i_x, i_y, \psi_x, \psi_y$ – напруги, струми і потокозчеплення обмоток статора; $u_{fx}, u_{fy}, i_{fx}, i_{fy}, \psi_{fx}, \psi_{fy}$ – напруги, струми і потокозчеплення обмоток ротора; M_R – механічний момент; M_ϑ – електромагнітний момент машини; T_j – електромеханічна постійна часу; p – символ диференціювання; причому

$$\psi_x = x i_x + x_a i_{fx}; \quad \psi_y = x i_y + x_a i_{fy}; \quad (1.8)$$

$$\psi_{fx} = x_a i_x + x_f i_{fy}; \quad \psi_{fy} = x_a i_y + x_f i_{fx}; \quad (1.9)$$

$$M_\vartheta = i_x \psi_y - i_y \psi_x = x_a (i_x i_{fy} - i_y i_{fx}). \quad (1.10)$$

Повні індуктивні опори статора і ротора можна представити у виді

$$x = x_{\sigma} + x_a; \quad (1.11)$$

$$x_f = x_{f\sigma} + x_a; \quad (1.12)$$

тут x_{σ} і $x_{f\sigma}$ – опори розсіювання обмоток статора і ротора.

Значення $x, x_a, x_f, x_{\sigma}, x_{f\sigma}$ розраховуються так само, як і відповідні опори неявнополюсних синхронних машин або асинхронних машин з фазним ротором.

При аналізі усталених перехідних процесів, в машині зазвичай користуються однією з трьох координатних систем:

– системою нерухомих осей $\alpha\beta$, пов'язаних з обмотками статора:

$$\omega_k = 0; \quad s_k = -1; \quad (1.13)$$

– системою осей qd , пов'язаних з обмотками ротора:

$$\omega_k = \omega_R; \quad s_k = s; \quad s_k - s = 0; \quad (1.14)$$

– системою осей x_0y_0 , що обертаються з синхронною швидкістю:

$$\omega_k = 1; \quad s_k = 0; \quad s_k - s = -s. \quad (1.15)$$

Прийнявши вісь x за дійсну, а y – за уявну, запишемо

$$-\underline{u} = r\underline{i} + (p + j\omega_k)\underline{\psi}; \quad (1.16)$$

$$\underline{u}_f = r_f\underline{i}_f + [p + j(\omega_k - \omega_R)]\underline{\psi}_f; \quad (1.17)$$

$$M_R = T_j p \omega_R + M_{\vartheta}; \quad (1.18)$$

де

$$\left. \begin{aligned} \underline{u} &= u_x + ju_y; \quad \underline{i} = i_x + ji_y; \quad \underline{\psi} = \psi_x + j\psi_y; \\ \underline{u}_f &= u_{fx} + ju_{fy}; \quad \underline{i}_f = i_{fx} + ji_{fy}; \quad \underline{\psi}_f = \psi_{fx} + j\psi_{fy}; \end{aligned} \right\} \quad (1.19)$$

є зображуваними векторами відповідних змінних статора і ротора.

Згідно (1.8) – (1.12)

$$\underline{\psi} = x\underline{i} + x_a\underline{i}_f = x_{\sigma}\underline{i} + \underline{\psi}_{\delta}; \quad (1.20)$$

$$\underline{\psi}_f = x_a\underline{i} + x_f\underline{i}_f = x_{f\sigma}\underline{i}_f + \underline{\psi}_{\delta}; \quad (1.21)$$

$$M_{\vartheta} = \operatorname{Re} j[\underline{i}\underline{\psi}^*] = \operatorname{Re} j[\underline{i}\underline{\psi}_{\delta}^*]. \quad (1.22)$$

У цих рівняннях

$$\underline{\Psi}_\delta = x_a \underline{i} + x_a \underline{i}_f \quad (1.23)$$

являється потокозчепленням статора і ротора, пропорційним магнітному потоку в повітряному проміжку.

При подальшому аналізі користуватимемося рівняннями, записаними як через змінні $\underline{\Psi}$ та $\underline{\Psi}_f$, так і через $\underline{\Psi}_\delta$.

Іноді замість відповідних швидкостей ω_k та ω_R будемо вводити ковзання системи координат відносно швидкості ω_0 , прийнятою за базову ($\omega_0 = 1$), і ковзання s ротора, тобто

$$s_k = \omega_k - 1; \quad (1.24)$$

$$s = \omega_R - 1. \quad (1.25)$$

В деяких випадках зручніша для аналізу форма запису диференціальних рівнянь машини, запропонована А. А. Горьєвим. Щоб перейти до цієї форми, помножимо рівняння (1.14) на відношення x_a/r_f . Тоді отримаємо

$$\underline{u}_f \frac{x_a}{r_f} = x_a \underline{i}_f + [p + j(\omega_k - \omega_R)] \frac{x_a}{r_f} \underline{\Psi}_f. \quad (1.26)$$

З урахування (1.21) запишемо

$$\frac{x_a}{r_f} \underline{\Psi}_f = \frac{x_a^2}{r_f} \underline{i} + \frac{x_f}{r_f} x_a \underline{i}_f = \frac{x_a^2}{xx_f} \frac{x_f}{r_f} x \underline{i} + \frac{x_f}{r_f} x \underline{i} + \frac{x_f}{r_f} x_a \underline{i}_f.$$

Введемо нові змінні:

$$\underline{u}'_f = (x_a/r_f) \underline{u}_f; \quad (1.27)$$

$$\underline{e}_f = x_a \underline{i}_f; \quad (1.28)$$

$$\mu = x_a^2 / xx_f; \quad 1 - \mu = \sigma; \quad (1.29)$$

$$x\mu = x(1 - \sigma) = x - x'; \quad (1.30)$$

$$T_f = x_f / r_f \quad (1.31)$$

$$T'_f = \sigma(x_f / r_f); \quad (1.32)$$

$$x' = \sigma x = x_\sigma + 1/(1/x_a + 1/x_{f\sigma}); \quad (1.33)$$

де $\underline{u}'_f$ – напруга, прикладена до обмоток ротора, виражена в спеціальних одиницях; $\underline{e}_f$ – вектор, чисельно рівний ЕРС e , наведеною потоком ротора (струмом i_f) у обмотці статора, і співпадаючий по напрямку зі струмом ротора, тобто $\underline{e}_f = je$; μ – коефіцієнт магнітного зв'язку між обмотками статора і ротора; σ – коефіцієнт розсіювання; x' – перехідний індуктивний опір обмотки статора; T_f – постійна часу обмотки ротора при розімкненій обмотці статора; T'_f – постійна часу обмотки ротора при замкнутій накоротко обмотці статора.

З (1.26) – (1.33) слідує

$$\underline{u}'_f = \underline{e}_f + [p + j(\omega_k - \omega_R)]T_f \underline{\psi}'_f, \quad (1.34)$$

$$\text{де} \quad \underline{\psi}'_f = (x - x')\underline{i} + \underline{e}_f. \quad (1.35)$$

– потокозчеплення ротора, виражене в прийнятій системі змінних.

Отже, будуть використані дві системи рівнянь машини, що розглядаємо.

Перша система

$$\left. \begin{aligned} -\underline{u} &= r\underline{i} + (p + j\omega_k)\underline{\psi} = r\underline{i} + [p + j(1 + s_k)]\underline{\psi}; \\ \underline{u}_f &= r_f \underline{i}_f + [p + j(\omega_k - \omega_R)]\underline{\psi}_f = r_f \underline{i}_f + [p + j(s_k - s)]\underline{\psi}_f; \\ \underline{\psi} &= x\underline{i} + x_a \underline{i}_f = x_\sigma \underline{i} + \underline{\psi}_\delta; \\ \underline{\psi}_f &= x_s \underline{i} + x_f \underline{i}_f = x_{f\sigma} \underline{i}_f + \underline{\psi}_\delta; \\ M_R &= T_j p \omega_R + M_\vartheta = T_j p s + M_\vartheta; \\ M_\vartheta &= \operatorname{Re} j(\underline{i} \underline{\psi}^*) = \operatorname{Re} j x_a (\underline{i} \underline{i}_f^*) \end{aligned} \right\} \quad (1.36)$$

Друга система

$$\left. \begin{aligned} -\underline{u} &= r\underline{i} + (p + j\omega_k)\underline{\psi} = r\underline{i} + [p + j(1 + s_k)]\underline{\psi}; \\ \underline{u}'_f &= \underline{e}_f + [p + j(\omega_k - \omega_R)]T_f \underline{\psi}'_f = \underline{e}_f + [p + j(s_k - s)]T_f \underline{\psi}'_f; \\ \underline{\psi} &= x\underline{i} + \underline{e}_f = x' \underline{i} + \underline{\psi}'_f; \\ \underline{\psi}'_f &= (x - x')\underline{i} + \underline{e}_f; \\ M_R &= T_j p \omega_R + M_\vartheta = T_j p s + M_\vartheta; \\ M_\vartheta &= \operatorname{Re} j(\underline{i} \underline{\psi}^*) = \operatorname{Re} j(\underline{i} \underline{e}_f^*) = \operatorname{Re} j(\underline{i} \underline{\psi}'_f{}^*). \end{aligned} \right\} \quad (1.37)$$

1.3. Система автоматичного керування

До складу асинхронізованої машини окрім електричної машини входять збудник і автоматичний регулятор збудження, що утворюють систему автоматичного керування машиною.

Називатимемо ідеальною таку систему автоматичного управління, яка не вносить спотворень при формуванні напруги $\underline{u}_f(u'_f)$, тобто закону регулювання. Елементи, що утворюють регулятор, систему керування і силову схему БПЧП, можуть розглядатися як практично безінерційні, тобто ідеальні, оскільки запізнювання в них і їх постійні часу зазвичай на декілька порядків менші постійних часу контурів машини; ці постійні часу практично не позначаються на характері протікання перехідних процесів, розмірах областей стійкості та ін. Ця обставина підтверджується даними як теоретичних, так і досить численних експериментальних досліджень асинхронізованих машин. На рис. 1.6 приведена структурна схема системи автоматичного управління асинхронізованою машиною. Позначимо:

u_p – вихідний сигнал регулятора;

$\sum_{j=1}^n \underline{u}_{yj}$ – вхідні сигнали або керуючі дії на вході регулятора, які утворюють

вектор дій, що управляють $\underline{u}_y$;

u_u – модуль напруги джерела живлення – збудника;

$\underline{u}_e = \underline{u}_f$ – вектор вихідної напруги збудника, який співпадає з напругою на кільцях ротора;

$\underline{W}_{jp}(p)$ – передатна функція регулятора по j-й дії;

k_e – коефіцієнт посилення збудника.

Відповідно до викладеного

$$\underline{u}_f = k_e \underline{u}_p = k_e \sum_{j=1}^n \underline{W}_{jp}(p) \underline{u}_{jy}, \quad (1.38)$$

де

$$k_{\epsilon} = k'_{\epsilon} u_{\text{и}} / u_{\text{и, ном}}. \quad (1.39)$$

Останнє співвідношення виходить з принципу роботи БПЧП, а також ясно з розгляду схем рис. 1.2 і 1.3.

У (1.44) коефіцієнт k'_{ϵ} – деяке постійне число, визначене схемою перетворювача частоти. Коефіцієнт k_{ϵ} може бути розрахований по формулі

$$k_{\epsilon} = \frac{k'_{\epsilon} u_{\text{и}} / u_{\text{и, ном}}}{1 + T_{\mu} [p + j(\omega_k - \omega_R)]},$$

де T_{μ} – постійна часу системи управління БПЧП. Ця постійна часу при живленні перетворювача від мережі частотою 50 Гц не перевищує 0,008 секунд як для нульової, так і для мостової схеми БПЧП, і, як показали теоретичні і експериментальні дослідження, у більшості випадків вона практично не робить помітного впливу на розміри областей стійкості і динамічні властивості асинхронізованої машини.

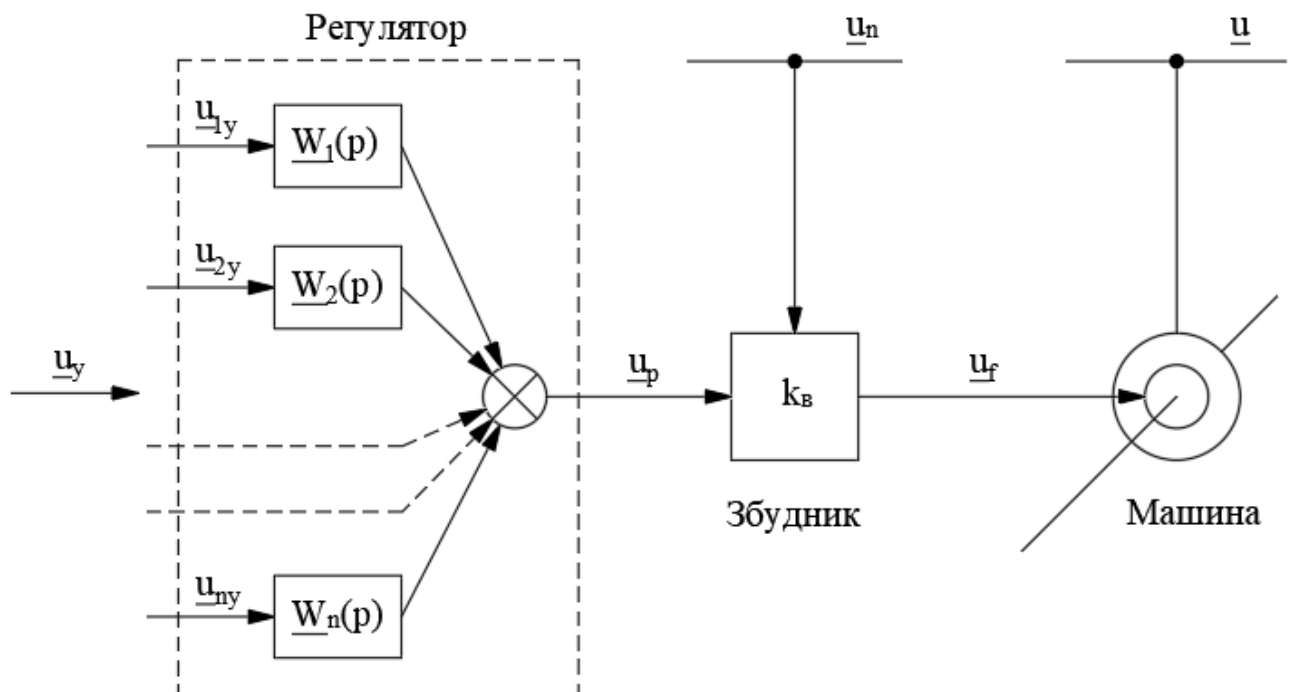


Рисунок 1.6. – Структурна схема системи автоматичного управління асинхронізованою машиною

1.4. Статична стійкість асинхронізованих машин

При аналізі статичної стійкості, можна знехтувати активними опорами лінії і генератора, перехідними процесами в контурах статорів і еквівалентувати чотириполюсник індуктивним опором x_L . Індуктивний опір трансформатора (рис. 1.7, а) враховуватимемо в опорі x_L , припустимо, що $x_L = x_{\text{вн}} + x_{\text{тр}}$.

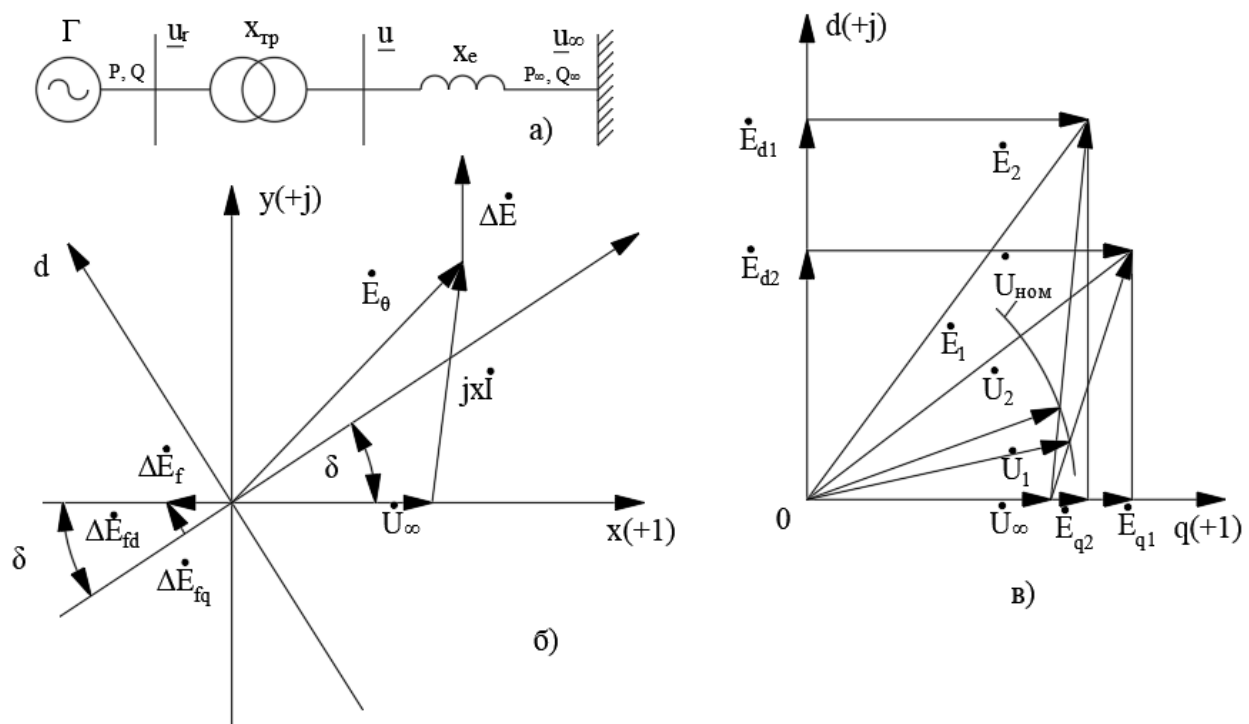


Рис. 1.7. – Машина, працююча в узагальненому синхронному режимі :

а – еквівалентна схема; б – діаграма при $\delta \neq 0$;

в – діаграма при $\delta = 0$ і зміні режиму, напруга $U_1 = U_2 = U_{\text{ном}}$

У відповідності до [1, стор. 75] характеристичне рівняння системи має наступний вигляд:

$$p^3 a_0 + p^2 a_1 + p a_2 + a_3 = 0, \quad (1.40)$$

де

$$a_0 = T_j T_{fk}'^2; \quad a_1 = 2 T_j T_{fk}';$$

$$a_2 = T_j \left(1 + s_0^2 T_{fk}'^2 (1 - k_f)^2 \right) + T_{fk}'^2 (1 - k_f) \left(Q_0 + \frac{U_\infty^2}{x_\Sigma'} \right) + \alpha_1 T_{fk}' \frac{U_\infty}{x_\Sigma'};$$

$$a_3 = -s_0 T'_{fk} (1 - k_f)^2 P_0 + T'_{fk} (1 - k_f) \left(Q_0 + \frac{U_\infty^2}{x'_\Sigma} \right) + \alpha_1 \frac{U_\infty}{x'_\Sigma};$$

$$T'_{fk} = T'_f / (1 - k_e); T'_f = T_f (x'_\Sigma / x_\Sigma); x'_\Sigma = x_\Sigma + x'.$$

Розглянемо узагальнений асинхронний режим. Прийmemo, що $\underline{u}'_{f.zad} = -(\alpha_0 + \alpha_1 s) + j\beta_0$. Почнемо аналіз умов стійкості з простішого випадку, коли амплітуда напруги керування залишається незмінною, тобто коли $\alpha_1 = 0$ и $\Delta \underline{u}'_{f.zad} = 0$, а також коли в законі регулювання не містяться сигнали зворотного зв'язку по струмах ротора і компенсуючі перехресні зворотні зв'язки ($k_e = k_f = 0$).

Прийmemo ковзання усталеного режиму $s_0 = 0$. Нескладний аналіз показує, що в цьому випадку основною є умова стійкості

$$a_3 > 0. \quad (1.41)$$

Межа стійкості за цим критерієм записується у виді

$$Q_0 + U_\infty^2 / x'_\Sigma = 0. \quad (1.42)$$

Цю ж умову можна записати і інакше, виразивши потужність Q_0 через U , U_∞ та P_0 , де U – напруга генератора (рис. 1.7, а).

Враховуючи, що

$$\left. \begin{aligned} P &= \frac{UU_\infty}{x_\Sigma} \sin \Theta_\Sigma; \\ Q &= -\frac{U_\infty^2}{x_\Sigma} + \frac{UU_\infty}{x_\Sigma} \cos \Theta_\Sigma, \end{aligned} \right\} \quad (1.43)$$

після простих перетворень отримуємо

$$P_0 = \frac{UU_\infty}{x_\Sigma} \sqrt{1 - \left[\frac{x'_\Sigma U_\infty}{(x_\Sigma + x')U} \right]^2}. \quad (1.44)$$

Ця межа стійкості відповідає значенню $\Theta' = \pi/2$, де Θ' – кут між E' та u_∞ , тобто відповідає умові $E' = \text{const}$. При ковзанні усталеного режиму s_0 , відмінному від нуля, з (1.40) отримаємо умови стійкості, які з врахуванням (1.43) можна записати у виді

$$a_3 \equiv \sqrt{\frac{U^2 U_\infty^2}{x_\Sigma^2} - P_0^2} - \left[\frac{x' U_\infty^2}{x_\Sigma (x' + x_\Sigma)} + s_0 T_f' P_0 \right] > 0; \quad (1.45)$$

$$a_1 a_2 - a_0 a_3 = \Delta \equiv \sqrt{\frac{U^2 U_\infty^2}{x_\Sigma^2} - P_0^2} - \frac{x' U_\infty^2}{x_\Sigma (x_\Sigma + x')} + s_0 T_f' P_0 + \eta (1 + s_0^2 T_f'^2) > 0, \quad (1.46)$$

$$\text{де} \quad \eta = 2T_j / T_f'^2. \quad (1.47)$$

Аналіз цих виразів показує, що якщо машина працює в режимі ідеального компенсатора $P_0 = 0$, то межа стійкості визначається (1.42), тобто умовою $E' = \text{const}$. Якщо машина працює генератором, то при $s_0 \ll 0$ область стійкості буде рости, а при $s_0 > 0$ зменшуватися. При певному значенні ковзання $s_0 < 0$ можна забезпечити стійку роботу на межі пропускної здатності лінії. Дійсно, з (1.45) отримаємо, що при $P_0 = UU_\infty / x_\Sigma$ стійкість за цим критерієм буде забезпечена, якщо

$$s_0 \leq -x' U_\infty / (x' + x_\Sigma) U T_f'. \quad (1.48)$$

З (1.46) за цієї ж умови отримаємо

$$s_0 T_f' \leq -\frac{UU_\infty}{2x_\Sigma \eta} \pm \sqrt{\frac{U^2 U_\infty^2}{4x_\Sigma^2 \eta^2} + \frac{x' U_\infty^2}{\eta x_\Sigma (x' + x_\Sigma)}} - 1. \quad (1.49)$$

Зі значень s_0 , що відповідають (1.48) і (1.49), мають бути вибрані ті, які задовольняють обом нерівностям. Отже, робота з ковзанням, відмінним від нуля, при $P_0 \neq 0$ сприяє підвищенню меж стійкості. Однак такий спосіб не являється цілком прийнятним, оскільки межі стійкості стають залежними від ковзання s_0 , яке під час роботи може змінюватися з тих або інших причин.

Нехай тепер, як і раніше, $k_e = k_f = 0$, але амплітуда напруги змінюється з ковзанням, тобто приймемо, що $\alpha_1 > 0$. При $s_0 = 0$ умова $a_3 > 0$ записується у виді

$$a_3 \equiv Q_0 + \frac{U_\infty^2}{x_\Sigma'} + \frac{\alpha_1 U_\infty}{x_\Sigma T_f'} = \sqrt{\frac{U^2 U_\infty^2}{x_\Sigma^2} - P^2} - \frac{x' U_\infty^2}{x_\Sigma x_\Sigma'} + \frac{\alpha_1 U_\infty}{x_\Sigma T_f'} > 0. \quad (1.50)$$

Звідси видно, що зі збільшенням α_1 збільшується область стійкості. Так, якщо прийняти $\alpha_1 = x'U_\infty / x_\Delta x'_\Sigma$, то межа стійкості відповідатиме значенню UU_∞ / x_Δ , тобто $\Theta_\Delta = 90^\circ$. При подальшому збільшенні можна досягти такого положення, коли умови стійкості не лімітуватимуть роботу машини в тому або іншому режимі. Таким чином, якщо обмежитися лише умовами статичної стійкості, то можна не вводити зворотних зв'язків $\underline{e}_f$ і компенсації перехресних зв'язків. Однак для випадку $s_0 \neq 0$ цей висновок був би неправильним, оскільки навіть без урахування вимоги симетрування каналів регулювання для досягнення умов стійкості при досить великих $|s_0|$ потрібні великі значення α_1 , що не завжди можна досягти.

При ковзанні $s_0 \neq 0$ і компенсації перехресних зв'язків умови стійкості можна записати у виді

$$a_3 = a_{30} + \alpha'_1 U_\infty / x_\Sigma T'_f > 0;$$

$$a_1 a_2 - a_0 a_3 = \Delta_0 + \alpha'_1 U_\infty / x_\Sigma T'_f > 0,$$

де значення α_{30} и Δ_0 відповідають (1.45) і (1.46) при $s_0 = 0$. Аналіз цих умов дозволяє стверджувати, що при відповідних значеннях коефіцієнта α'_1 можливе забезпечення стійкої роботи в необхідній безлічі усталених режимів – множині, обмеженій лише номінальними значеннями величин.

Проаналізуємо тепер узагальнений синхронний режим. Розглянемо спочатку випадок, коли ковзання усталеного режиму $s_0 = 0$. Основною відмінною особливістю асинхронізованої машини перед звичайною синхронною являється можливість забезпечення керування, при якому приріст ЕРС статора при малих відхиленнях від усталеного режиму було б спрямовано під визначеним кутом до $\underline{u}_\infty$ (незалежно від значення кута Θ між векторами ЕРС і напругою статора). Нехай приріст ЕРС дорівнює:

$$\Delta \underline{e} = j(k_0 \Delta \delta + k_1 \Delta s), \quad (1.51)$$

де $\Delta \delta$ та Δs – прирости кута і ковзання; k_0 та k_1 – деякі коефіцієнти.

Приріст ЕРС ротора в синхронних осях (Δe_f) визначається як

$$\Delta \underline{e}_f = j\Delta \underline{e} = -(k_0\Delta\delta + k_1\Delta s). \quad (1.52)$$

Для забезпечення зміни $\Delta \underline{e}_f$ (див. рис. 1.7, б) реальні прирости (в осях qd) будуть

$$\Delta \underline{e}_{fqd} = \Delta \underline{e}_f \underline{e}^{-j\delta} = -(k_0\Delta\delta + k_1\Delta s)e^{-j\delta}, \quad (1.53)$$

чи

$$\left. \begin{aligned} \Delta e_{fq} &= (k_0\Delta\delta + k_1\Delta s)\cos\delta; \\ \Delta e_{fd} &= (k_0\Delta\delta + k_1\Delta s)\sin\delta. \end{aligned} \right\} \quad (1.54)$$

Ця зміна ЕРС може бути реалізовано за допомогою однієї з функцій регулювання. Так, якщо сформулювати функції

$$\Delta u'_{fq} = -(k_0\Delta\delta + k_1\Delta s)\cos\delta; \quad (1.55)$$

$$\Delta u'_{fd} = (k_0\Delta\delta + k_1\Delta s)\sin\delta, \quad (1.56)$$

то при повній компенсації ($\underline{\varepsilon} = 0$) струми ротора будуть дотримуватися цих сигналів. При $\underline{\varepsilon} \rightarrow 0$ ця відповідність виконуватиметься з певною погрешністю.

У простому випадку компенсуючих зв'язків може не бути. Саме таке регулювання і було уперше запропоноване незалежно один від одного В. Фреєм і М. М. Ботвинніком з М. С. Фезі-Жилінської.

Запишемо в загальному випадку функцію регулювання u'_{fqd} аналогічно функції асинхронного режиму, але з тією відмінністю, що замість оператора $e^{-j\delta}$ використаємо оператор $e^{j\omega} f^t$, де ω_f – частота задатчика, яка в даному випадку дорівнює нулю :

$$\underline{u}'_{fqd} = (1 + k_e)\underline{u}'_{f.zad} - k_e \underline{e}_f, \quad (1.57)$$

у синхронних осях

$$\underline{u}'_f = (1 + k_e)\underline{u}'_{f.zad} e^{j\delta} - k_e \underline{e}_f, \quad (1.58)$$

причому

$$\underline{u}'_{f.zad} = \underline{u}'_{f0} + \Delta \underline{u}'_f; \quad \underline{u}'_{f0} = \underline{u}'_{fq0} = j\underline{u}'_{fd0} = \alpha_0 + j\beta_0, \quad (1.59)$$

де α_0 та β_0 – деяка напруга постійного струму, що забезпечує необхідне завантаження обмоток в усталеному режимі. Якщо $\alpha_0 = \beta_0$, то обмотки навантажені однаково (найбільш прийнятний режим для машин с симетричною системою обмоток ротора), якщо ж $\alpha_0 = 0$ чи $\beta_0 = 0$, то нормально розвантажені або обмотка d , або обмотка q (режим, переважний для машин з несиметричною системою обмоток). Опускаючи всі проміжні операції, записуємо остаточний вид характеристичного рівняння:

$$\left(1 + pT_{fk} \frac{x'_\Sigma}{x_\Sigma}\right) \left\{ p^2 T_j \frac{x'_\Sigma}{x_\Sigma} T_{fk} + p^2 T_j + p \frac{T_{fk}}{x_\Sigma} \left[\frac{U_\infty k_1}{T_{fk}} + (U_\infty^2 + x'_\Sigma Q_0) \right] + \left[Q_0 + \frac{U_\infty^2 + k_0 U_\infty}{x_\Sigma} \right] \right\} = 0; \quad (1.60)$$

де T_{fk} , x_Σ та x'_Σ відповідають (1.40).

Один з коренів характеристичного рівняння визначимо відразу:

$$p = -x_\Sigma / x'_\Sigma T_{fk}. \quad (1.61)$$

Далі в (1.60) аналізуватимемо лише вираження, яке стоїть у фігурних дужках.

Умовами стійкості є

$$\left. \begin{aligned} \alpha_3 = Q_0 + U_\infty^2 / x_\Sigma + k_0 U_\infty / x_\Sigma &> 0; \\ \alpha_1 \alpha_2 - \alpha_0 \alpha_3 \equiv k_1 + \frac{T_{fk}}{x_\Sigma} [(x - x') U_\infty - k_0 x'] &> 0. \end{aligned} \right\} \quad (1.62)$$

Аналіз умов (1.62) призводить до наступних висновків. Для машини з нерегульованою амплітудою напруги ротора ($k_e = k_0 = k_1 = 0$) межа стійкості відповідає вираженню

$$Q_0 + U_\infty^2 / x_\Sigma = 0, \text{ тобто } \Theta = 90^\circ, \text{ чи } E = \text{const}. \quad (1.63)$$

Межа стійкості нерегульованої узагальненої і звичайної синхронної машин одна і та сама. Для так званого пропорційного закону регулювання ($k_e = k_1 = 0$) межа стійкості

$$Q_0 + U_\infty^2 / x'_\Sigma = 0. \quad (1.64)$$

Але це означає, що при пропорційному регулювання асинхронізована машина, що працює в узагальненому синхронному режимі, – має межу, яка відповідає $\Theta' = 90^\circ$, чи $E' = \text{const}$.

При $k_1 \neq 0$, $k_0 \neq 0$ та $k_e = 0$, тобто при сильному регулюванні, отримаємо

$$\left. \begin{aligned} k_0 U_\infty / x_\Sigma + U_\Sigma^2 / x_\Sigma &> -Q_0; \\ k_1 + \frac{x_\Sigma - x'_\Sigma}{x_\Sigma} T_f U_\infty &> k_0 T_f \frac{x'_\Sigma}{x_\Sigma}, \end{aligned} \right\} \quad (1.65)$$

звідки видно, що машина може бути стійка у будь-якому режимі із заданої сукупності тих усталених режимів, які зазвичай лімітуються номінальними значеннями величин.

З розгляду отриманих вище умов стійкості виходить, що при $s_0 = 0$ у машини, працюючої в узагальненому синхронному режимі (так само як і при роботі в узагальненому асинхронному режимі), теоретично можливо забезпечення стійкості необхідного усталеного режиму без застосування засобів компенсації інерційності ротора.

В результаті підбору α_0 та β_0 можна необхідним чином завантажувати обмотки ротора, а також орієнтувати (при зміні навантаження) їх в просторі. Так, можна, як це показано на рис. 1.7, в, забезпечити постійну роботу машини з кутом $\delta_0 = 0$. При змінні навантаження в цьому випадку змінюватиметься завантаження обмоток ротора. Можна також підставити на обмотки q та d різні функції, припустимо за допомогою обмотки q регулювати електромагнітний момент, а обмотки d – реактивну потужність або напругу. Функція регулювання для даного випадку може бути отримана з (1.57), якщо підставити $\delta_0 = 0$

$$\left. \begin{aligned} \Delta u'_{fq} &= -(k_0 \Delta \delta + k_1 \Delta s) \cos(\delta_0 + \Delta \delta) \approx -(k_0 \Delta \delta + k_1 \Delta s); \\ \Delta u'_{fd} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (1.66)$$

Якщо тепер звернутися до режимів роботи машини при $s_0 \neq 0$, то з використанням закону регулювання, компенсуючого перехресні зворотні зв'язки (1.55), прийдемо до характеристичного рівняння (1.58) і умов стійкості (1.59), з

яких видно, що при $s_0 \neq 0$ машина може працювати стійко в заданій множині режимів, що встановилися, так само як і при $s_0 = 0$.

Цікаву особливість має закон регулювання, який може бути названий "гібридним". Нехай в машині, працюючій в узагальненому асинхронному режимі, амплітуда напруги збудження змінюється не лише пропорційно ковзанню, але і відхиленню кута від значення $s_0 t$, де $s_0 = \omega_{f0}$ – необхідне ковзання усталеного режиму. Нехай в осях dq ротора функція регулювання машини має вигляд

$$\underline{u}'_{fdq} = -[\alpha_0 + \alpha_1 s + \alpha_2 (\delta - s_0 t) + j\beta_0] e^{-j\delta}. \quad (1.67)$$

Відповідно в синхронних осях отримаємо

$$\left. \begin{aligned} \underline{u}_f &= -[\alpha_0 + \alpha_1 s + \alpha_2 (\delta - s_0 t) + j\beta_0] \\ \Delta \underline{u}'_f &= -(\alpha_1 \Delta s + \alpha_2 \Delta \delta) = -(\alpha_1 p + \alpha_2) \Delta \delta. \end{aligned} \right\} \quad (1.68)$$

Звідси видно, що приріст напруги збудження, обумовлене зміною електромеханічних параметрів (s і δ), завжди спрямовано уздовж осі $\mathcal{Y}$, так само як і в машині, працюючій в узагальненому асинхронному режимі, але містить складову пропорційну прирощенню кута, як в машині, працюючій в узагальненому синхронному режимі. Машина в цілому володіє стійкістю по куту, але допускає незалежне і роздільне регулювання реактивною і активною потужностей.

Остання умова, досяжна, якщо у складі закону регулювання є присутніми також відповідні зворотні зв'язки по $\underline{e}_f$, x'_i чи P і Q , а також містяться, в загальному випадку, і функції, що компенсують перехресні зворотні зв'язки. (При роботі з ковзанням $s_0 = 0$ така компенсація не знадобиться.)

Нескладний аналіз показує, що характеристичне рівняння машини з подібним регулюванням має вигляд

$$xT_J T'_{fk} p^3 + xT_J p^2 + U\alpha_1 p + U\alpha_2 = 0. \quad (1.69)$$

Машина в цьому випадку завжди стійка, а шляхом обрання коефіцієнтів α_1 , α_2 і T'_{fk} можна досягти також і необхідної якості перехідних процесів. При виводі (1.69) припущено, що в законі регулювання асинхронізованої машини міститься

жорсткий негативний зворотний зв'язок (k) по одному з режимних параметрів, тому $T_{fk} = T_f / (1 + k)$. Крім того, вважається також, що перехресні зв'язки компенсуються. Неважко, показати, що і у разі відсутності зворотних зв'язків ($T = T_{fk}$) і компенсації перехресних зв'язків машина залишатиметься стійкою в усіх режимах, а вільний член характеристичного рівняння буде як і раніше визначатися вираженням $U_\infty \alpha_2$.

Розглянуте "гібридне" регулювання може знайти застосування в асинхронізованих машинах в тих випадках, коли за умовами нормальних усталених режимів потрібна робота з досить точною підтримкою необхідного значення ковзання ($s_0 = \omega_{f0}$) і при змінних значеннях моменту на валу і напруги статора.

1.5. Галузь застосування асинхронізованих синхронних генераторів

У останні десятиліття в країні і за кордоном активно ведуться розробки, виготовлення і застосування на практиці регульованих електромашинно-тиристорних комплексів. Створювані на базі останніх досягнень такі комплекси мають ряд принципових переваг в порівнянні із звичайними електричними машинами. Це визначається ширшими можливостями регулювання експлуатаційних характеристик агрегатів, забезпеченням кращої адаптації до умов роботи, що змінюються, з метою підвищення економічності і надійності роботи установок.

Електромашинно-тиристорні комплекси знаходять застосування і є перспективними в якості генераторів. Генераторно-тиристорні комплекси дозволяють вирішувати повністю або частково додаткові по відношенню до звичайних генераторних установок завдання:

- підвищення економічності роботи за рахунок регулювання частоти обертання залежно від параметрів енергоносія первинного двигуна при збереженні незмінної частоти електроенергії, що виробляється;

- розширення діапазонів регулювання активної і реактивної потужності, у тому числі глибоке споживання останньої;
- підвищення статичної і динамічної стійкості паралельної роботи самих машин, систем передачі електроенергії, енергосистем в цілому;
- поліпшення якості управління перехідними процесами;
- підвищення експлуатаційної надійності, зокрема готовності самих генераторних установок, за рахунок органічної наявності у деяких з них надмірності в основних ланцюгах і в системах управління, скорочення за цей рахунок експлуатаційних витрат.

Природно, це досягається деяким ускладненням і збільшенням вартості як внаслідок установки тиристорних перетворювальних пристроїв, так і ускладнення в деяких випадках власне електричної машини.

Генераторно-тиристорні комплекси за місцем підключення перетворювача частоти можна розділити на дві групи.

До першої групи входить синхронний або асинхронний генератор, пов'язаний з мережею через тиристорний перетворювач частоти, потужність якого дорівнює потужності генератора. Остання обставина визначає великі габарити і високу вартість установок, що відповідно обмежує сферу застосування, особливо в зоні великих потужностей.

До другої групи відносяться так звані асинхронізовані синхронні генератори (АСГ) або просто асинхронізовані генератори, що складаються з машини змінного струму і перетворювача в ланцюзі збудження, що забезпечує можливість створення керованих магнітних полів по двом взаємно перпендикулярним осям ротора (подовжньою і поперечною). Система обмоток збудження може мати дві фази і більше і бути симетричною або несиметричною.

Перевагою такого комплексу є менша, залежна від необхідного діапазону зміни частоти обертання потужність перетворювача (звичайна не більше 20...25 % потужності генератора).

Наявність на роторі багатофазної (дві фази і більше) системи обмоток збудження з роздільним управлінням по осях дозволяє, окрім зміни поля

збудження, що характерно для звичайних синхронних машин, змінювати (причому швидко) кутове положення поля відносно ротора. Це створює поле, що обертається відносно ротора, і забезпечує при практично симетричній системі обмоток збудження обертання ротора з частотою, відмінною від синхронної. Струм збудження змінний і має частоту, рівну електричній частоті ковзання ротора.

Роздільне управління збудженням по осях дозволяє незалежно регулювати активну (електромагнітний момент) і реактивну потужності (напруга). Це ж істотно підвищує статичну і динамічну стійкість машини, особливо в зоні споживання реактивної потужності. У АСГ знімається обмеження останнього режиму за умовами стійкості, що характерно для звичайних синхронних генераторів; робота в такому режимі обмежується лише нагрівом обмоток і торцевих зон статора (у турбогенераторів).

Істотною з точки зору експлуатації перевагою АСГ є те, що при ушкодженнях в ланцюгах збудження можливо зберегти агрегат в роботі в синхронному режимі зі збудженням по одній з осей ротора або ж в асинхронному режимі без збудження при закорочених обмотках ротора. Можливість управління у АСГ частотою і фазою генерованої ЕРС незалежно від частоти обертання ротора істотно спрощує процес їх синхронізації з мережею і з іншими машинами. Асинхронізовані генератори можуть бути технічно і економічно доцільні не лише для традиційних теплових і гідравлічних електростанцій середньої і великої потужності, але і для вітроелектричних установок, деяких типів малих ГЕС. Крім того, асинхронізовані машини можуть ефективно використовуватися для роботи в режимах як генератора, так і двигуна для оборотних агрегатів гідроакумуючих електростанцій і приливних електростанцій, а також в так званих асинхронізованих електромеханічних перетворювачах частоти для гнучкого зв'язку між електричними мережами, що мають різні номінальні частоти, або при однакових номінальних частотах для підвищення стійкості і керованості зв'язків, а також для обмеження (якщо це необхідно) передачі тих або інших збурень або аномальностей від споживача в мережу (зокрема, великих ударних навантажень) і навпаки – від мережі до споживача.

В радянському союзі виробляли та встановлювали різні АСГ невеликої потужності. Так з 1961 р. на Іовській ГЕС Коленерго працюють два асинхронізованих гідрогенератора потужністю 50 МВт, розроблені і створені ЛБЕО "Електросила". Ці гідрогенератори вирішують локальну проблему підвищення стійкості частини електричної системи, безпосередньо прилеглою до гідростанції. Асинхронізований генератор виконаний в традиційному вертикальному виконанні. Генератор має повітряну систему охолодження, статор не відрізняється по своїй конструкції від статорів машин класичного виконання. Ротор машини неявнополюсний і містить дві обмотки збудження, укладені під кутом 90 ел. град один до одного, обмотки ротора - двошарові петлеві.

На валу генератора розташовані: допоміжний синхронний генератор потужністю 2,5 МВ·А для живлення реверсивних збудників; збудник постійного струму на випадок відмови основної системи збудження; синхронний тахогенератор з постійними магнітами (датчик кутового положення ротора), що має однакове з основним генератором число пар полюсів.

Основні дані генератора приведені в табл. 1.1.

Регулятор відпрацьовує закон незалежного управління проекціями вектору ЕРС якоря генератора на синхронні осі u ; v . Оскільки ЕРС недоступна безпосередньому вимірюванню, вона визначається за допомогою спеціального блоку, який вирішує рівняння якоря, для чого на вхід цього блоку поступає інформація про значення напруги і струму.

Тривалий період експлуатації асинхронізованих генераторів показав надійність і працездатність усіх вузлів і власне генератора, і системи збудження.

На одному з генераторів реалізована система незалежного збудження, на іншому – схема самозбудження. У нормальних робочих режимах генератори призначені для роботи з постійним ковзанням (1...0,5%). Проте в процесі експлуатації здійснюються і режими регулювання ковзання в діапазоні $\pm 1,0\%$.

Здійснювалися також і режими глибокого споживання реактивної потужності, коли кут навантаження Θ досяг 145° , генератор при цьому працював стійко. Асинхронізований генератор випробовувався і в динамічних режимах, при

коротких замиканнях на шинах високої напруги станції. Випробування показали, що генератор при трифазному короткому замиканні з початковим номінальним режимом зберігає динамічну стійкість впродовж часу $\Delta t_k = 0,3$ с, тоді як синхронний генератор має граничний час $\Delta t_k = 0,2$ с.

Таблиця 1.1. – Основні дані АСГ, що встановлений на Іовській ГЕС

Найменування параметра	Значення
Номінальна потужність, МВ·А	50
Номінальна активна потужність, МВт	50
Напруга статора, кВ	10,5
Струм статора, кА	2,75
Число пар полюсів	22
Діапазон робочих ковзань, о. е.	$\pm 0,01$
Струм і напруга подовжньої і поперечної обмоток збудження, кА/кВ	0,7/1,59
Синхронний індуктивний опір x , о. е.	1,8
Перехідний індуктивний опір x , о. е.	0,325
Постійна часу обмоток збудження T_{d0} , с	3,2
Постійна часу інерції T_j , с	7,8

В 1968 – 1972 р. на ЛВЕО "Електросила" був спроектований і встановлений на Кислогубській приливній електростанції (ПЕС) генератор-двигун, потужність якого дорівнює 400 кВт. На шихтованому роторі машини розташована симетрична трифазна система обмоток, сполучених в зірку. Конструктивно машина не відрізняється від асинхронного двигуна з фазним ротором. Основні дані генератора-двигуна наведені в табл. 1.2.

Машина працює в генераторному і руховому режимах зі швидкостями обертання, що відрізняються від синхронної на $\pm 30\%$.

В генераторі-двигуні Кислогубської ПЕС регулювання по каналу реактивної потужності забезпечує підтримку $\cos \varphi = 1$. Проведені енергетичні випробування

генератора-двигуна в усіх режимах при різних напорах води H показали доцільність використання на ПЕС асинхронізованих генераторів, оскільки завдяки можливості регулювання частоти обертання ККД агрегату зростає на 5-6% за рахунок значного збільшення ККД турбіни (рис. 1.12).

Таблиця 1.2. – Данні на асинхронізований генератор-двигун, що працює у складі Кислогубської ПЕС

Найменування параметра	Значення
Номінальна потужність, кВ·А	500
Номінальна активна потужність, кВт	400
Напруга статора, кВ	380
Струм статора, кА	750
Число пар полюсів	6
Діапазон зміни частоти обертання, об/хв	350–650
Синхронна швидкість, об/хв	500
Струм і напруга обмотки збудження, А/В	350/250
Синхронний індуктивний опір x , о. е.	1,05
Перехідний індуктивний опір x' , о. е.	0,136

Для тих же цілей, що і в ПЕС, у вітроелектричних установках (ВЕУ) доцільно використати асинхронізовані генератори. Найбільш великою з введених в експлуатацію являється ВЕУ "Гровіан-1", в якій використаний асинхронізований генератор фірми "Сіменс". "Гровіан-1" - ВЕУ типу вежі з горизонтальною віссю обертання. Вітроколесо і приміщення для генератора повертаються на вершині опори відповідно до напрямку вітру з підвітряного боку.

Сила тяги і обертовий момент, що виникають на вітроколесі, залежать від умов обтікання профілю крила, які визначаються коефіцієнтом швидкості (відношення окружної швидкості ротора і швидкості вітру) і кутом установки лопастей. Ці величини визначають коефіцієнт використання потужності (відношення потужності, що передається від ротора, до потужності потоку

повітря, що протікає через площину кола ротора) (рис. 1.13). Коефіцієнт використання потужності і являється ККД перетворення вітроколеса.

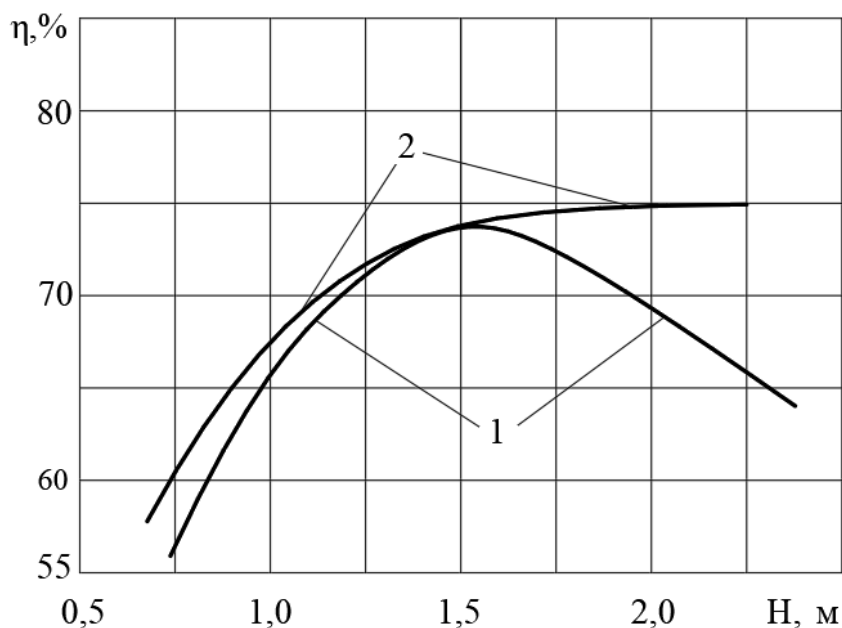


Рис. 1.12. – Порівняння ККД генератор-двигуна Кислогубської ПЕС при постійній 1 і регульованій 2 в межах $\pm 30\%$ кутовій швидкості ротора

Накидання потужності на вітроколесо знімається збільшенням кута установки лопастей. У положенні (кут 90°), що флюгує, відбір потужності від вітроколеса незалежно від швидкості вітру залишається рівним нулю.

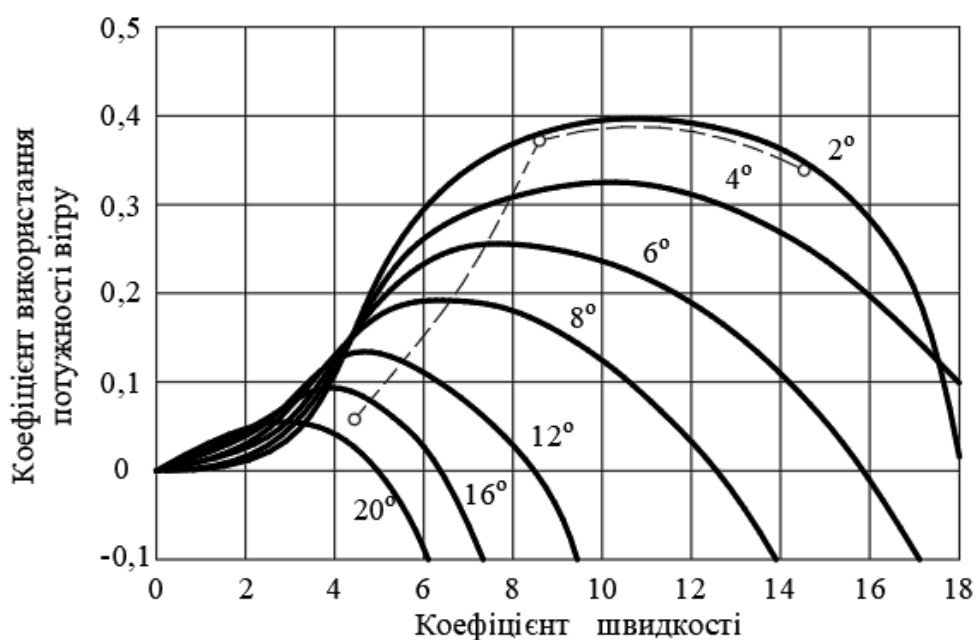


Рис. 1.13. – Криві залежності коефіцієнта використання потужності вітру від коефіцієнта швидкості і кута установки лопастей ВЕУ "Гровіан-1"

Для активного гальмування вітроколеса можна інвертувати напрямок потоку потужності за рахунок переходу вітроколеса в область роботи з негативним значенням коефіцієнта використання потужності.

Найкращий ККД вітроколесо має, коли працює з малим кутом установки лопастей і оптимальною частотою обертання, яка при цьому повинна підтримуватися пропорційною швидкості вітру. Режим з оптимальним ККД (пунктирна лінія на рис. 1.13) є бажаним, оскільки при ньому значно покращується енерговіддача при невеликих швидкостях вітру, що часто має місце при неповному навантаженні. Це вимагає від генератора здібностей працювати зі змінною частотою обертання.

При перетворенні енергії вітру мають місце різкі короточасні коливання вітрових потоків, що ускладнює отримання постійної частоти. При використанні асинхронізованих генераторів енергія поривів вітру не передається безпосередньо в мережу, а запасується в махових масах установки, що знижує механічні навантаження, згладжує поштовхи потужності і т. д.

Система регулювання вітроколеса і генератора ВЕУ "Гровіан-1" виконує наступні завдання:

- пуск, розгін і зупинку ВЕУ в нормальних і аварійних умовах;
- стабілізацію частоти обертання ротора у генераторних режимах;
- обмеження потужності при штормових поривах вітру;
- оптимізацію віддачі потужності в режимах з неповним навантаженням;
- згладжування коливань електричної потужності при поривчастому вітрі.

Статор асинхронізованого генератора підключений безпосередньо до мережі змінного струму, а трифазний ротор живиться від тиристорного трифазного реверсивного випрямляча (перетворювача частоти), сполученого з мережею через погоджувальні трансформатори. Якщо в результаті неполадок в системі регулювання кутува швидкість обертання ротора під час роботи перевищить верхню межу, то обмотка збудження відключиться від збудника і замкнеться на активний опір. Машина переходить в режим асинхронного генератора, ротор електрично гальмується.

Перший у світовій практиці АСТГ потужністю 200 МВт був розроблений спільно ВАТ "ВНИИЭ" і НВО "Електротяжмаш", виготовлений і в 1985 р. встановлений на Бурштинській ГРЕС (Україна). У 1991 р. на тій же ГРЕС був включений в експлуатацію другий турбогенератор вже серійного виконання типу АСТГ-200-2УЗ. Уперше в Росії АСТГ з симетричною системою збудження (класичний) типу ТЗФА-110-2УЗ потужністю 110 МВт (виробництва ВАТ "Електросила") в грудні 2003 р. був введений в експлуатацію на ТЕЦ-22 ВАТ "Мосенерго". В 2007 році на ТЕЦ-27 ВАТ "Мосенерго" було встановлено АСТГ типу ТЗФА-160-2УЗ. В 2008 році АСТГ того ж типу було встановлено на ТЕЦ-21 та ТЕЦ-27 ВАТ "Мосенерго". В 2009 році АСТГ типу ТЗФСУ-320-2УЗ було встановлено на Кашірській ДРЕС.

Також за кордоном встановлювалися багато інших асинхронізованих генераторів, список деяких з них приведений у табл. 1.3.

Таблиця 1.3. – Асинхронізовані зворотні гідрогенератори на ГАЕС за кордоном

ГАЕС	Дата випуску	Потужність в режимі двигуна, МВт	Потужність в режимі генератора, МВт	Швидкість обертання, об/хв	Виробник
Ягасава-2	1990	53-82	85	130-156	Toshiba
Таками-2	1993	54-140	140	200-254	Mitsubishi
Окавачи-2	1993	331-397	385	330-390	Hitachi
Шиобара-3	1995	200-380	360	356-394	Toshiba
Окавачи-4	1995	240-400	385	33-390	-
Ягасава-3	1996	53-82	85	130-156	Toshiba
Окукиотсу	1998	230-340	345	408-450	Toshiba
Голдисталь	2003	300-351,6	285	280,7-346	VA Tech
Казуногава	2005	-	500	500 синхр.	-
Омаругава	2005	230-330	340	578-624	Mitsubishi

1.6. Висновки до розділу 1

1. В якості електричної машини, що входить до складу асинхронізованої машини може використовуватися асинхронна машина з фазним ротором як серійного виготовлення, так і спеціально спроектована.

2. Для опису перехідних процесів машини використовують рівняння Парка - Горєва. Ці рівняння записані для ідеальної машини, в якій відсутні втрати в сталі, а також нелінійні магнітні явища, не враховуються гістерезис, вищі гармонійні у складі магнітного поля.

3. До складу асинхронізованої машини окрім електричної машини входять збудник і автоматичний регулятор збудження, що утворюють систему автоматичного керування машиною.

4. Якщо машина працює генератором, то при $s_0 \ll 0$ область стійкості буде рости, а при $s_0 > 0$ зменшуватися. При певному значенні ковзання $s_0 < 0$ можна забезпечити стійку роботу на межі пропускної здатності лінії. При $s_0 = 0$ у машини, працюючої в узагальненому синхронному режимі (так само як і при роботі в узагальненому асинхронному режимі), теоретично можливо забезпечення стійкості необхідного усталеного режиму без застосування засобів компенсації інерційності ротора.

5. Асинхронізовані генератори можуть бути технічно і економічно доцільні не лише для традиційних теплових і гідравлічних електростанцій середньої і великої потужності, але і для вітроелектричних установок, деяких типів малих ГЭС. Крім того, асинхронізовані машини можуть ефективно використовуватися для роботи в режимах як генератора, так і двигуна для оборотних агрегатів гідроакумуючих електростанцій і приливних електростанцій, а також в так званих асинхронізованих електромеханічних перетворювачах частоти для гнучкого зв'язку між електричними мережами.

6. Використання асинхронізованого синхронного генератора з огляду на проведений аналіз дозволяє говорити про доцільність його використання в якості валогенератора.

РОЗДІЛ 2. КОНСТРУКТИВНА РЕАЛІЗАЦІЯ БЕЗЩІТКОВОГО АСИНХРОНІЗОВАНОГО СИНХРОННОГО СУДНОВОГО ВАЛОГЕНЕРАТОРА

2.1. Загальні відомості по валогенераторним установкам

Одним з найпоширеніших видів, застосовуваних на судах генераторних агрегатів, є дизель-генератори (ДГ), що відрізняються високим ККД, автономністю в роботі, швидким запуском. ДГ мають прямий привід від дизеля. Як приводний двигун застосовуються чотиритактні двигуни, тому що вони мають більший моторесурс у порівнянні з двотактними двигунами.

Турбогенератори використовуються на турбоходах, а також на теплоходах і газотурбоходах, якщо їхні утилькоти на ходу забезпечують необхідні параметри пари для роботи турбогенераторів. Зазвичай це установки з потужністю головного двигуна 10000 кВт і більш. Передача потужності від турбіни до генератора здійснюється через редуктор.

До складу суднової електростанції включається кілька основних генераторів і резервний генератор, у випадку виходу з ладу основного генератора нестача енергії в ходовому й аварійному режимі повинна покриватися потужністю резервного. Приводні двигуни звичайно однотипні, що зменшує номенклатуру запасних частин.

У випадку виходу з ладу основної електростанції за правилами Регістра на судах встановлюється аварійна електростанція, яка складається з генератора і розподільного щита. У якості аварійних використовуються дизель-генератори, з огляду на їхню автономність у роботі і швидкій готовності до пуску.

Валогенераторами (ВГ) називаються допоміжні механізми з приводом від валопроводу судна через клиноременну або зубчасту передачу, або від фланця відбору потужності з носового торця дизеля, або від приводу редуктора або реверс-редуктора. При наявності ВГ допоміжні дизель-генератори в ходовому режимі не працюють, що збільшує їхній ресурс і дозволяє заощаджувати паливе.

Ці механізми широко поширені на судах з дизельними установками і, головним чином, на невеликих морських судах (буксирах-штовхачах, суховантажних теплоходах і танкерах), а також на судах річкового флоту. На пасажирських теплоходах (крім швидкісних) їх, як правило, не використовують. Валогенератор доцільно застосовувати в тих випадках, коли головні передачі в ходовому режимі працюють тривалий час при постійному, близькому до номінального, малозмінному режимі. Особливо широко поширені ВГ насамперед на рибальських траулерах. Застосування електричних тралових лебідок постійного струму викликало необхідність установки на траулерах спеціальних лебідочних валогенераторів, потужність яких складала 10...15, а то і 25% потужності головних ДВЗ. Також ВГ використовуються і на судах з динамічними принципами підтримки (рис. 2.1).

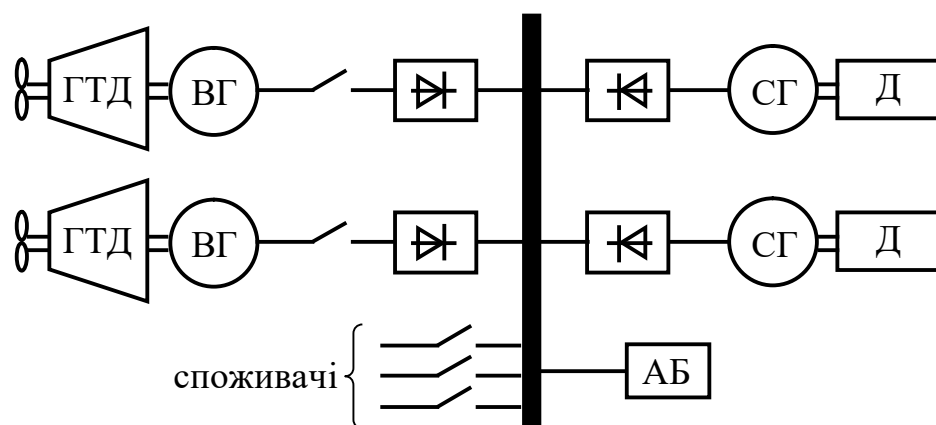


Рисунок 2.1. СЕС корабля з динамічним принципом підтримки

Застосування ВГ у ряді випадків може виявитися недоцільним, а саме: на суховантажних і наливних теплоходах класу М-СП (судна змішаного плавання), паромних переправах, інших судах, де час використання ВГ не перевищить 25% ходового часу.

Застосування валопроводу в якості приводу засноване на тім, що потужність головного двигуна, яка передається на валопровід, в усіх режимах роботи, за винятком періоду стоянки і самого повного ходу судна, використовується не повністю. Наявність надлишкової потужності в головного двигуна дозволяє

використовувати її на ходу судна для роботи валогенераторів, відмовившись від роботи дизель-генераторів, що зберігає їхній моторесурс. Крім того, валогенератор працює від головного двигуна, який має більш високий ККД, що знижує питому витрату палива на вироблення кожного кВт електроенергії.

Крім генераторів, обертання від валопроводу можуть одержувати й інші допоміжні механізми: компресор, масляний і осушувальний насоси. Усі ці механізми розташовують поруч з валопроводом так, щоб вісь кожного з них була строго рівнобіжна з осью валопроводу. Насаджений на валопровід шків (або зубчасте колесо) передає обертання від валопроводу на ВГ за допомогою плоскоременної, клиноременної або зубчастої передачі, що забезпечує високий ККД (до 90...95%), надійність у роботі і простоту монтажу цих механізмів.

Привід ВГ здійснюється від головних двигунів (ГД) на судах, що не мають частих маневрових режимів. При роботі ГД на повному ході валогенератор цілком забезпечує всіх споживачів електроенергією. При зниженні обертів ГД змінюється швидкість обертання ВГ, напруга і частота струму, що негативно позначається на роботі споживачів. Це також утрудняє або робить майже неможливою паралельну роботу ВГ з автономними генераторами і вимагає швидкого включення резервного джерела електроенергії при постановці машин на «стоп» (переривання живлення не повинне перевищувати 1...2 с.). У цьому випадку необхідно приймати заходу для стабілізації напруги і частоти струму і розділяти споживачі в залежності від їхніх вимог по ступеню стабілізації, що ускладнює схему суднової електростанції.

Для стабілізації частоти обертання використовують муфти складної конструкції або каскадне з'єднання електричних машин. Прикладом другого способу підтримки частоти обертання може служити схема, представлена на рис.2.2.

Від головного двигуна 1 через редуктор 2 приводиться в обертання генератор постійного струму 3, що забезпечує живлення двигуна постійного струму 4. Основним призначенням регуляторів напруги генератора і частоти

обертання двигуна є стабілізація частоти обертання останнього. Двигун постійного струму обертає синхронний генератор 6.

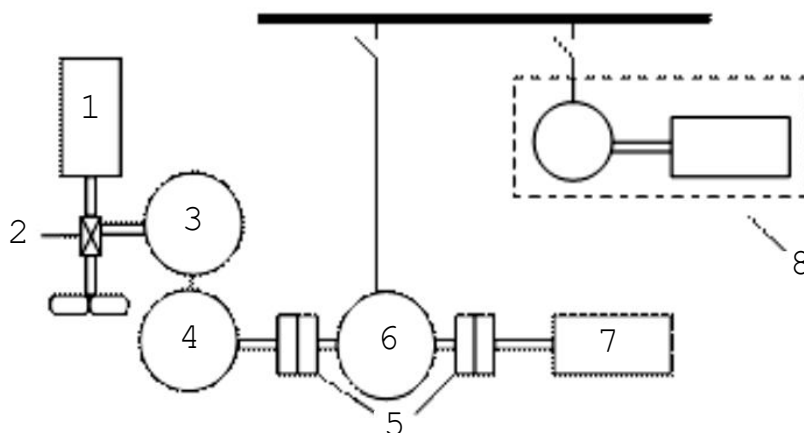


Рисунок 2.2. Структурна схема СЕС з валогенератором

При зниженні частоти обертання головного двигуна нижче деякого припустимого рівня а також при його аваріях відбувається переключення синхронного генератора на обертання від автономного дизеля 7. Переключення здійснюється за допомогою електромагнітних фрикційних муфт 5. У судновій електростанції (СЕС) також передбачений автономний дизель генератор 8. Відповідно до вимог Регістра валогенератори повинні бути розраховані, як мінімум, на короткочасну паралельну роботу з іншими типами генераторних агрегатів для можливості ручного, а також автоматичного (при наявності) перекладу навантаження.

На рис. 2.3 представлена СЕС із ВГ сучасного траулера. У цій системі встановлені: два головних двигуни (Д1 і Д2) по 2640 кВт; двох валогенераторів на змінному і постійному струмах; два допоміжних дизель-генератори (ДГ3 і ДГ4) по 800 кВт. Загальна потужність споживання електроенергії складає 3000...3400 кВт. Найбільш енергоємними споживачами є дві ваєрні лебідки по 650 кВт кожна. Ваєрні лебідка – це промислова лебідка для травлення і вибірки ваєра, буксирування тралу. У промисловому режимі працюють два дизель-генератори й один валогенератор. При максимальному навантаженні виробничого комплексу – два валогенератора й один дизель-генератор. У якості

валогенератора постійного струму рекомендується використовувати генератори з незалежним збудженням. Дана схема дозволяє зменшити потужність джерел змінного струму, спростити ГРЩ, поліпшити масогабаритні характеристики системи в цілому.

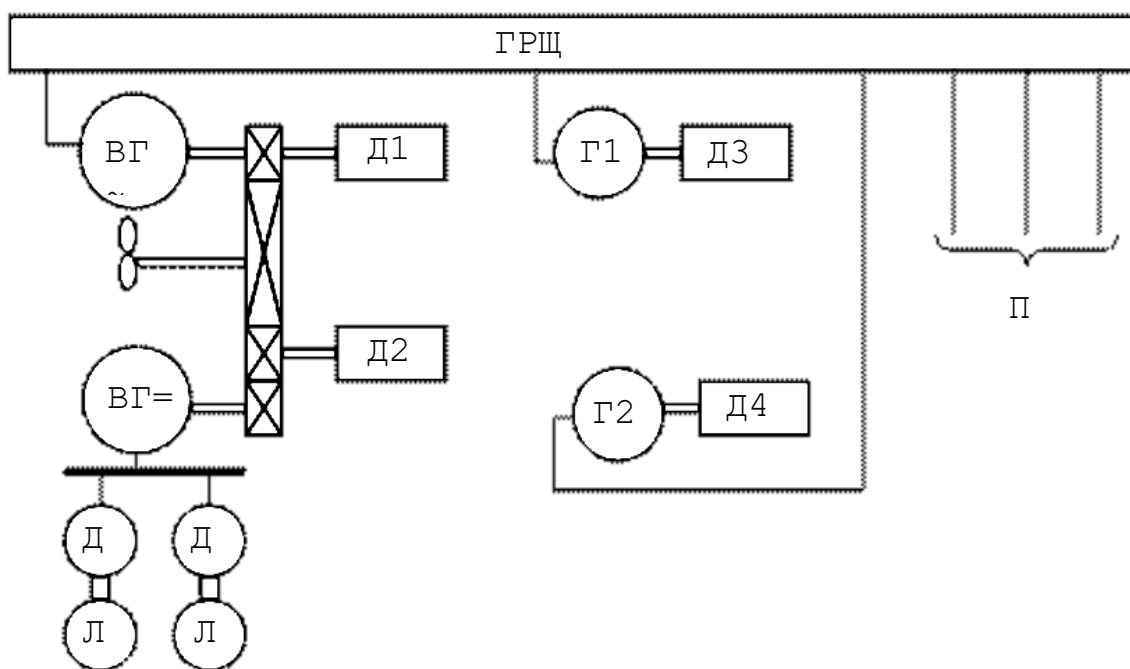


Рисунок. 2.3. Структурна схема СЕС траулера з валогенератором

Електричні способи перетворення електричної енергії, одержуваної від ВГ із нестабільними вихідними параметрами, як правило, базуються на використанні напівпровідникових перетворювачів з ланкою або без ланки постійного струму. У валогенераторних установках з напівпровідниковими перетворювачами електроенергії допускається використовувати генератори з незалежним приводом як синхронні компенсатори. При цьому між генераторами і їхніми приводними двигунами повинні бути встановлені автоматичні роззагальнюючі муфти.

На рис. 2.4 представлена структурна схема системи з повним перетворенням генеруємої валогенератором електроенергії шляхом установки перетворювача частоти фірми AFE (потужністю до 2,5 МВт із повітряним охолодженням і до 4 МВт - з водяним охолодженням).

У режимі електрорушійності електроенергія передається від допоміжних дизель-генераторів через перетворювач частоти на електродвигун. Швидкість електропривода визначається вихідною частотою перетворювача і може змінюватися в широкому діапазоні.

У режимі генерації джерелом енергії є головний двигун. Він приводить в обертання рушій (гвинт) і одночасно – електричну машину. Асинхронна машина передає електроенергію через перетворювач частоти в суднову електричну мережу, при цьому забезпечується стабільна частота і напруга на споживачах.

У режимі генерації можлива рівнобіжна робота перетворювача частоти з допоміжними дизель-генераторами. Розподіл навантаження при рівнобіжній роботі відбувається автоматично.

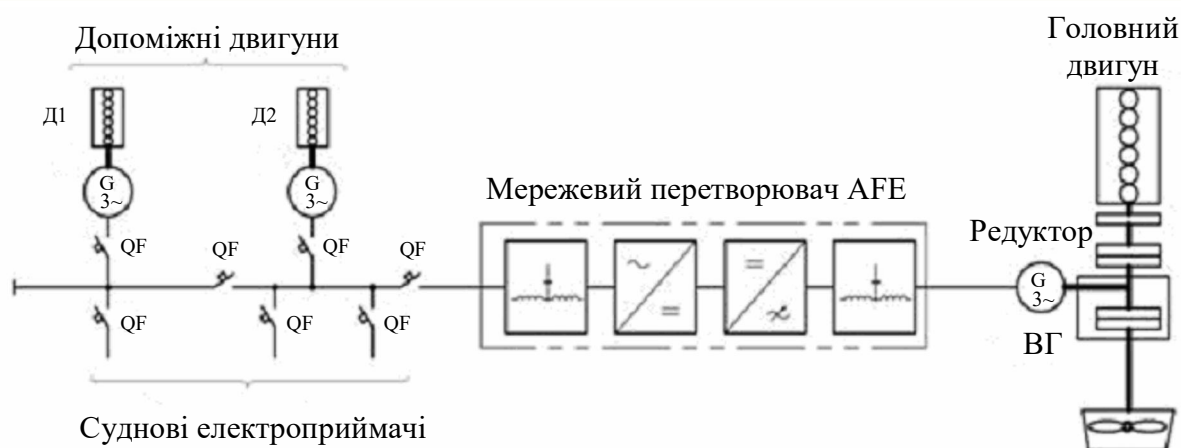


Рисунок 2.4. Валогенератор із напівпровідниковим перетворювачем частоти.

Електрична машина, що обретається, (валогенератор) безпосередньо включається в лінію гребного валу або приєднується до валу відбору потужності редуктора. Мережний перетворювач AFE виконує перетворення частоти і напруги генератора, що працює зі змінною швидкістю, у необхідні стабільні значення параметрів.

Система «валогенератор – двигун» дозволяє оптимально використовувати гребну установку в різних режимах, підвищує надійність, забезпечує економію палива первинних двигунів (на 20...30 % у залежності від режимів роботи).

Перспективним напрямком розробки цього способу, поряд з удосконалюванням схем перетворювачів і розвитком їхньої елементної бази, є

створення електричних машин спеціальних конструкцій: машини, що збуджується змінним струмом, високочастотні і багатофазні машини.

Застосування валогенераторів найбільш доцільне на судах із гребною електричною установкою (ГЕУ). ГЕУ містить у собі ГД, генератор і гребний електродвигун (ГЕД). Регулювання швидкості руху судна здійснюється зміною частоти обертання ГЕД, тобто частота обертання валогенератора не міняється в залежності від зміни режиму роботи судна.

Відзначимо основні вимоги, яким повинна задовольняти електростанція з валогенератором:

- забезпечення усталеної роботи установки при коротких замиканнях у мережі;
- безперебійне живлення відповідальних споживачів при різких (до 40 % у секунду) змінах частоти обертання гребного вала;
- забезпечення живлення відповідальних споживачів при раптових зупинках головного двигуна за рахунок автоматичного запуску резервного живлення і перекаладу навантаження з валогенератора на дизель-генератори;
- підтримка напруги і частоти в припустимих межах в умовах нормальної роботи енергетичних установок при включенні і відключенні споживачів;
- забезпечення тривалої паралельної роботи валогенератора й автономних дизель-генераторів.

Валогенератори можуть також безпосередньо вбудовуватися в лінію гребного вала. Вартість 1 кВт встановленої потужності для валогенератора з генератором, убудованим безпосередньо в лінію вала, на 18...24 % більше, ніж при використанні проміжної передачі. Незважаючи на значні габарити, масу і підвищену вартість, генератор, убудований безпосередньо в лінію вала з малообертовим дизелем, вважається найбільш ефективним.

Зубчаста передача дозволяє використовувати генератор з більш високою частотою обертання і тим самим знизити його габарити і вартість. При безпосередній установці в лінію вала число полюсів ВГ погоджується з частотою обертання головного двигуна. У випадку проміжної передачі для приводу ВГ застосовують самозбудні чотирьохполюсні синхронні (безщіткові) генератори.

Однак, практично неможливо забезпечити тривалу паралельну роботу валогенератора з дизельгенераторами при хвилюванні на морі.

Застосування валогенератора змінного струму в енергетичних установках із гвинтами фіксованого кроку останнім часом засновано на використанні тиристорних перетворювачів частоти і забезпечує тривалу паралельну роботу валогенератора і дизель-генератора. Валогенератор може вступати в роботу, коли частота обертання гребного валу досягне приблизно $(0,3 \dots 0,4) n_{\text{ном}}$. Наприклад, валогенератор потужністю 700 кВт, призначений для сполучення з головним двигуном типу GFCA фірми «Бурмейстер і Вайн» має габарити $2,4 \times 3,4 \times 2,8$ м і масу близько 14 т.

Робота валогенераторів – зазвичай роздільна на свою групу приймачів, але в ряді випадків можлива і спільна робота з іншими джерелами і накопичувачами електричної енергії. Так, при валогенераторній установці постійного струму доцільно використовувати паралельну роботу валогенератора з акумуляторною батареєю.

При використанні в якості ВГ синхронних генераторів може виявитися доцільною паралельна робота валогенератора і дизель-генератора, для цього необхідно використовувати муфту вільного ходу, що дозволяє роторові генератора під дією обертового магнітного поля обертатися швидше, ніж вал приводного двигуна. У цьому випадку навіть при зупинці головного двигуна валогенератор буде продовжувати обертатися, віддаючи в мережу реактивну енергію.

На рис. 2.5 приведена структурна схема суднової електростанції з муфтами вільного руху (МВР). Усі генератори з'єднані з приводними двигунами (дизелями) і гребним валом через муфту вільного руху однобічного зачеплення.

При зменшенні швидкості судна, а отже, і частоти струму валогенератора надійде сигнал на запуск дизеля Д2, який, розігнавшись до синхронної частоти обертання, забезпечить перекидання навантаження на генератор G2, а валогенератор G1 перейде в режим роботи синхронного двигуна. Відповідною зміною струму

збудження можна перевести генератор, що працює в режимі синхронного двигуна, у режим роботи синхронного компенсатора реактивної потужності.

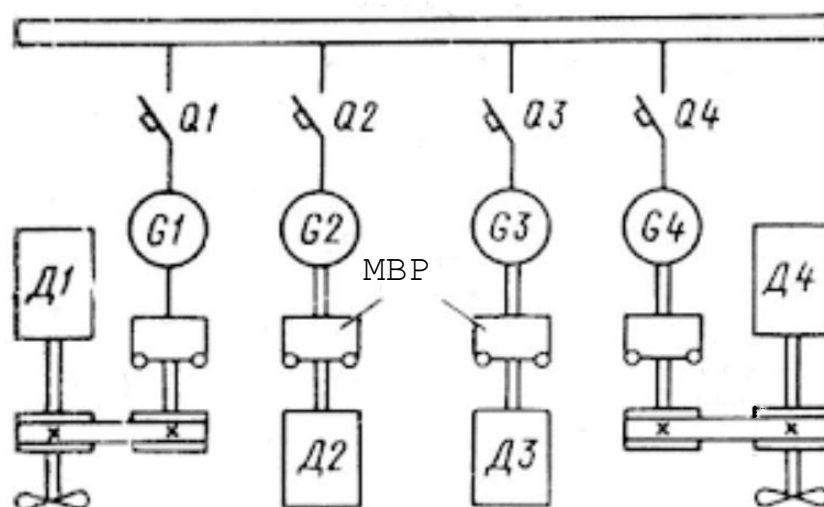


Рис. 2.5. Схема суднової електростанції з використанням муфт вільного руху

Переклад навантаження з одного генераторного агрегату на інший здійснюється без перерви живлення приймачів, причому процес перекладу навантаження надзвичайно простий потрібно тільки здійснити запуск або зупинку одного з приводних двигунів. Для введення в роботу резервних генераторів потрібно тільки запустити приводний двигун. Поліпшується процес розподілу навантажень між паралельно працюючими генераторами і знижуються обмінні коливання між ними. Не потрібно захисту генераторів від роботи в двигунному режимі, тому що споживана генератором потужність при переході в режим двигуна складає близько 5 % номінальної потужності. Коефіцієнт потужності працюючих генераторів може бути доведений до одиниці в результаті роботи одного з паралельно включених генераторів у режимі синхронного компенсатора; при цьому можливий запуск потужних асинхронних двигунів прямим включенням у мережу. При цьому обмежуються провали напруги і зменшуються динамічні навантаження на приводи валогенераторів при різких змінах частоти обертання приводного вала. Застосування МВР у дизель-генераторах збільшує час використання валогенераторів у ходових режимах судна.

Якщо у ВГ застосовується асинхронний генератор, паралельна робота його з іншими дизель-генераторами також раціональна. При роздільній роботі валогенератора перехід на резервне джерело енергії супроводжується перервою живлення, що, однак, не повинне перевищувати 1...2 с.

У випадку паралельної роботи валогенераторів з іншими джерелами встає питання про метод їхнього включення на паралельну роботу. При валогенераторних установках постійного струму включення ВГ на паралельну роботу звичайно не викликає ускладнень. Якщо у валогенераторній установці використовується синхронний генератор, то застосування точної синхронізації обмежено через складність точного регулювання частоти обертання головного двигуна. У цьому випадку доцільне застосування методу грубої синхронізації з струмообмежуючим реактором, при якому вимоги до узгодження частот обертання нижче, ніж при точній синхронізації.

Наприкінці підсумуємо, що застосування валогенераторів дозволяє значно заощаджувати паливо (до 30 %), збільшувати моторесурс допоміжних дизельних установок, робити суднову енергосистему більш гнучкою й економічною. Однак, існує проблема підтримки частоти вихідної напруги на заданому рівні. Рішень досить багато, одне з яких наразі є досить розповсюдженим і полягає у використанні напівпровідникового блоку випрямляч-інвертор. Проблема такого рішення в генеруванні вищих гармонік у мережу, що припускає установку фільтрів і в сукупності із самим напівпровідниковим перетворювачем частоти різко збільшує вартість валогенераторної установки в цілому. Однак, є й інше рішення. Використовувати в якості валогенератора безконтактний асинхронізований синхронний генератор. На його валові розташовується симетрична трифазна обмотка збудження, що одержує живлення від джерела трифазної напруги перемінної амплітуди і частоти. Частота регулюється таким чином, щоб щодо обмотки статора поле збудження завжди оберталося з однією і тією ж частотою. У результаті частота вихідної напруги завжди буде підтримуватись постійною незалежно від частоти обертання вала.

2.2. Відомі конструкції безщіткового асинхронізованого синхронного генератора

Аналіз можливих технічних рішень безконтактного асинхронізованого синхронного генератора (АСГ) дозволив знайти чотири конструкції, запропоновані у відповідних авторських патентах.

В патенті на корисну модель Злобіна А.Ю. (А.с. RU 55516 U1 РФ. Устройство бесконтактного возбуждения асинхронизированных синхронных генераторов [Текст] /А.Ю. Злобин – заявка 2005139289/22; заявл. 15.12.2005; опубл. 10.08.2006, Бюл. №22) запропонований пристрій, який відноситься до області систем збудження електричних машин і може бути використаний для реверсивного безконтактного збудження асинхронізованих синхронних генераторів. У початковому положенні виводи перетворювачів частоти 1 і 2 сполучені з обмотками індукторів 3 і 4, які через електромагнітний потік магнітопровода індуктора сполучені з витками якорів 5 і 6 жорстко закріплених на валу ротора 7 за допомогою діелектричних кріплень якорів 8 і 9, причому вузли з'єднання витків обмотки якорів 10 і 11 сполучені з виводами обмоток збудження. Від перетворювачів частоти 1 і 2 електроживлення підводиться до індукторів машин постійного струму безконтактної системи збудження асинхронізованих синхронних генераторів 3 і 4, причому їх обмотки намотані таким чином, що в індукторах утворюється магнітний потік, спрямований по відношенню до витків якоря системи збудження 5 і 6 в одному напрямі, що при обертанні валу ротора 7 забезпечує наведення в них ЕРС з показниками, пропорційними вихідним параметрам перетворювача частоти, далі напруга утворювана цими ЕРС подається від вузла з'єднання витків обмотки якоря 10 і 11 до відповідних обмоток збудження.

Метою моделі є збільшення надійності, зменшення втрат на перетворення і полегшення управління безконтактних систем збудження асинхронізованих синхронних генераторів за рахунок виключення з схеми збудження

напівпровідникового демодулятора, що обертається, з керованими ключовими елементами змінного струму і заміни допоміжних машин подвійного живлення на дві однакові електричні машини постійного струму що живлять кожна свою обмотку, вихідні параметри яких пропорційні вихідним параметрам перетворювачів частоти, що живлять їх.

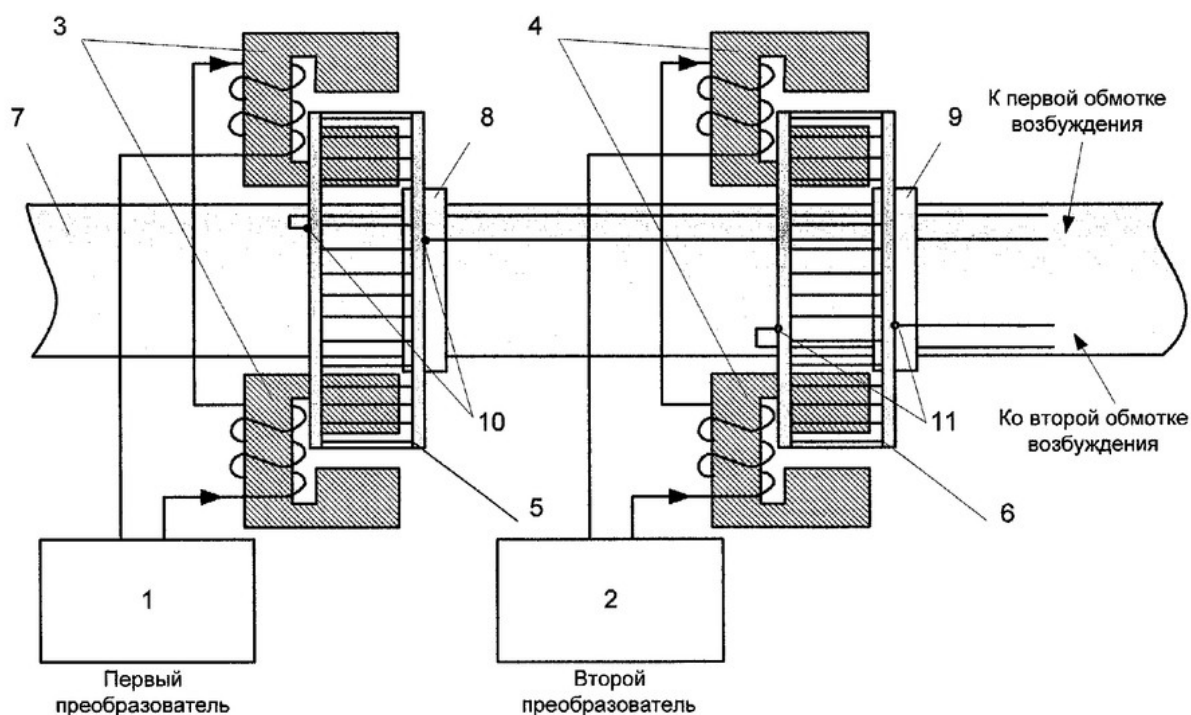


Рис. 2.6. – Будоа безконтактного збудження асинхронізованих синхронних генераторів

Суть моделі полягає в тому, що, окрім відомих і загальних характерних ознак, а саме: перетворювача частоти і обмоток збудження асинхронізованого синхронного генератора, пристрій для безконтактного збудження асинхронізованих синхронних генераторів містить дві однакові електричні машини постійного струму, вихідні параметри яких пропорційні вихідним параметрам перетворювачів частоти, що живлять їх, кожна з яких складається з нерухомої частини - індуктора, що є групою С-подібних магнітопроводів з повітряними проміжками і намотаною на них обмоткою підключеної до виведення перетворювача частоти і рухливої частини - якорі, розташованого на роторі генератора, що є обмоткою типу "біляча клітина", яка складається з жорсткого каркаса і подовжньої обмотки, закріпленої на

ньому, подовжня обмотка представляє собою ізольовані один від одного і від каркаса провідники, які з обох боків сполучені у вузли, що сполучені з виводами обмотки збудження, причому одна сторона якоря закріплена на роторі за допомогою кріплення з діелектричного матеріалу, а інша сторона має можливість обертання у повітряному проміжку магнітопроводів індуктора, одні полюси яких розташовані між тілом ротора і обмоткою, що обертається, а інші полюси - із зовнішнього боку обмотки, причому обмотка на магнітопроводах індуктора намотана таким чином, що вектор магнітної індукції на усіх магнітопроводах індуктора спрямований залежно від напрямку струму, залежного від вихідних параметрів перетворювача частоти, в один бік по відношенню до усіх витків обмотки якоря, у напрямі до валу, або навпаки.

Електрорушійна сила, що індукується в якорях машин постійного струму безконтактної системи збудження, залежить від її конструктивних особливостей (конструкції якоря і індуктора), параметрів електричної енергії на виході перетворювача частоти і частоти обертання валу ротора, що однозначно описується відповідними фізичними законами.

Промислова здійснимість пропонованої моделі обґрунтовується тим, що в ній використовуються відомі в аналогу і прототипі по своєму функціональному призначенню елементи: перетворювач частоти і обмотки збудження асинхронізованого синхронного генератора. Магнітопроводи індуктора і якорів машин постійного струму мають свої аналоги в промисловості.

Позитивний ефект від використання цієї моделі обґрунтовується тим, що за рахунок зменшення функціональних вузлів в передбачуваній моделі в порівнянні з прототипом, збільшується надійність системи збудження і генератора в цілому, зменшуються втрати на перетворення електроенергії, спрощується регулювання системи збудження і знижується вартість виробництва.

Недоліком пропонованої системи є конструктивні особливості використаних для безщіткової передачі електроенергії машин постійного струму. А саме: в якості обмотки ротора використана короткозамкнена біляча клітка, в провідниках якої буде наводитись незначна ЕРС, у зв'язку із чим обмотки

збудження основного генератора, які будуть отримувати живлення від білячої клітки, повинні мати низький омичний опір, що складно буде реалізувати на практиці; також в якості індуктора використовуються С-подібні магнітопроводи, що значно збільшує масогабаритні показники збудника, тому що магнітний потік не замикається по валу ротора, а самі магнітопроводи мають знаходитись на певній відстані від нього.

В іншому патенті на корисну модель (А.с. RU 66635 U1 РФ. Асинхронизированный синхронный генератор [Текст] / Ганджа С.А. – заявка 2007112437/22; заявл. 03.04.2007; опубл. 10.09.2007, Бюл. №25) новизна технічного рішення обумовлена тим, що введення у відомий прилад збудника дозволяє при збереженні його позитивних якостей по регулюванню вихідної напруги, додати ще одну істотну якість: безконтактність токопідвода в ланцюзі збудження, що дозволило збільшити його надійність і термін служби. При цьому з'явилися додаткові можливості по використанню генератора при роботі не лише в автономному режимі, але і роботі на зовнішню мережу;

- по спрощенню вентильного перетворювача;
- по зменшенню габаритів і маси усього пристрою за рахунок оптимізації числа полюсів основного генератора.

Суть винаходу пояснюється рисунком 2.7, де представлений один з варіантів виконання асинхронізованого синхронного генератора, наприклад, для вітроенергетичної установки.

Генератор влаштований таким чином. Якір (1) з багатофазною обмоткою розташований на нерухомій частині усередині індуктора з багатофазною обмоткою (2), який розташований на зовнішній обертовій частині. Усередині якоря (1) на нерухомій частині розташований індуктор збудника (5) і регулятор збудника (7). Якір збудника (4) розташований консольно усередині індуктора збудника (5) на частині, що обертається. На частині, що обертається, розташований випрямляч (6) збудника і багатофазний вентильний перетворювач (3). Багатофазний вентильний перетворювач (3) містить в собі електронний генератор опорної напруги.

Генератор працює таким чином. При розгоні ротора від приводного двигуна в якорі збудника (4) за рахунок залишкового магнітного потоку наводиться ЕРС, яка після випрямляча (6) подається на багатофазний вентильний перетворювач (3). Напруга від вентильного перетворювача (3) подається на багатофазну обмотку індуктора (2) основного генератора. Основний генератор збуджується і формує вихідну напругу, від якої живиться обмотка індуктора (5) збудника. Процес повторюється до досягнення напруги, що встановилася, для заданої частоти обертання приводного двигуна.

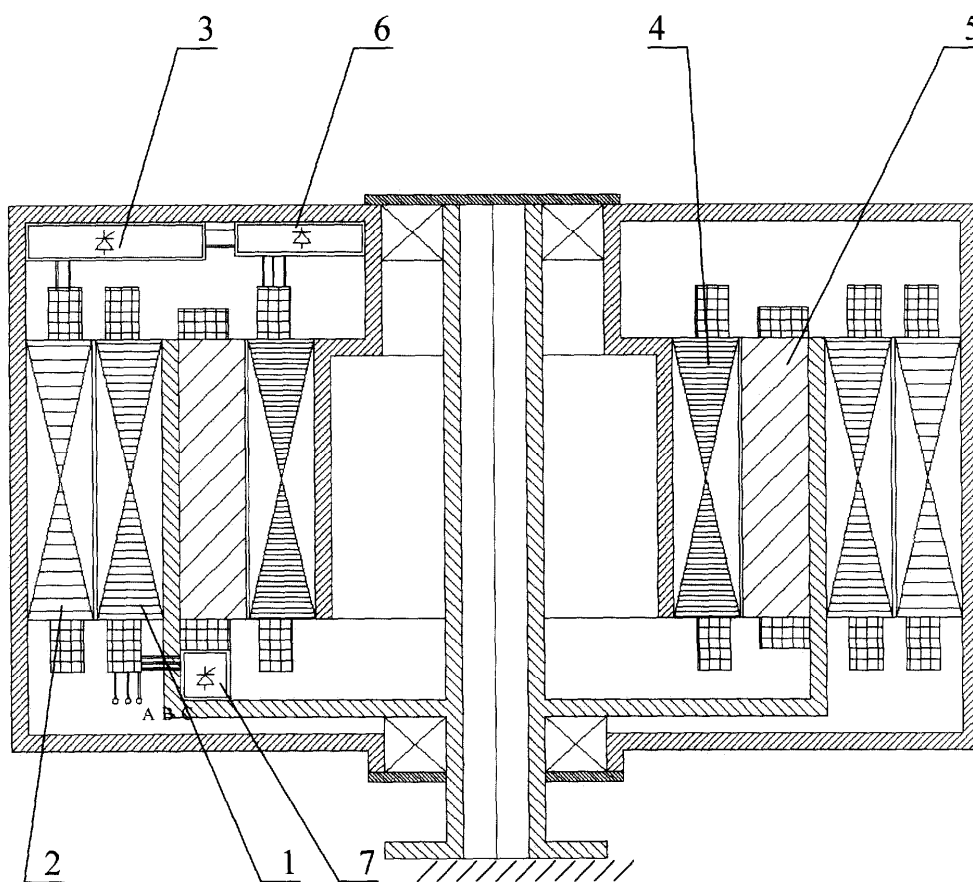


Рисунок 2.7. – Поперечний розріз генератора.

При стабілізації частоти вихідної напруги при змінній частоті приводного двигуна генератор працює таким чином. Якщо на ротор такої машини подати постійну напругу, то при швидкості його обертання, яка відповідає номінальній синхронній швидкості обертання поля статора

$$\omega_{сн} = \frac{2\pi f_n}{p}, \quad (2.2)$$

де f - номінальна частота напруги двигуна (генератора), p - число пар полюсів двигуна, на обмотці статора буде індукуватися напруга номінальної частоти. Якщо швидкість обертання ротора відрізняється від номінальної синхронної, то для того, щоб на обмотці індукувалася напруга з частотою f , необхідно подати на ротор напругу з частотою

$$f_p = \frac{p(\omega_{сн} - \omega)}{2\pi}. \quad (2.3)$$

Причому, якщо швидкість обертання ротора двигуна менше номінальної необхідно, щоб забезпечувалося обертання поля ротора відносно самого ротора по напрямку обертання. Це призводить до того, що результуюча швидкість обертання поля ротора відносно статора виявляється рівною синхронною.

Дійсно, з урахуванням приведених вище рівнянь маємо

$$\omega_{ср} = \omega + \omega_p = \omega + \frac{2\pi f_p}{p} = \omega + \frac{2\pi}{p} \frac{p(\omega_{сн} - \omega)}{2\pi} = \omega_{сн}. \quad (2.4)$$

Якщо швидкість обертання ротора більша за номінальну, необхідно, щоб поле ротора оберталося відносно нього убік зворотній обертання. Таким чином, регулюючи частоту і порядок чергування фаз напруги живлення ротора синхронного генератора, ми забезпечуємо стабілізацію частоти його вихідної напруги. При цьому теоретично не існує обмежень діапазону регулювання.

Для регулювання вихідної напруги генератора необхідно змінювати амплітуду напруги живлення роторної обмотки, змінюючи струм збудження генератора. У цьому пристрої ця функція здійснюється через регулювання струму збудження збудника.

Енергетична ефективність пропонованої системи визначається, передусім, співвідношенням корисної потужності і потужності, що витрачається на збудження, яке впливає на її ККД і вартість. Потужність збудника для живлення обмотки ротора визначається вираженням

$$P_{np} = P_n \frac{\omega_c - \omega_{min}}{\omega_c} + I_p^2 R_p, \quad (2.5)$$

де ω_{min} - мінімальна можлива швидкість обертання ротора в робочому режимі.

У тому випадку, якщо швидкість обертання ротора виявиться вища за синхронну, в правій частині вираження перед першим членом зміниться знак. Це означає, що через збудник піде зворотний потік енергії, яку можна рекуперувати в мережу.

Якщо вибрати число полюсів основного генератора мінімальним, то зростає потужність збудника за рахунок різниці між заданою частотою і частотою обертання приводного двигуна. Якщо вибрати число полюсів максимальним, то потужність збудника теж зростає за рахунок того, що необхідно забезпечити енергією велике число полюсів. Таким чином в цьому пристрої є можливість оптимального вибору числа полюсів з точки зору потужності збудника, габаритів і маси усього пристрою.

Переваги пропонованого синхронного генератора полягають в наступному. Виконання токопідводів без ковзаючих контактів істотним чином підвищує надійність і термін служби, що важливо для гідрогенераторів і вітрогенераторів, які, як правило знаходяться на віддаленій відстані від центрів по ремонту і обслуговуванню. За принципом роботи для цього генератора немає відмінностей при роботі на автономного споживача або зовнішню енергетичну мережу. При цьому принцип роботи генератора не міняється при проектуванні енергетичних установок малої, середньої і великої потужності. Це робить його універсальним. У пропонованому пристрої можна істотним чином спростити перетворювач частоти, зробивши його двофазним і залишивши йому тільки функцію стабілізації частоти вихідної напруги.

Пропоноване технічне рішення промислово застосовне. У лабораторії ТОВ НПП "Ветроэнергетические установки" був виготовлений дослідний зразок на базі асинхронного двигуна з фазним ротором на 4 кВт, який підтвердив правильність запропонованої технічної концепції.

Але на наш погляд недоліками конструкції є використання двох магнітних систем, що розташовуються одна над одною відносно осі обертання, що значно підвищує масогабаритні показники та розхід активних матеріалів. З іншого боку, використання вставки між двома магнітопроводами ротора у вигляді двох

магнітних систем статора підвищує також вимоги до підшипникових вузлів та технології забезпечення рівномірних зазорів між магнітопроводами. Крім того, не зовсім зрозуміло, яким чином виконується безконтактне керування тиристорним випрямлячем 3, що знаходиться на обертовій частині і має задавати частоту вихідної напруги генератора.

В патенті на корисну модель (А.с. RU 151665 U1 РФ. Асинхронизированный синхронный генератор [Текст] /В.Г. Еременко, А.В. Бериллов, Нгуен Хын Нам – заявка 2014138373/07; заявл. 23.09.2014; опубл. 10.04.2015, Бюл. №10) показаний асинхронізований синхронний генератор, що містить статор з трифазною обмоткою і ротор з трифазною обмоткою, трифазний мостовий випрямляч, що має катодні і анодні виходи, анодний вихід випрямляча сполучений з катодним входом трифазного мостового інвертора, виконаного на повністю керованих вентилях, а катодний вихід випрямляча підключений до анодного входу інвертора, інвертор містить зворотні діоди, включені зустрічно – паралельно кожному керованому вентилю, блок управління інвертором, що містить задаючий генератор стабільної або регульованої частоти, розподільник імпульсів управління транзисторами інвертора, вимірювальний орган регулятора напруги, який відрізняється тим, що кінці роторних трифазних обмоток сполучені з входами випрямляча, початки статорних обмоток сполучені з виходом трифазного інвертора, а кінці статорних обмоток сполучені з навантаження, конденсатори змінного струму підключені до кінців роторних і статорних обмоток, у блок управління введено замикаючий пристрій транзисторів інвертора, сполучений з виходом вимірювального органу регулятора напруги.

Корисна модель відноситься до електротехніки і може бути використана в системах, працюючих в режимі генератора стабільної або регульованої частоти при постійній або змінній швидкості приводу.

Технічне завдання, що вирішується цією корисною моделлю, полягає в забезпеченні стабільної частоти вихідної напруги генератора при збільшенні в середньому в два рази змінної частоти обертання ротора відносно синхронної швидкості, що в два рази зменшує габарити генератора

Технічним результатом корисної моделі є розширення функціональних можливостей АСГ, збільшення потужності, зменшення габаритів.

Суть корисної моделі пояснюється кресленнями, де на рис. 2.8 зображена принципова схема пропонованого пристрою.

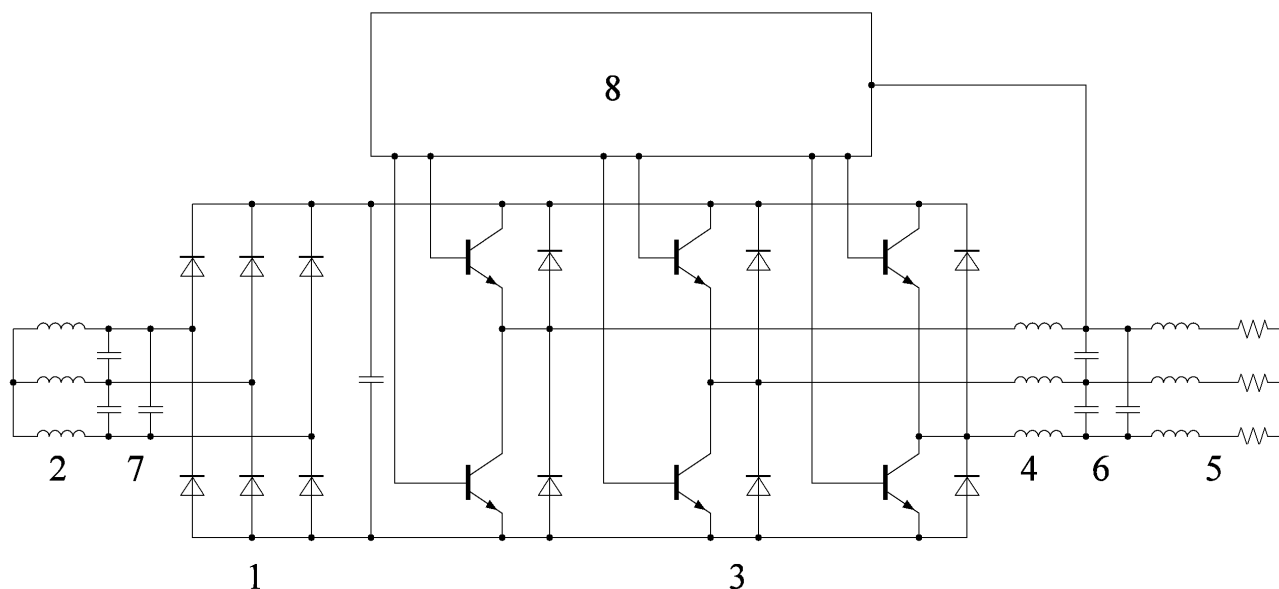


Рисунок 2.8. – Принципова схема АСГ

АСГ містить трифазний випрямляч 1 вхід якого підключений до кінців роторних обмоток 2, а вихід випрямляча 1 сполучений з шинами постійного струму трифазного інвертора 3, а вихід інвертора 3 сполучений з початками фазних обмоток статора 4, до кінців яких підключається навантаження 5. Конденсатори змінного струму 6, ті, що забезпечують самозбудження АСГ підключені до кінців статорів обмоток 4, конденсатори змінного струму 7, ті, що також забезпечують самозбудження АСГ підключені до кінців роторних обмоток 2. Вимірювальний орган напруги блоку управління 8 підключений до кінців статорів обмоток 4, до яких підключено навантаження 5.

АСГ працює наступний чином. Самозбудження АСГ відбувається за рахунок ємнісних струмів конденсаторів 6 і 7, що з'являються через залишкової намагніченості магнітопроводів ротора і статора. Частота обертання ротора постійно перевищує частоту обертання поля, що створюється статорними обмотками, тому ємнісні струми роторних і статорних обмоток намагнічують АСГ.

Напруга на обмотках ротора 2, що з'явилася в результаті самозбудження, випрямляється випрямлячем 1 і поступає на анодний і катодний входи інвертора 3. Транзистори інвертора 3 перемикаються сигналами блоку управління 8 з постійною частотою, рівною вихідною частотою АСГ. Трифазна напруга, що з'явилася на виході інвертора 3 складається з напругою обмоток статора 4 і поступає на навантаження 5. Сумарна напруга інвертора 3 і обмоток статора 4 підтримується постійним регулюванням часу відкритого стану транзисторів інвертора 3, здійснюваним блоком управління 8, вимірювальний вхід якого підключений до навантаження 5.

При зміні опору навантаження змінюється струм і напруга на обмотках ротора і конденсаторах 7, що забезпечує грубу стабілізацію напруги на навантаженні. Точнішу стабілізацію напруги здійснює блок управління 8, що змінює час включення транзисторів інвертора.

Використання двох обмоток – ротора і статора в одному режимі – генераторному, оскільки частота обертання ротора приблизно в 2 рази більше частота обертання поля обмотки статора є властивістю корисної моделі. Використовується властивість АСГ генерувати активну потужність при вище синхронної швидкості обома трифазними обмотками статора і ротора. Складання напруги (активних потужностей) обмоток статора і ротора в усьому діапазоні зміни швидкості АСГ досягається послідовним з'єднанням фаз якірних обмоток 4 з обмотками ротора 2 через випрямляч 1 і інвертор 3. Фази роторної обмотки 2 сполучені з входом випрямляча 1, кінці фаз якірних обмоток статора 4 сполучені з навантаженням 5, а початки якірних обмоток 4 підключені до виходу інвертора 3, а анодний вхід інвертора 3 сполучений з катодним виходом випрямляча 1, катодний вхід інвертора 3 сполучають з анодним виходом випрямляча 1, в результаті цього струми обмоток статора, ротора і навантаження змінюються пропорційно і синхронно, що полегшує завдання стабілізації напруги на навантаженні. Стабілізація вихідної частоти АСГ забезпечується стабілізацією вихідної частоти інвертора, а точна стабілізація вихідної напруги АСГ забезпечується регулюванням вихідної напруги інвертора методом широко-

імпульсної модуляції. При перевищенні напруги заданого значення вимірювальний орган напруги зменшує час включеного стану транзистора інвертора до відновлення заданого значення напруги. Блок управління перемикає транзистори інвертора по класичному 180° закону із зрушенням 120° між стійками інвертора.

У усьому діапазоні змінних швидкостей обертання ротора починаючи з мінімальної швидкості регулятор напруги зменшує напругу інвертора за рахунок скорочення тривалості включення транзисторів інвертора.

Використання корисної моделі дозволяє розширити функціональні можливості АСГ, збільшити потужність і зменшити габарити. Але значним недоліком конструкції є контактне сполучення статорної та роторної обмоток через блок випрямляч-інвертор та складність регулювання частоти вихідної напруги генератора. Зокрема, досить сумнівною з точки зору енергоефективності є ідея додавати енергію з роторної обмотки до статорної шляхом послідовного включення цих обмоток. Але ідея включення блоку випрямляч-інвертор до складу АСГ досить цікава в розрізі розробки безщіткової системи.

В патенті на корисну модель (А.с. RU 55733 U1 РФ. Асинхронизированный синхронный генератор [Текст] /С.А. Панкратов, В.С. Богомолов, Е.В. Афанасьева – заявка 2006114724/22; заявл. 28.04.2006; опубл. 27.08.2006, Бюл. №24) запропонований пристрій, який відноситься до суднового електроустаткування, зокрема до суднових електроенергетичних систем і може використовуватися в інших областях. Завданням корисної моделі є удосконалення конструкції асинхронізованого синхронного генератора (АСГ) для спрощення способу регулювання системи автоматичного регулювання напруги для АСГ і поліпшення якості генерованої електроенергії. Поставлене завдання досягається тим, що в існуючий АСГ замість щіткового апарату додатково встановлений збудник з трифазними обмотками ротора і статора. Збудник конструктивно виконаний і підключений до обмотки збудження ротора генератора так, щоб створювалося магнітне поле, що обертається, в статорі генератора, напрям швидкості обертання якого, протилежно напрямку швидкості обертання ротора (рис. 2.9).

Виключення щіткового апарату дозволить зменшити об'єм технічного обслуговування, а введення додаткової електричної машини виключить потребу в регулюванні частоти струму збудження асинхронізованого синхронного генератора.

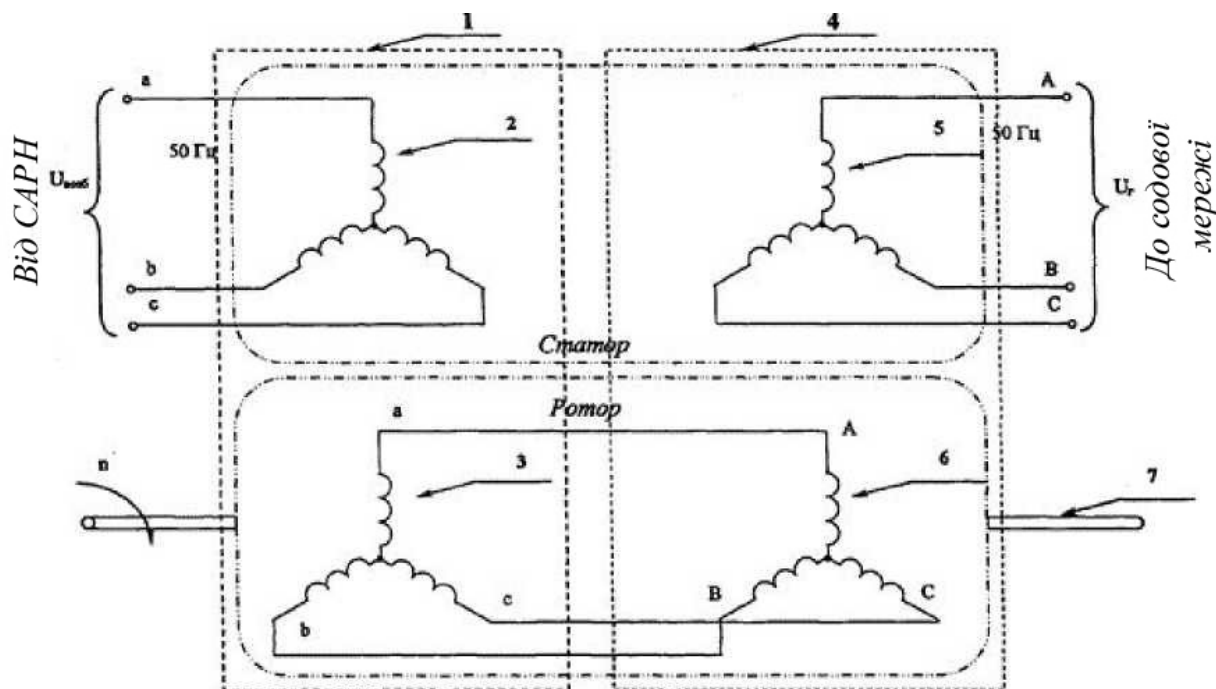


Рисунок 2.9. – Структурна схема АСТ

Виключення щіткового апарату дозволить зменшити об'єм технічного обслуговування, а введення додаткової електричної машини виключить потребу в регулюванні частоти струму збудження асинхронізованого синхронного генератора.

На рисунку 2.9 приведена функціональна схема пропонованого генератора, де прийняті наступні позначення:

1. збудник генератора;
2. обмотка статора збудника генератора;
3. обмотка ротора збудника генератора;
4. генератор;
5. обмотка статора генератора;
6. обмотка ротора генератора;
7. вал ротора БАСГ.

Принцип дії безщіткового АСГ (БАСГ) заснований на передачі електроенергії за допомогою магнітного поля, що обертається, через трифазні обмотки збудника 1 (обмотки статора 2 і ротора 3 збудники) і збудження 6 АСГ.

БАСГ складається з двох електричних машин – асинхронізованого синхронного генератора і збудника, в пазах статора 4 і ротора 3, яких розташовуються трифазні розподілені обмотки, сполучені "зіркою".

На обмотку статора 1 подається змінна напруга з частотою 50 Гц. (Припустимо, що ротор 7 БАСГ обертається по напрямку обертання годинникової стрілки). Збудник 1 з трифазними обмотками ротора 2 і статора 3 конструктивно виконаний і підключений до обмотки збудження 6 ротора генератора так, щоб створювалося магнітне поле, що обертається, в статорі генератора, напрям швидкості обертання якого, протилежно напрямку швидкості обертання ротора 7 (в даному випадку, проти напрямку обертання годинникової стрілки).

$$f_{B.P.} = f_{B.C.} + \frac{n \cdot p}{60}, \quad (2.6)$$

де $f_{B.P.}$ – частота струму в обмотці ротора збудника (ротора генератора), Гц; $f_{B.C.}$ – частота струму в обмотці статора збудника, Гц; n – частота обертання ротора, об/хв; p – число пар полюсів (статора і ротора).

Таким чином, частота генерованого струму збудження для обмотки збудження генератора 6 складає 100 Гц. Струми, протікаючи по обмотці ротора генератора, створюють основне магнітне поле машини, напрям обертання якого протилежно напрямку обертання ротора. Тоді швидкість обертання основного магнітного поля ротора БАСГ відносно статора складатиме

$$n_{\phi} = n_{\phi-ротора} - n, \quad (2.7)$$

де n_{ϕ} – швидкість обертання основного магнітного поля відносно статора БАСГ, об/хв; $n_{\phi-ротора}$ – швидкість обертання основного магнітного поля відносно ротора БАСГ, об/хв.

З частотою обертання n_{ϕ} лінії основного магнітного поля перетинають провідники обмотки статора БАСГ 5, індукуючи трифазну змінну електрорушійну силу з частотою 50 Гц.

Тобто,

$$f = f_{B.P.} - \frac{n \cdot p}{60}, \quad (2.8)$$

де f – частота ЕДС статора генератора, Гц. Підставивши (1) в (3), отримуємо

$$f = f_{B.C.}$$

Таким чином, частота генерованого ЕДС БАСГ не залежить від частоти обертання ротора, а прямо пропорційна частоті струмів в обмотці статора 1. Тому, на відміну від асинхронізованого синхронного генератора, у БАСГ досить подати на обмотку статора 1 трифазну напругу з постійною частотою (50 Гц) і для регулювання генерованої напруги БАСГ вимагається змінювати тільки модуль напруги статора, що подається на обмотку. Тобто, в цьому випадку значно спрощується спосіб регулювання САРН АСГ і не потрібно складну схему системи регулювання: контролюється тільки модуль напруги і використовується тільки датчик напруги.

Недоліком вказаної конструкції на наш погляд є наявність двох незалежних магнітних систем, ротор кожної з яких перемагнічується фактично із частотою, що дорівнює сумі частот перемагнічування статора та обертання ротора. Тобто магнітні втрати в такій системі значно зростають, як і зростає необхідна потужність для забезпечення заданого струму збудження у зв'язку зі значним зростанням індуктивного опору обмоток збудника та обмотки ротора генератора. Таким чином, подібна конструкція не може мати високі енергетичні показники та є недоцільною.

2.3. Розробка нової конструкції безщіткового асинхронізованого синхронного генератора

Виходячи з проведеного аналізу вже існуючих конструкції безщіткового збудження АСГ та основних принципів роботи цієї машини, пропонуємо наступні технічні рішення: об'єднати магнітні системи збудника та генератора; електромагнітно розв'язати їх шляхом вибору полюсності, яка буде відрізнятися одна від одної у два рази; у ролі збудника використати обернений синхронний

генератор; обмотку якоря збудника поєднати із обмоткою збудження генератора через блок випрямляч-інвертор, який розташувати на валу; в якості задатчика частоти струму обмотки збудження генератора використати датчики Холла, розташовані на роторі, та розподілену обмотку на статорі для створення магнітного поля, яке обертається із синхронною частотою та пронизує датчики Холла.

Результатом таких технічних рішень виступає конструкція, зображена на рис. 2.10 та рис. 2.11. Як ми бачимо, асинхронізований синхронний генератор складається з двох суміщених електричних машин: генератора і збудника. Машини виконані з суміщеною магнітною системою для зменшення розмірів. Для забезпечення магнітної розв'язки обмоток обох машин число пар полюсів збудника було узятو в 2 рази більше ніж число пар полюсів синхронного генератора. На роторі встановлений перетворювач частоти, який регулює збудження генератора, а значить і частоту напруги, що виробляється генератором. Для управління амплітудою напруги до обмотки збудження збудника підключений автоматичний регулятор збудження АРЗ, дані для управління яким визначаються параметрами навантаження і напругою обмотки синхронного генератора. Для забезпечення відстежування зміни частоти обертання відносно заданої фіксованої частоти, на машину встановлений відповідний вузол. Цей вузол є окремою електричною машиною, яка складається з: феромагнітного диска, який розташований на одному роторі з генератором; датчиків Холлу, які встановлені на диску; магнітопроводу із розподіленою трифазною обмоткою, на яку подається сигнал від джерела фіксованої частоти ДФЧ; системи управління, яка приймає сигнал з датчиків холу і перетворює його в ШІМ сигнал для управління транзисторами перетворювача частоти.

На рис. 2.11 наступні позначки блоків, з яких складається машина: ОЗЗ – обмотки збудження збудника, ОЗГ – обмотки збудження генератора, ОСГ – обмотки синхронного генератора, ОНЗ – обмотки напруги збудника, перетворювача частоти (В – випрямляч, І – інвертор), СУ – системи управління, СН – стабілізатора напруги, ДХ – датчика Холлу, АРЗ – автономний регулятор збудження, ОДЧ – обмотка датчика частоти, ДФЧ – датчик фіксованої частоти.

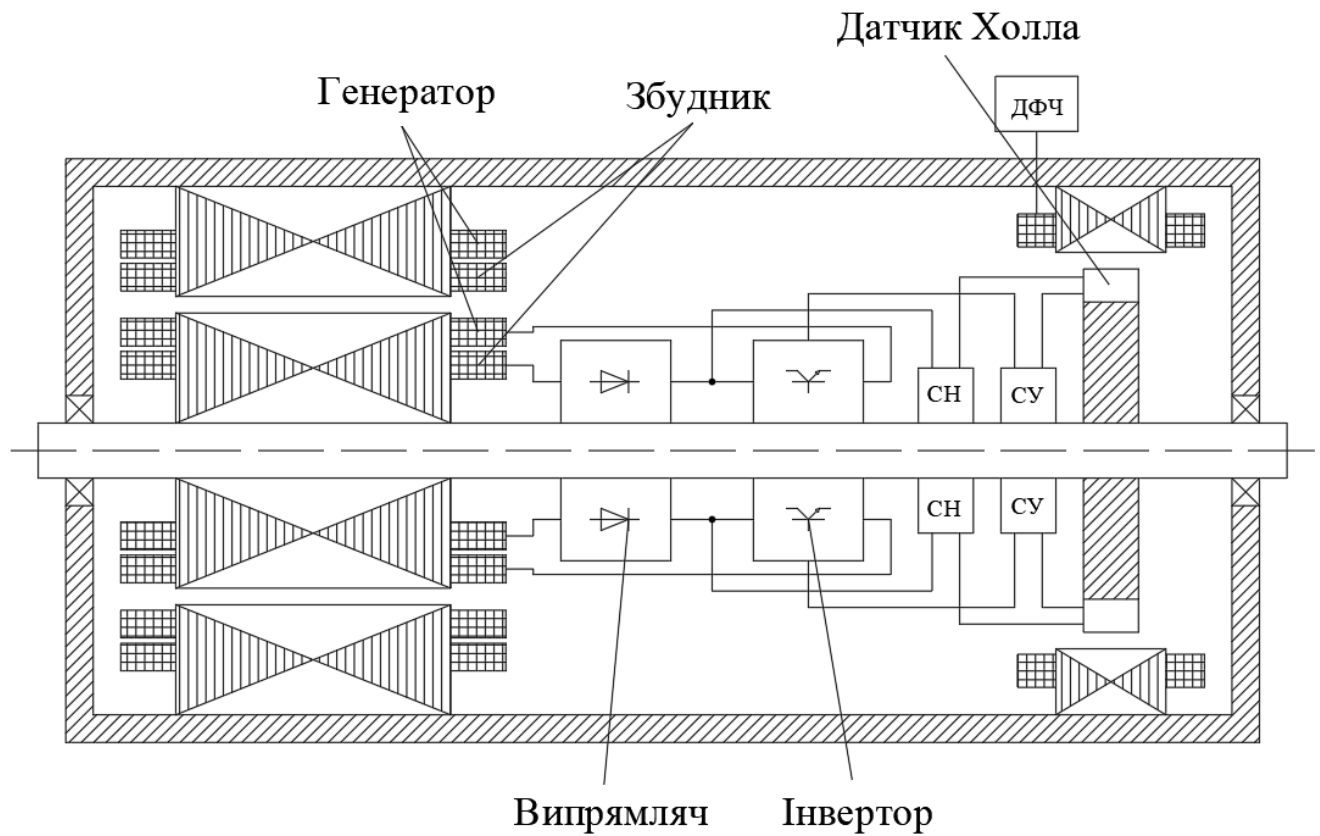


Рисунок 2.10. – Конструктивна компоновка безщіткового АСГ

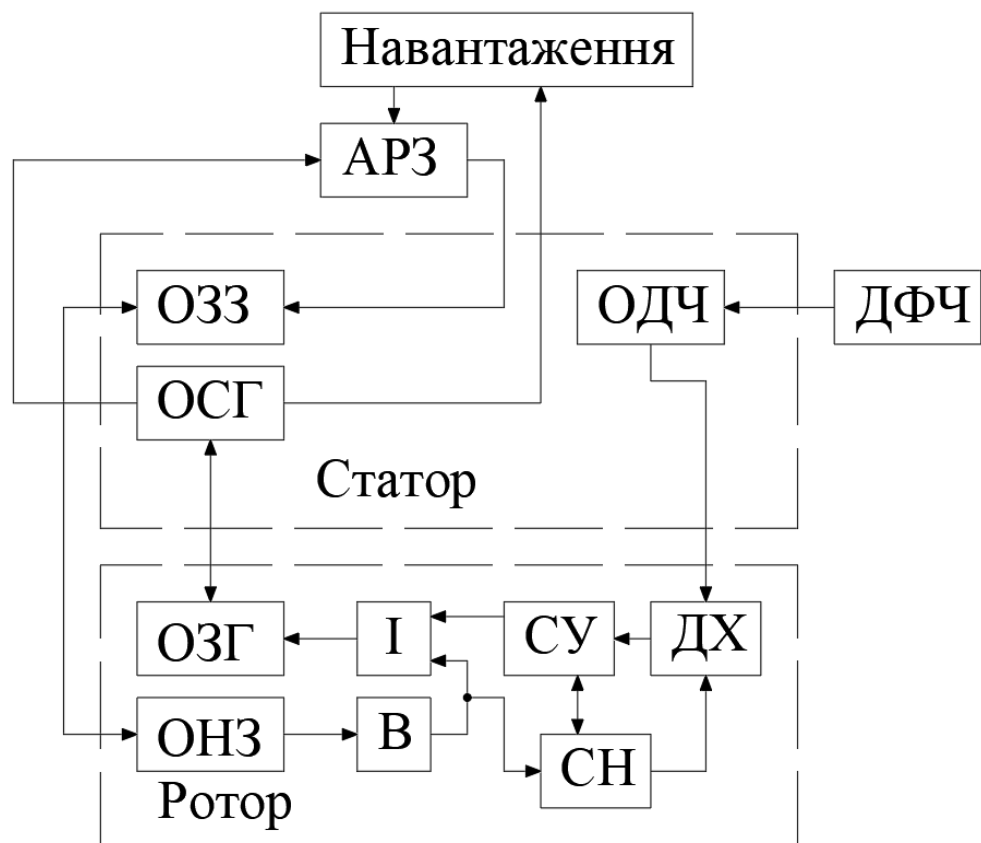


Рисунок 2.11. – Функціональна схема безщіткового АСГ

Розглянемо конструкцію системи управління. На рис. 2.12 зображена функціональна схема система управління транзисторами інвертора.

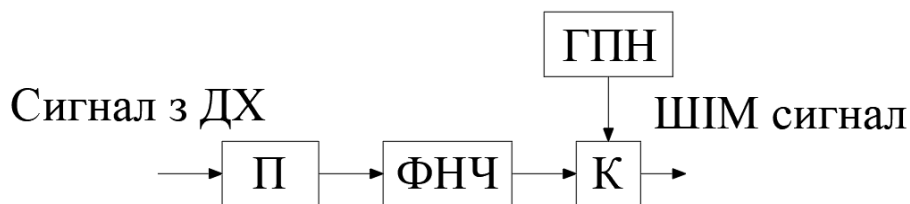


Рисунок 2.12. – Функціональна схема системи управління

Вона складається з: підсилювача П, на вхід якого подається сигнал з датчика Холла і ним підсилюється; фільтра низьких частот ФНЧ, яким фільтрується підсилений сигнал з датчиків Холла; генератора пилоподібної частоти ГПН та компаратора К, після якого ШІМ сигнал йде на транзистори інвертора.

У ШІМ-генераторах аналогового типу, сигнал, що управляє, формується аналоговим компаратором, коли на інвертуючий вхід компаратора, наприклад, подається трикутний або пилоподібний сигнал, а на той, що не інвертує – модулюючий безперервний сигнал (рис.2.13).

Вихідні імпульси виходять прямокутними, частота їх дотримання дорівнює частоті пили (чи сигналу трикутної форми), а тривалість позитивної частини імпульсу пов'язана з часом, впродовж якого рівень модулюючого постійного сигналу, що подається на неінвертуючий вхід компаратора, буде вищий за рівень сигналу пили, який подається на інвертуючий вхід. Коли напруга пили вище модулюючого сигналу – на виході буде негативна частина імпульсу.

Якщо ж пила подається на неінвертуючий вхід компаратора, а модулюючий сигнал – на той, що інвертує, то вихідні імпульси прямокутної форми матимуть позитивне значення тоді, коли напруга пили вища за значення сигналу, поданого на інвертуючий вхід, а негативне – коли напруга пили нижча модулюючого сигналу.

Розглянемо особливості роботи датчика Холла. У основі датчиків ЕРС Холлу лежить явище викривлення шляху носіїв заряду в напівпровідниках, що знаходяться в магнітному полі.

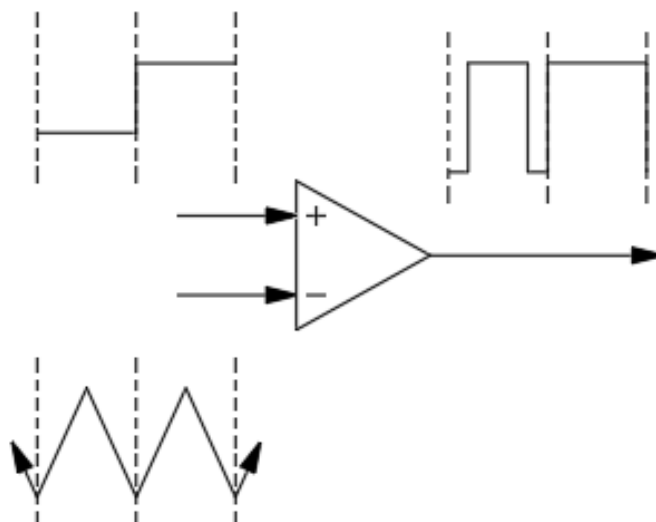


Рисунок 2.13. – Пояснення щодо роботи ШІМ-генератора.

Розглянемо прямокутну пластину напівпровідника з електропровідністю n -типу. У напрямку осі x протікає струм від зовнішнього джерела. Пластина розміщена в магнітному полі H_y , перпендикулярному напрямку струму.

У відсутності магнітного поля електрони рухаються в пластині у напрямку електричного поля E_x . У магнітному полі електрони відхиляються під дії сили Лоренца :

$$F_z = -e(v_x B_y), \quad (2.9)$$

де e – заряд електрона; B_y – індукція магнітного поля, спрямованого уздовж осі y ; $v_x = -nE_x$ – швидкість електрона у напрямку струму; n – рухливість електронів.

Ця сила спрямована перпендикулярно як напрямку магнітного поля, так і напрямку струму (уздовж осі z). Тому електрони зміщуються перпендикулярно напрямку їх первинного руху. За цих умов, на гранях, що перпендикулярні осі z , з'явиться різниця потенціалів, знак якої буде залежати від напрямку магнітного поля, а величина - від значення магнітної індукції та кута відхилення її вектора від осі y .

Заряди створюють в пластині поперечне електричне поле, назване полем Холлу. Процес утворення об'ємних зарядів у поверхонь припиниться лише тоді, коли напруженість поля Холлу повністю компенсуватиме дію на електрони сили

Лоренца. Умова рівності сил, діючих на електрон з боку електричних і магнітних полів, може бути записана у виді

$$-e(v_x B_y) = -\mu_n B_y E_x, \quad (2.10)$$

звідки може бути визначене поле Холу

$$E_z = -(v_x B_y) = -\mu_n B_y E_x,$$

чи ЕРС Холу

$$U_z = -\frac{\mu_n B_y}{d} E_x, \quad (2.11)$$

де d – товщина пластини.

Струм що протікає через зразок з шириною b і перерізом S щільністю j_x , обумовлений дією електричного поля, пов'язаний з концентрацією і швидкістю електронів співвідношенням:

$$I_x = j_x S = en v_x S = en v_x b d. \quad (2.12)$$

Вирішуючи спільно рівняння (2.11) і (2.12), отримаємо

$$U_z = -\frac{1}{en} \frac{B_y I_x}{d} = R_x \frac{B_y I_x}{d}, \quad (2.13)$$

де $R_x = -1/en$ – коефіцієнт Холлу, що зв'язує поперечну різницю потенціалів з індукцією магнітного поля. Величина його залежить від матеріалу пластини, змісту домішок і температури.

З вираження (2.13) виходить, що величина ЕРС Холлу залежить від фізичних властивостей матеріалу пластини, від її розмірів, а також, від величини струму, що протікає через неї, і від магнітного поля, що впливає на цей струм.

Якщо пластина має електропровідність p -типу, то основна частина струму створюється дірками, що рухаються зліва направо, тоді в лівій частині рівняння (2.10) слід поставити знак плюс. Траєкторії дірок в цьому випадку зміщуватимуться вгору, верхня поверхня накопичуватиме позитивний заряд і ЕРС Холлу буде позитивною. Визначення рівняння для ЕРС Холлу зроблене без урахування хаотичного теплового руху електронів і їх розподілу за швидкостями.

Строгіший розрахунок дає формулу для коефіцієнта Холлу в напівпровіднику з електропровідністю n -типу

$$R_x = -\frac{3\pi}{8ne}.$$

і в напівпровіднику з електропровідністю p -типу

$$R_x = \frac{3\pi}{8pe}. \quad (2.14)$$

Для напівпровідників, що мають власну електропровідність або містять носії заряду обох типів в порівнянних концентраціях, коефіцієнт Холлу описується вираженням

$$R_x = \pm \frac{3\pi}{8e} \frac{n\mu_n^2 - p\mu_p^2}{(n\mu_n + p\mu_p)^2}$$

Якщо концентрації електронів і дірок в зразку рівні і дорівнюють їх рухливості, то ЕРС Холлу дорівнюватиме нулю, оскільки напрям руху дірок протилежний до напрямку руху електронів: і електрони, і дірки зміщуватимуться магнітним полем в одну і ту ж сторону. Насправді в напівпровідниках рухливість електронів більше рухливості дірок, тому у власному напівпровіднику ЕРС Холлу відповідає по знаку електронному зразку. При переході від власної електропровідності до діркової ЕРС Холу проходить через нуль і змінює знак.

Розглянемо параметри і характеристики датчиків Холлу. Датчик Холлу є магнітоелектричним напівпровідниковим приладом, заснованим на використанні ефекту Холлу. На рис. 2.14 показані схеми включення датчика Холлу.

Напруга U_1 , що подається на керуючі електроди, називається вхідною напругою датчика Холу, а опір R_1 між цими електродами називається вхідним опором.

Величина цього опору за відсутності магнітного поля визначається по формулі

$$R_1 = \frac{\rho l}{bd},$$

де ρ – питомий опір напівпровідника.

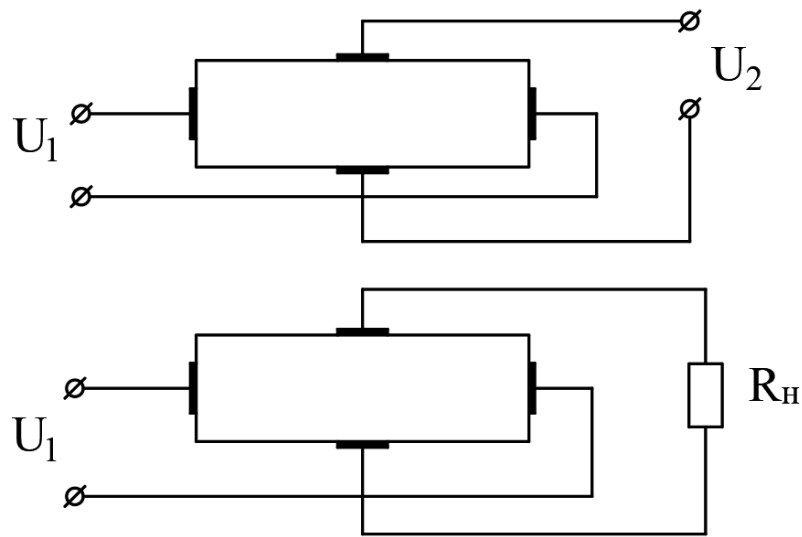


Рисунок 2.14. – Схема включення датчика Холла

З ростом напруженості магнітного поля вхідний опір збільшується. Напруга між двома іншими контактами називається вихідним і позначається U_2 (рис. 2.14). Опір між холловськими контактами називається вихідним і позначається R_2 . Величина його за відсутності магнітного поля визначається виразом

$$R_2 = \frac{\rho b}{ld}.$$

Тут не врахована нерівномірність розподілу струму по перерізу датчика. Вихідний опір, так само, як і вхідний, зі збільшенням магнітного поля зростає.

На рис. 2.15 приведені вольт-амперні характеристики датчика для одного і того ж значення вхідного струму і для декількох значень індукції магнітного поля. Із зростанням поля крутизна зростає внаслідок того, що зростає внутрішній опір датчика R_2 .

Однією з важливих характеристик датчика, що дозволяє оцінити його ефективність, є коефіцієнт передачі k . Він визначається як співвідношення вихідної напруги до вхідної при заданому значенні магнітного поля:

$$k = \frac{U_2}{U_1}.$$

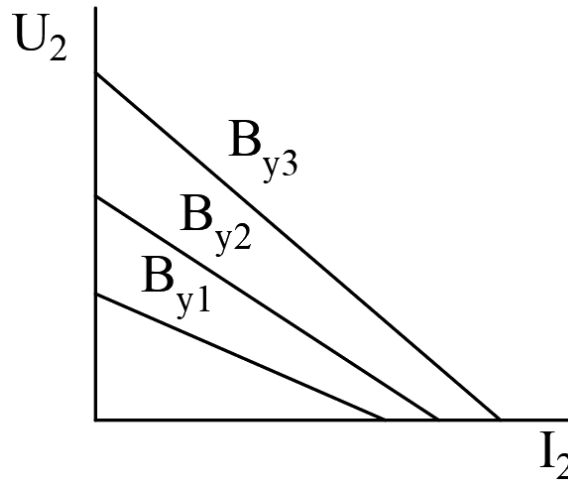


Рисунок 2.15. – Вольт-амперні характеристики датчика Холла
($B_{y1} < B_{y2} < B_{y3}$)

Враховуючи вирази (2.14), (2.13) і що $I_1 = U_1 / R_1$, можна знайти коефіцієнт передачі

$$k = \frac{R_x B_d}{\rho l}.$$

Коефіцієнт передачі зі збільшенням індукції магнітного поля зростає.

Зазвичай датчик ЕРС Холлу працює на зовнішнє навантаження. Схема включення показана на рис. 2.14 (нижній рисунок). Потужність, що підводиться до датчика, від зовнішнього джерела струму дорівнює

$$P_1 = \frac{I_1^2 \rho b}{ld} \quad (2.15)$$

Струм, що протікає у вихідному ланцюзі датчика Холлу,

$$I = \frac{U_2}{R_2 + R_n};$$

де R_n – опір навантаження.

Потужність, що віддається в навантаження

$$P_n = I_2^2 R_n = \frac{U_2^2 R_n}{(R_2 + R_n)^2}. \quad (2.16)$$

При узгодженні вихідного опору і навантаження ($R_2 = R_n$) досягається максимальна потужність, що віддається в навантаження,

$$P_n = \frac{U_2^2}{4R_2} = \frac{U_2^2 l d}{4\rho b}.$$

Враховуючи (2.13), отримаємо

$$P_n = \frac{R_x^2 I_1^2 B^2 l}{4\rho b d} \quad (2.17)$$

Максимальна потужність, що віддається, обмежується гранично припустимою потужністю розсіяння на датчику. Коефіцієнт корисної дії датчика Холлу визначається як відношення потужності, що віддається в навантаження, до потужності на вході датчика:

$$\eta = P_n / P_1.$$

При погодженому навантаженні, враховуючи (2.15) і (2.16), ККД датчика

$$\eta = \left(\frac{R_x B l}{2\rho l} \right)^2.$$

ККД датчика Холлу зазвичай не перевищує 20%. Величина його не залежить від вхідного струму. Для збільшення ЕРС Холлу і вихідної потужності потрібно збільшувати вхідну потужність.

Важливою характеристикою датчика Холлу є чутливість. Визначається вона як ЕРС, що виникає на холловських контактах при одиничному керуючому струмі і одиничному значенні магнітної індукції :

$$\gamma = \frac{U_2}{B I_1} = \frac{R_x}{d}$$

Вираження (2.13) з урахуванням (2.17) отримує вид

$$U_2 = \gamma I_1 B.$$

Важливим параметром датчика Холлу є відношення, що характеризує ЕРС Холлу, яке приходить на одиницю магнітної індукції. Цей параметр називається магнітною чутливістю

$$\gamma_n = \frac{U_2}{B} = \frac{R_x I_1}{d}.$$

Лінійні датчики Холу (ЛДХ) зазвичай оптимізують для виміру величини уніполярного або біполярного магнітного поля. ЛДХ характеризуються двома основними параметрами – чутливістю і лінійністю в заданому діапазоні робочих температур.

Типова передатна характеристика ЛДХ (залежність вихідної напруги від амплітуди магнітного поля) показана на рис. 2.16. Більшість датчиків з однополярним живленням мають вихідну напругу нуля (що відповідає нульовій напруженості магнітного поля), рівну половині діапазону зміни вихідної напруги або половині напруги живлення. У останньому випадку величина напруги нуля і чутливість залежать від величини напруги живлення. Це спостерігається в датчиках з пропорційним виходом, що є елементом Холу з лінійним підсилювачем (рис. 2.17). Так, у популярного датчика А3515 при напрузі живлення +5,0 В напруга нуля і чутливість рівні 2,5 В і 5,0 мВ/Гаусс відповідно, а при збільшенні живлення до 5,5 В ці параметри змінюються до значень 2,75 В і 5,5 мВ/Гаусс. Ось чому при використанні ЛДХ цього типу необхідно пред'являти жорсткіші вимоги до джерела живлення. В той же час датчики дозволяють здійснити просте регулювання чутливості без додаткових підсилювальних компонентів, що може бути дуже корисно.

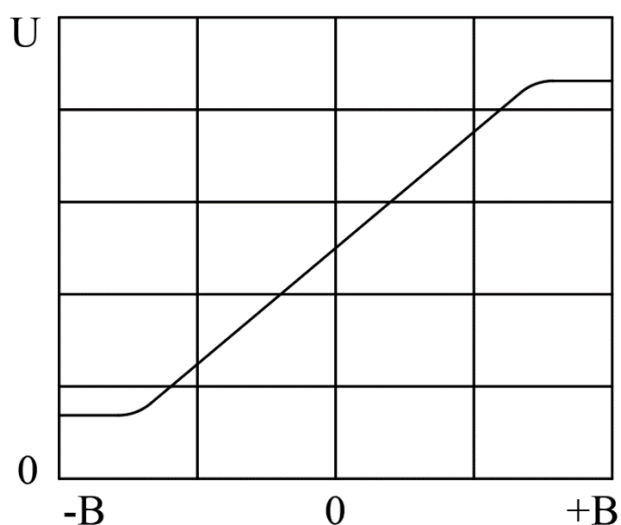


Рисунок 2.16. – Передатна характеристика ЛДХ

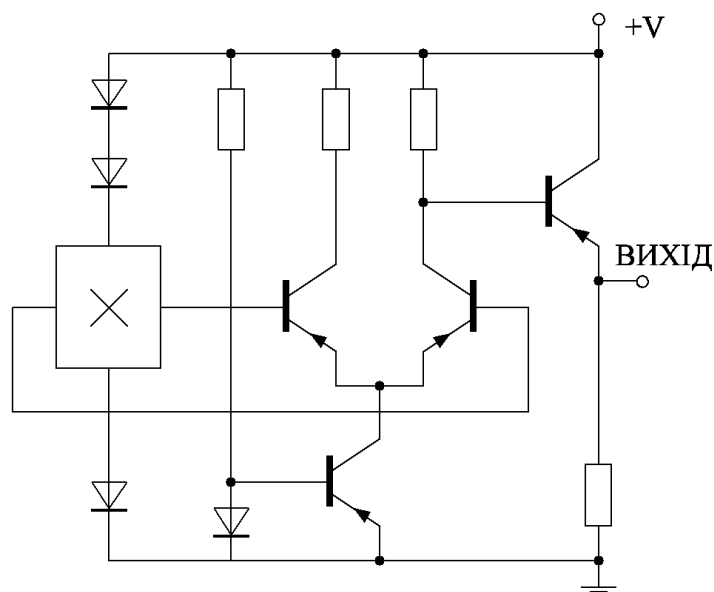


Рисунок 2.17. – Структурна схема датчика з пропорційним виходом

Сучасні ЛДХ є монолітною інтегральною схемою, де на одному кристалі об'єднані елемент Холу, лінійний підсилювач і кінцевий каскад підсилення потужності класу А (рис. 2.18). Крім того, для збільшення точності перетворення і забезпечення температурної стабільності в мікросхемі реалізована система автоматичної корекції напруги зміщення і фільтрація сигналу після лінійного підсилювача.

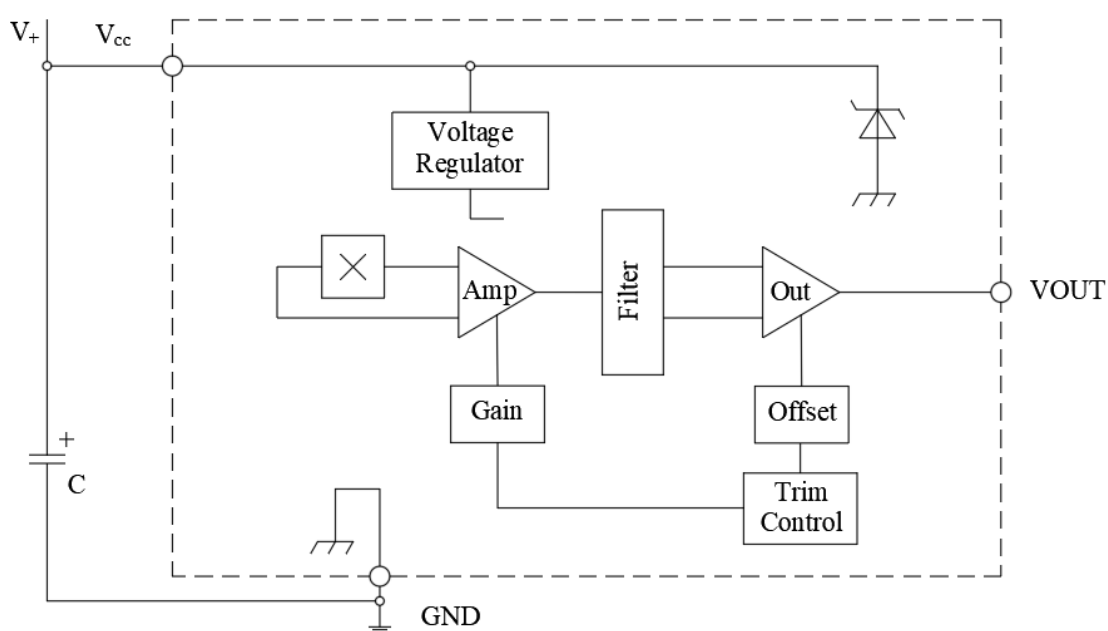


Рисунок 2.18. – Схема сучасних ЛДХ

Перейдемо до розгляду перетворювача частоти ПЧ з проміжною ланкою постійного струму. Основними складовими даних ПЧ є випрямляч з фільтром і інвертор. Переваги даних ПЧ з ланкою постійного струму :

- можливість отримання на виході ПЧ широкого діапазону частот, незалежного від частоти живлячої мережі;
- можливість використання відносно простих силових схем і систем управління ПЧ; можливість нарощування складності силовій частині і системи управління ПЧ пропорційно рівню підвищення вимог без надмірної надлишковості системи;
- можливість реалізації в порівняно малоелементній структурі ПЧ різноманітних алгоритмів управління;
- легкість трансформації ПЧ для роботи в установках з живленням від автономних джерел або локальної мережі постійного струму.

Основні недоліки ПЧ з ланкою постійного струму :

- двократне перетворення енергії, що збільшує втрати енергії, погіршує масогабаритні показники перетворювача;
- наявність в ланці постійного струму силового фільтру, що містить батарею конденсаторів значної місткості (у схемах з АІН) або реактор зі значною індуктивністю (у схемах з АІС). Призводить до погіршення масогабаритних показників, а наявність електролітичних конденсаторів – до зниження надійності.

Широке застосування знайшли наступні види ПЧ:

- ПЧ з автономним інвертором напруги (АІН);
- ПЧ з автономним інвертором струму (АІС);
- ПЧ з некерованим випрямлячем і автономним інвертором з ШІМ - управлінням;
- ПЧ з рекуперативним (активним) випрямлячем і автономним інвертором з ШІМ – управлінням.

Найбільш поширеним нині типом ПЧ з ШІМ являється перетворювач з некерованим випрямлячем в ланці постійного струму і автономним інвертором напруги. Схема силовій частини такого ПЧ зображена на рис.2.19. На інвертор

покладена функція регулювання не лише частоти, але і амплітуди основної гармоніки вихідної напруги ПЧ при постійності напруги в ланці постійного струму. Перехід до широтно-імпульсного способу формування вихідної напруги істотно змінив властивості ПЧ:

- форма вихідного струму істотно наблизилася до синусоїдальної, розширився діапазон регулювання частоти;
- значно підвищилася швидкодія, оскільки силовий фільтр фактично виключений з каналів регулювання вихідної напруги ПЧ;
- істотно покращав коефіцієнт потужності ПЧ як споживача енергії.

Проте в цих видах ПЧ залишилося невирішеним питання рекуперації енергії в мережу і недостатньо повно пропрацьовані питання якості енергоспоживання і електромагнітної сумісності.

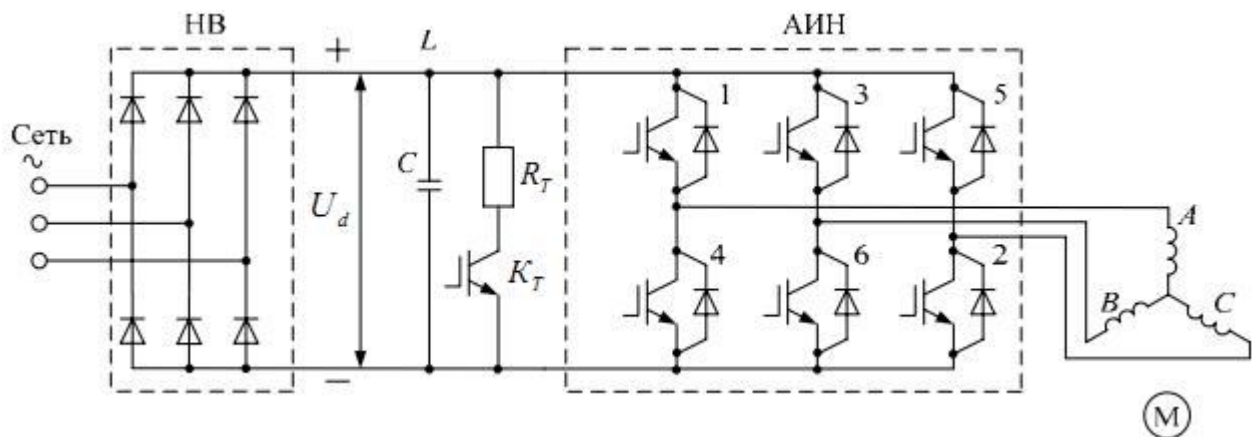


Рисунок 2.19. – Структура силових частин перетворювача частоти з ШІМ

Принцип формування ШІМ показаний на прикладі процесів, що відбуваються в одній фазі інвертора (рис.2.20) в припущенні, що точкою нульового потенціалу є середня точка ланки постійної напруги. На рисунку прийняті наступні позначення:

U^* – сигнал управління інвертором (в даному випадку – синусоїдальний);

U_{on} – опорна напруга;

f_1^*, f_2^* – сигнали управління верхнім і нижнім ключем фази інвертора.

Якщо амплітуда U^* не перевищує значення U_{on} , то перша гармоніка напруги на виході інвертора в певному масштабі повторює сигнал, що управляє.

Зміна його частоти призводить до зміни частоти на виході інвертора. Зміна амплітуди сигналу, що управляє, при незмінній частоті призводитиме до зміни співвідношення тривалості позитивних і негативних імпульсів напруги на виході, тобто до зміни амплітуди його першої гармоніки. При високій частоті ШІМ і активно-індуктивному навантаженню, яким являється обмотка машини змінного струму, струм навантаження виявляється практично синусоїдальним.

Проте потрібно враховувати і ряд негативних ефектів, пов'язаних з підвищенням частоти ШІМ, а саме наявність електромагнітних перешкод, що впливають на інші електротехнічні і радіотехнічні пристрої, і виникнення перенапружень в ланцюзі навантаження, що небезпечно для ізоляції обмоток двигуна.

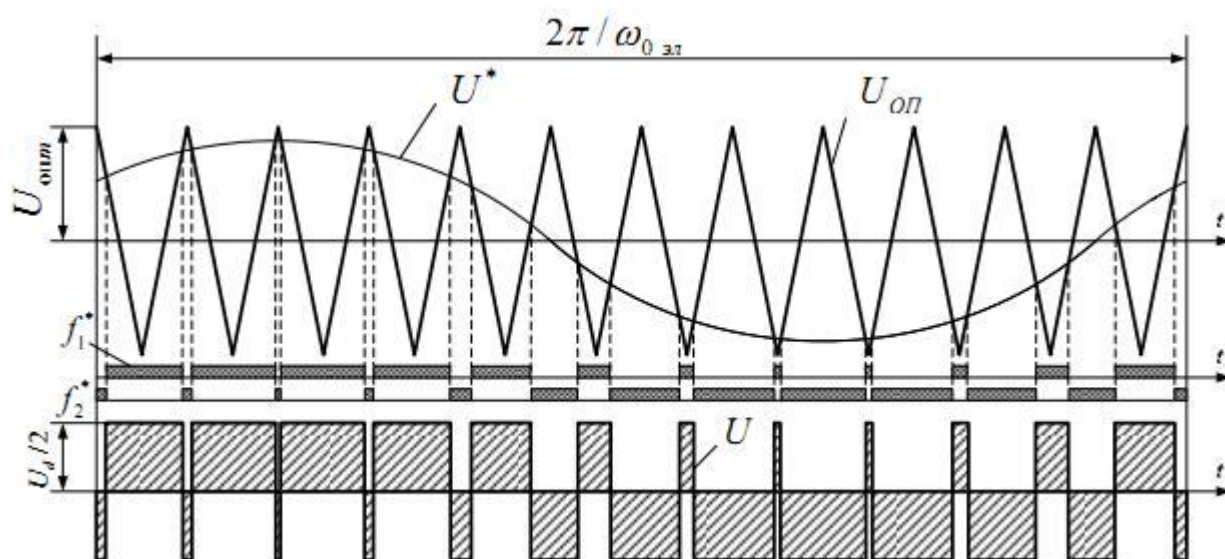


Рисунок 2.20. – Принцип широтно-імпульсної модуляції на прикладі однофазного інвертора.

2.4. Розрахунок схеми системи управління

Був вибраний датчик Холла SS39ET компанії Honeywell, з характеристик даного датчика, видно, що при зміні магнітної індукції від $-0,1$ Тл до $+0,1$ Тл напруга, яку видає датчик, змінюється від 1 В до 4 В, в результаті обмотка

датчика різниці частот повинна створювати індукцію до 0,1 Тл. Так як напруга, яка видається датчиком, починається від 1 В, потрібно синусоїду змістити, так щоб вона змінювалася від 0 до 3 В. Для цього подаємо + 1 В на неінвертуючий вхід операційного підсилювача ОП (рис. 2.21, DA1).

Для підсилення сигналу з датчика Холлу, використовується неінвертуючий підсилювач на ОП DA1. Для підсилення сигналу до рівня 9 В, сигнал с такою амплітудою видає ГПН, резистор R1 беремо 100 кОм, R2 розраховуємо за формулою

$$R2 = -\frac{R1 \cdot (U_x - U_n)}{U_x} = -\frac{100 \cdot 10^3 \cdot (3 - 9)}{3} = 200 \cdot 10^3 \text{ Ом.}$$

Для фільтрування отриманого сигналу використовується фільтр низьких частот ФНЧ першого порядку на DA2. Він дозволяє відсікти сигнал, частота якого вище заданої в 50 Гц. Для цього конденсатор C1 беремо величиною 0,1 мкФ, а резистор R4 розраховуємо за формулою

$$R4 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C1 \cdot f} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 0.1 \cdot 10^{-6} \cdot 50} = 31.8 \cdot 10^3 \text{ Ом.}$$

Так як фільтр використовується як повторювач, для цього резистор R3 беремо рівним R4. Після фільтрування сигнал подається на неінвертуючий вхід компаратора OP1.

В якості ГПН використовується схема на базі DA3 та DA4, сигнал від якої йде до компаратора OP1 на інвертуючий вхід.

ГПН складається з тригера Шмітта на операційному підсилювачі DA3, і з інтегратора, зібраного на операційному підсилювачі DA4. Обоє ОП сполучені послідовно через діоди D1 та D2, резистори R7 та R8. За допомогою резистора R10 схема охоплена зворотним зв'язком.

На інвертуючий вхід ОП DA3 і прямий вхід ОП DA4 подається половина напруги живлення з дільника напруги, зібраного на резисторах R5, R6, що дозволяє обійтися одним джерелом живлення.

Для роботи схеми необхідні наступні елементи:

R10 = 100 кОм; R9 = 120 кОм; R8 = 100 кОм; R7 = 1.5 кОм; R6 = 100 кОм;
R5 = 100 кОм; C2 = 0,1 мкФ; D1 = 1N4148; D2 = 1M4148.

В якості операційних підсилювачів використовуються LT1028.

Розглянемо принцип роботи ГПН. При включенні живлення конденсатор C3 розряджений, він починає заряджатися через ланцюг D2-R8 і вихід підсилювача DA3, на якому встановилася низька напруга, інший вивід конденсатора C3 підключений до виходу ОП DA4, на якому напруга росте. Як тільки ця напруга досягне порогу перемикавання тригера Шмітта DA3, то тригер перемикнеться і на його виході встановиться деяка напруга, яка через діод D1 і резистор R7 спочатку розряджатиме, а потім заряджатиме до іншої полярності конденсатор C3. Далі процес повторюється, і схема переходить в автоколивальний режим.

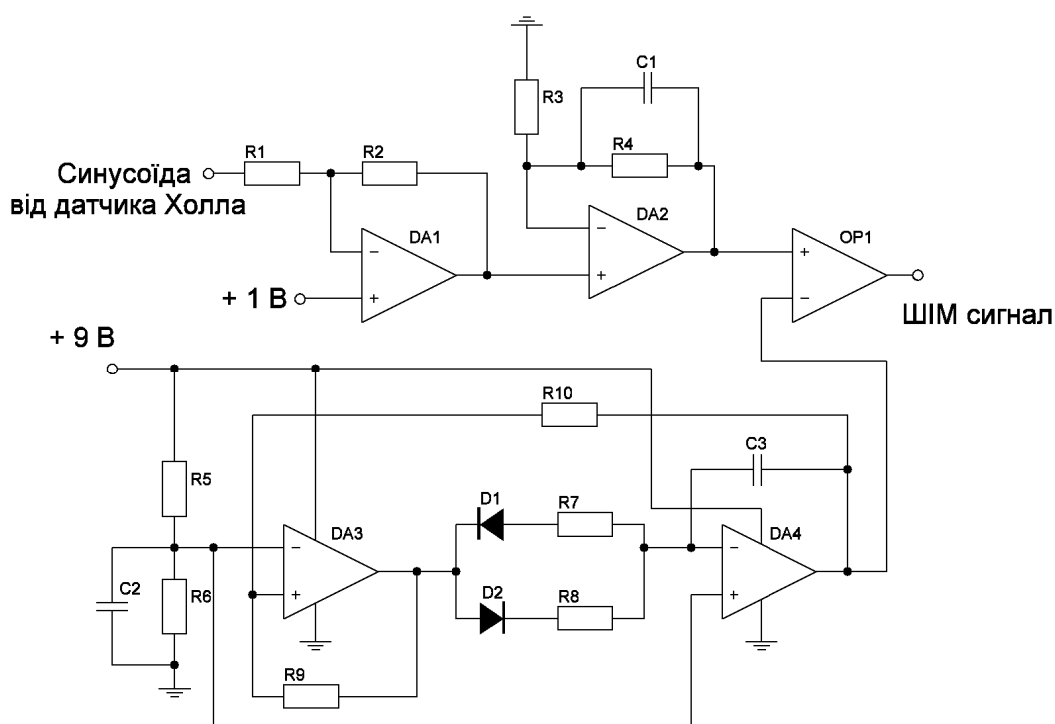


Рисунок 2.21. – Система управління

Оскільки резистори R7 і R8, через які відбувається заряд і розряд конденсатора C3 мають різний номінал, то і час заряду і розряду конденсатора буде різним, відповідно пилоподібна напруга на виході ОП DA3 буде довго наростати і швидко спадати. Частота пилоподібного сигналу на виході генератора визначається по формулі

$$F = \frac{0.7 \cdot R9}{2 \cdot C3 \cdot R10 \cdot (R7 + R8)},$$

де F - частота в Герцах; R7, R8, R9, R10 - опори в Омах; C3 - місткість у Фарадах.

В інверторі частота переключання транзисторів дорівнює 2кГц, для підтримання цієї частоти розрахуємо ємність конденсатора C3

$$C3 = \frac{0.7 \cdot R9}{2 \cdot F \cdot R10 \cdot (R7 + R8)} = \frac{0.7 \cdot 120 \cdot 10^3}{2 \cdot 2 \cdot 100 \cdot 10^3 (1.5 \cdot 10^3 + 100 \cdot 10^3)} = 2 \text{ мкФ.}$$

2.5. Математичне моделювання безщіткового асинхронізованого синхронного генератора

За допомогою пакета Simulink, який входить до складу програмного забезпечення Matlab, було побудовано модель асинхронізованого синхронного генератора, яка представлена на рис.2.22. Схема блока автоматичного регулятора частоти представлена на рис. 2.23. Ця модель імітує роботу регулятора частоти пропорційного типу, тобто регулювання по відхиленню регульованої величини, в цьому випадку частоти. За допомогою блоків Constant2 та Add4, задається частота обертання на 5% менша від номінальної частоти, для того щоб побачити як працює генератор. Блок Constant задає частоту обертання машини на 10% меншу від номінальної, для того щоб імітувати зміну частоти ротора. Блок Gain2 задає коефіцієнт зворотного зв'язку, який дорівнює 200 в. о., а блок Saturation2 слугує для того, щоб обмежити момент приводного двигуна заданим значенням, тому що двигун не може видавати момент більше заданого значення. На вхід In надходить сигнал, який показує частоту обертання машини, а на вхід In1 надходить сигнал електромагнітного моменту генератора. Блок Gain1 слугує для приведення електромагнітного моменту машини з більшою потужністю до машини з меншою.

Схема автоматичного регулятора збудження представлена на рис. 2.25. Ця модель імітує роботу регулятора збудження пропорційного типу, тобто регулювання по відхиленню регульованої величини, в цьому випадку напруги статора асинхронізованого синхронного генератора. За допомогою блоку Constant1 задається усталене значення напругою статора генератора. Блок Gain4 імітує коефіцієнт підсилення сигналу зворотного зв'язку, а блок Saturation1 обмежує значення напруги збудження збудника.



Рисунок 2.22. – Модель робота асинхронізованого синхронного генератора

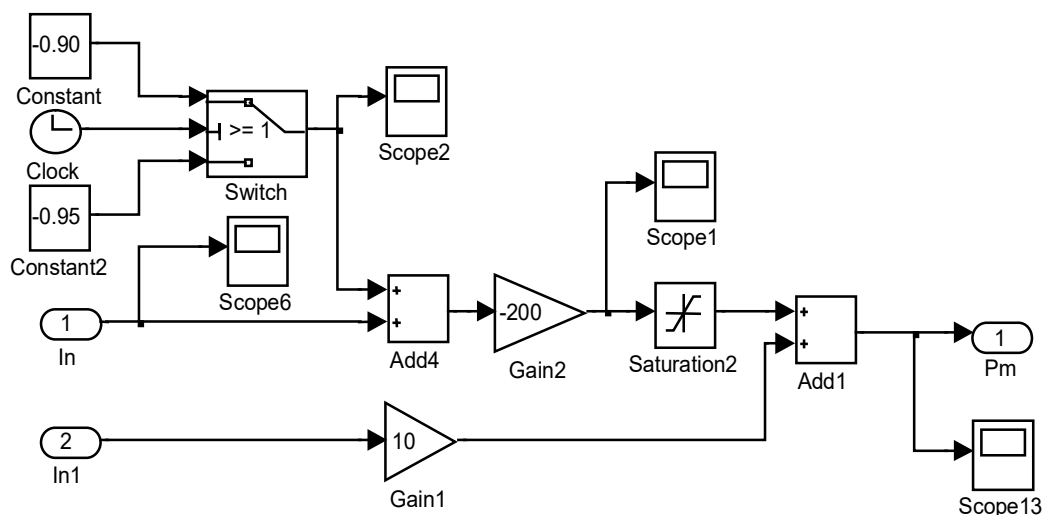


Рисунок 2.23. – Модель автоматичного регулятора частоти

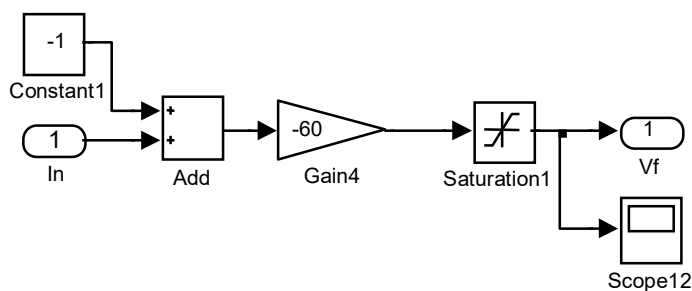


Рисунок 2.24. – Модель автоматичного регулятора збудження

В якості збудника використовується стандартна синхронна машина, а в якості генератора – стандартна асинхронна машина з фазним ротором. Також в схемі присутні: некерований випрямляч; конденсатор, який використовується для фільтрування сигналу, який виходить до випрямляча; автономний інвертор на IGBT транзисторах.

Автономним інвертором управляє система управління, схема якої представлена на рис. 2.25.

Система управління складається з двох частин: датчик Холла (рис. 2.26) та генератора ШІМ сигналу. За допомогою блоків Constant3 визначається частота ковзання машини.

Датчики Холла встановлені на роторі машини і обертаються навколо валу з частотою обертання ротора машини. На статорі встановлено 3-х фазну обмотку на яку подається синусоїдальний сигнал з заданою частотою. Коли частота обертання змінюється відносно заданої, датчики Холла починають виробляти сигнал з частотою, що дорівнює різниці фіксованої частоти та частоти обертання ротора, і цей сигнал надходить до генератора ШІМ сигналу. На рис. 2.26 зображено модель роботи даних датчиків. В цій моделі здійснюється імітація зсуву цього сигналу на 120 електричних градусів.

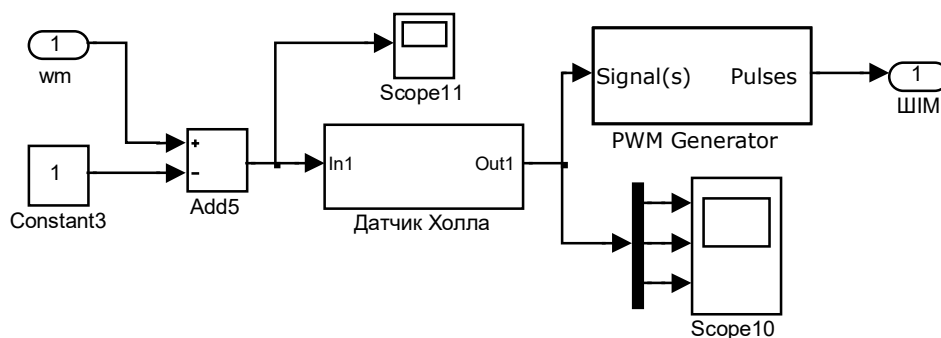


Рисунок 2.25. – Модель системи управління

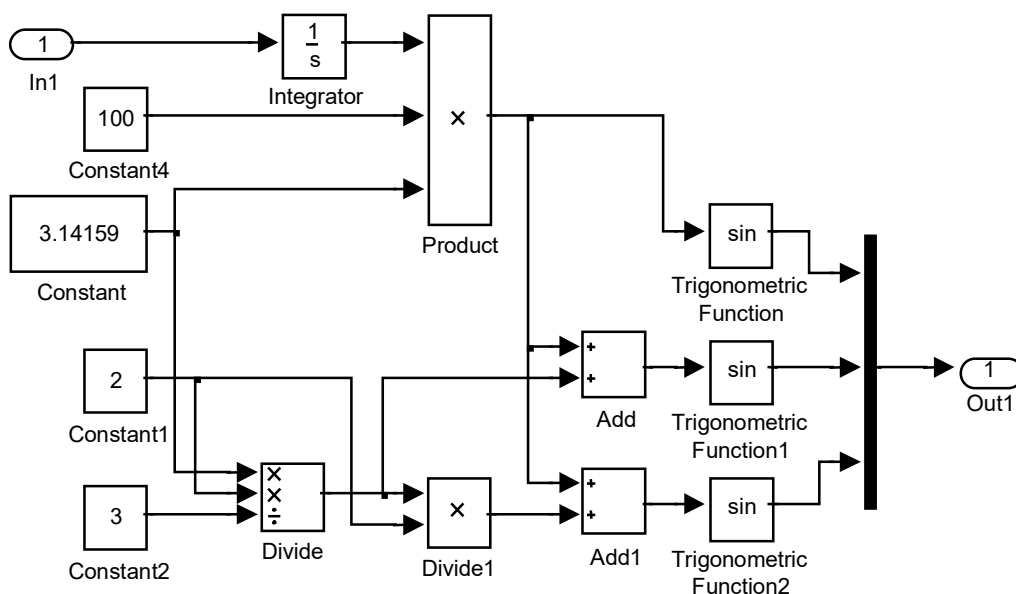


Рисунок 2.26. – Модель датчика Холла

Модель визначення напруги статора генератора представлена на рис. 2.27. Ця модель дозволяє розрахувати поточні значення напруги статора генератора:

$$U = \sqrt{U_q^2 + U_d^2},$$

де U_d та U_q - подовжня та поперечна складова напруги статора.

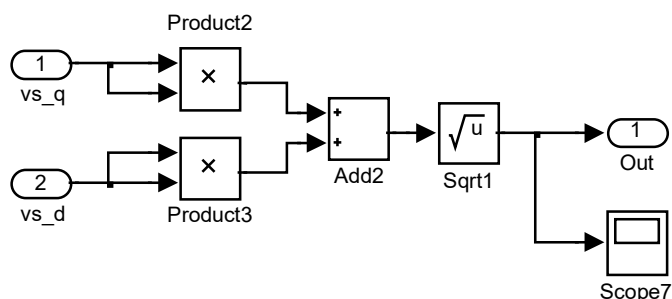


Рисунок 2.27. – Модель схеми напруги статора генератора

Також до моделі входять блоки, що моделюють активне та індуктивне навантаження, фільтр, а також датчики напруги та струму, які допомагають знімати показники струму та напруги в різних частинах машини. Блоки Scope відображають осцилограми величин, які знімаються в продовж моделювання. За допомогою блока перемикача здійснюється накидання навантаження через заданий відрізок часу.

Для забезпечення імітації роботи машин на одному валу, був побудований зв'язок за швидкістю, тобто інформація про частоту обертання збудника поступає на асинхронну машину, як фіксоване значення її обертання, а також подається на автоматичний регулятор частоти та систему управління інвертора.

Під час моделювання даної схеми, було проведено дослідження для трьох режимів роботи: перший режим – це режим розгону машини до номінальної частоти обертання при відсутності навантаження, він відбувався в проміжку часу від 0 до 0,8 с; другий режим – це імітування накидання 40% навантаження (потужність генератора в моделі складала 160 кВА), він відбувався в проміжку від 0,8 до 1,3 с; третій режим – це імітування зміни частоти обертання з 0,95 до 0,9 в.о., він відбувався в проміжку від 1,3 до 1,8 с.

Розрахунок навантаження, яке було накинута під час моделювання:

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L = 314 \cdot 0.0025 = 0,785 \text{ Ом};$$

$$z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{2^2 + 0,785^2} = 1,27 \text{ Ом.}$$

На рисунку 2.28 приведений графік швидкості обертання ротора машини, на ньому видно, що через те, що машина має велику інерційність, генератор повільно набирає оберти і виходить на номінальний режим роботи, потім здійснюється накидання навантаження і швидкість падає на 2 %. Після навантаження здійснюється імітація зміни частоти обертання. Всі ці режими роботи машини показані на рис. 2.28. З графіка видно, що після зміни режиму роботи машина повертається в новий усталений стійкий режим роботи.

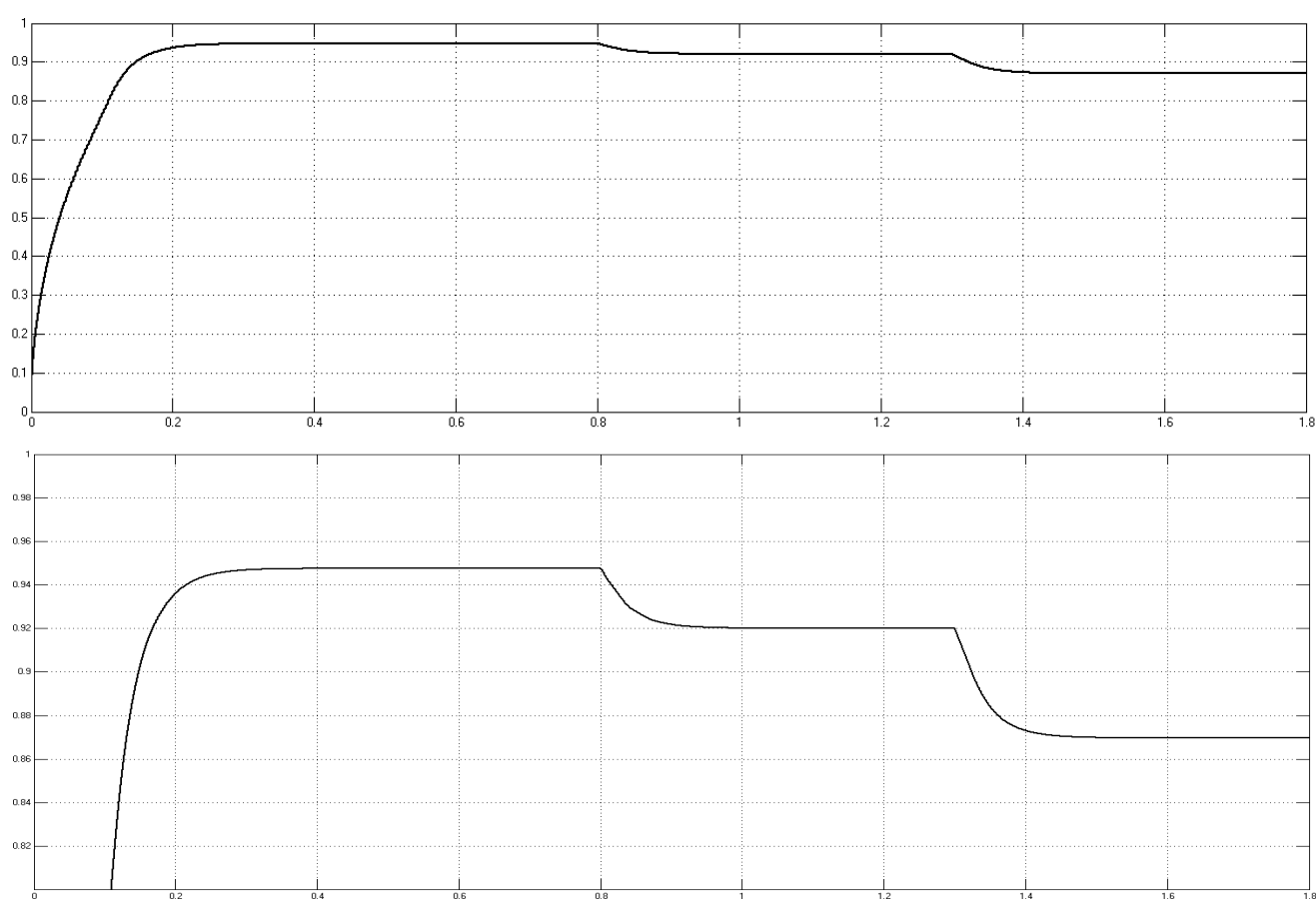


Рисунок 2.28. – Графік частоти обертання генератора

На рисунках 2.29 та 2.30 показанні графіки напруги та струму статора генератора, з них видно, що генератор відпрацьовує нормально і частота до накидання навантаження і після не змінилися, але під час накидання напруга трохи просідає, струм збільшується. Під час зміни частоти обертання, на графіку напруги, видно що напруга спочатку має незначні відхилення, але потім

повертається до початкового значення. На графіку струму видно як в момент зміни частоти, струм практично не змінився як за амплітудою, так і за частотою. Таким чином при різних режимах роботи маємо зміну величини струму навантаження, але змодельована система керування збудженням підтримує постійні значення частоти (50 Гц) і амплітуди напруги статора.

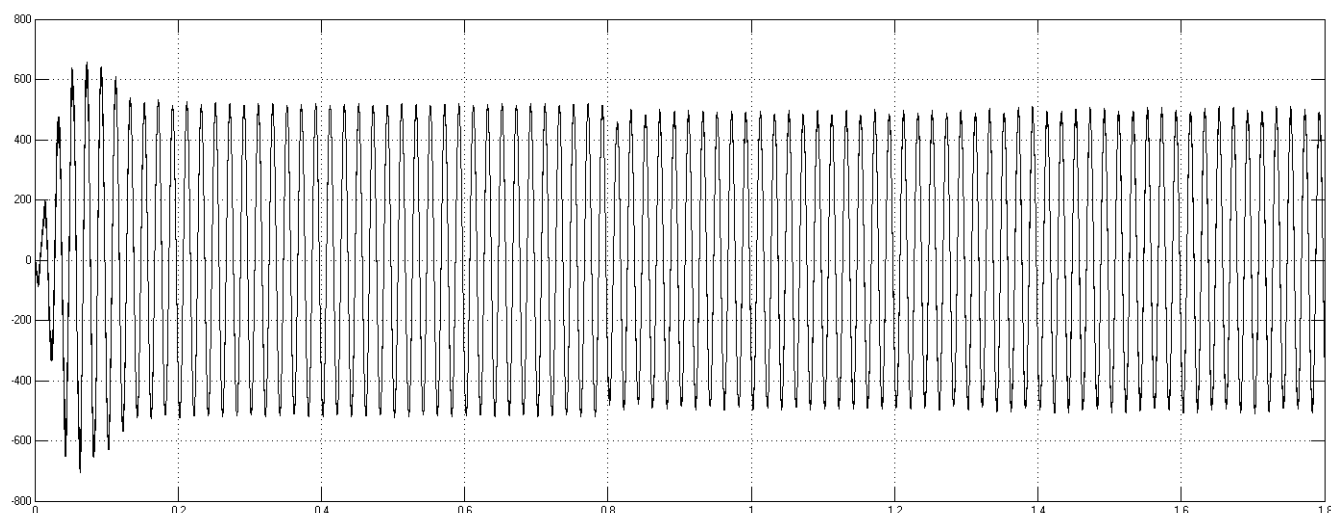


Рисунок 2.29. – Графік напруги статора генератора

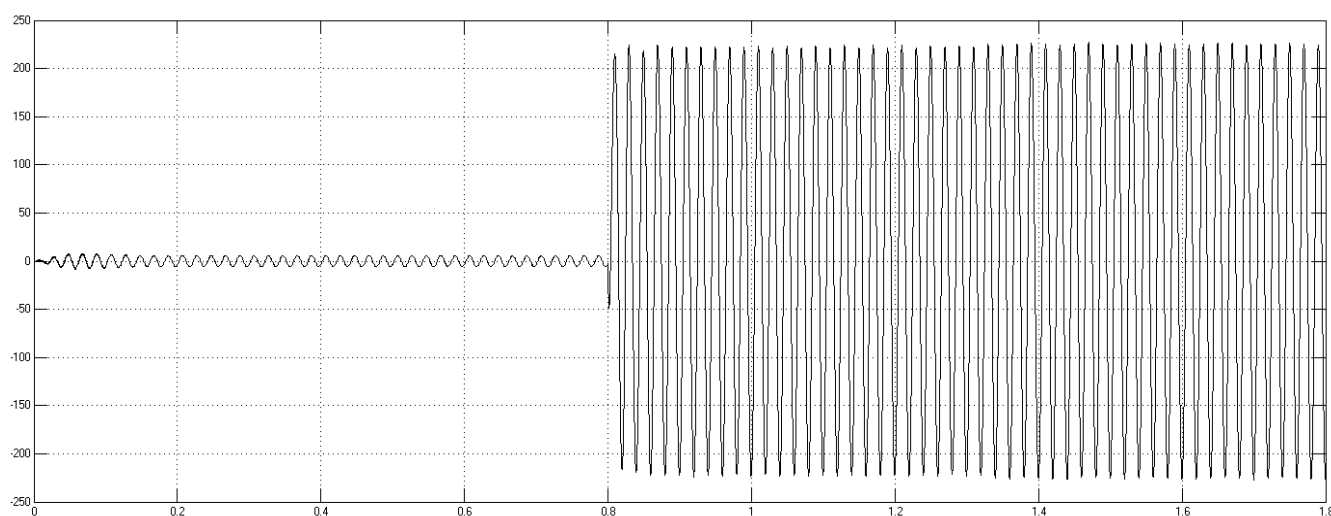


Рисунок 2.30. – Графік струму статора генератора

На рисунку 2.31 приведений графік сигналів з датчика Холла. З графіка видно, що сигнали з датчика зсунуті один відносно одного на 120 електричних градусів. Причому амплітуда вихідної напруги датчика постійна, а ось частота змінюється відповідно до зміни частоти обертання ротора.

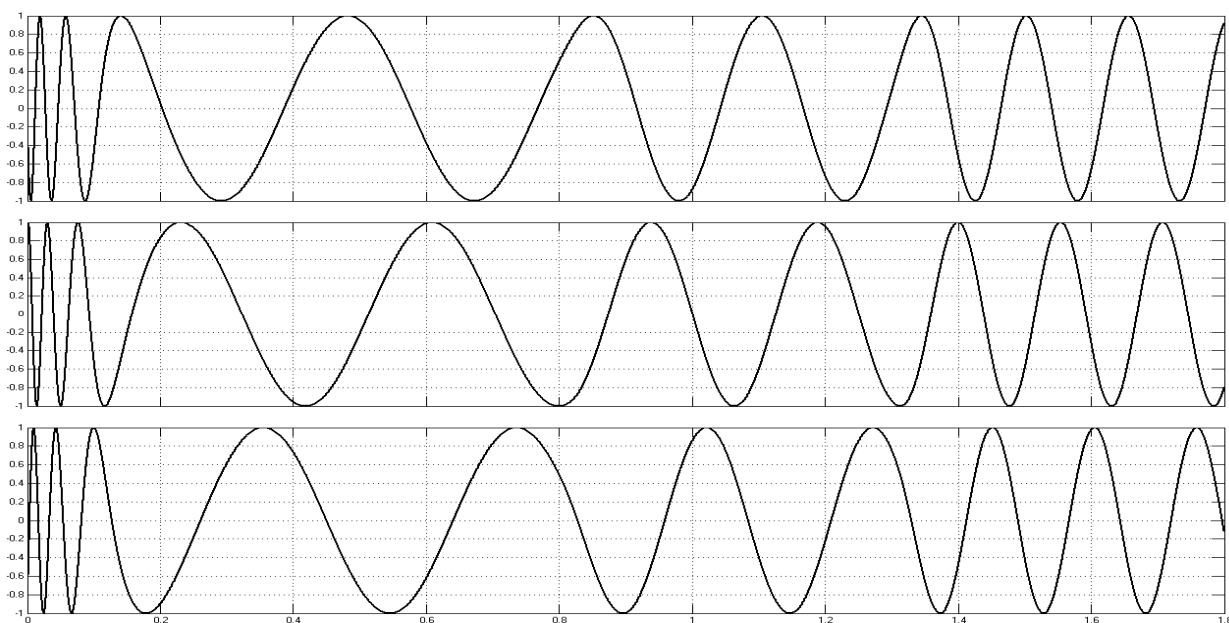


Рисунок 2.31. – Графік сигналів з датчика Холла

На рис. 2.32 показаний сигнал, який формується на виході автономного інвертора, а на рис. 2.33 графік струму збудника.

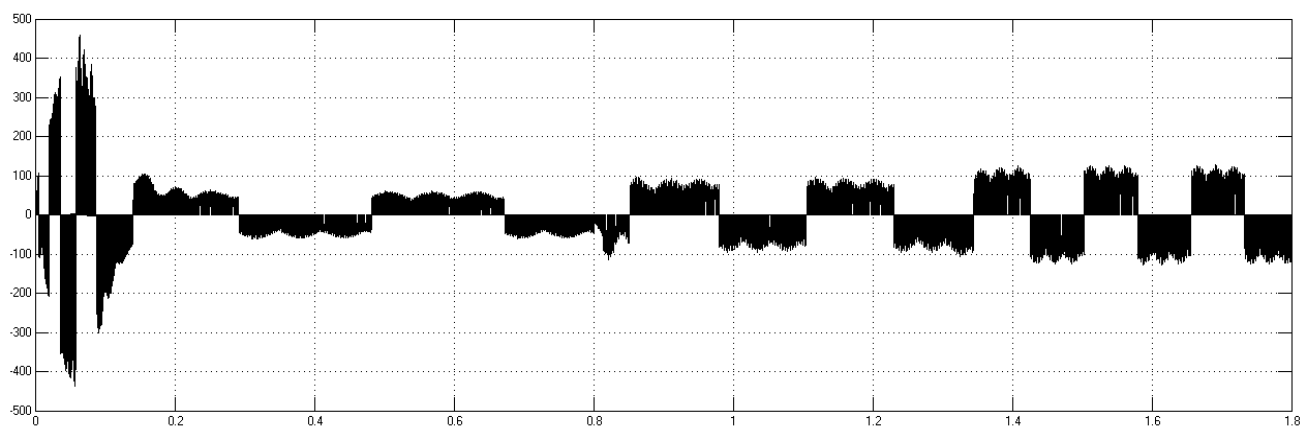


Рисунок 2.32. – Графік напруги інвертора

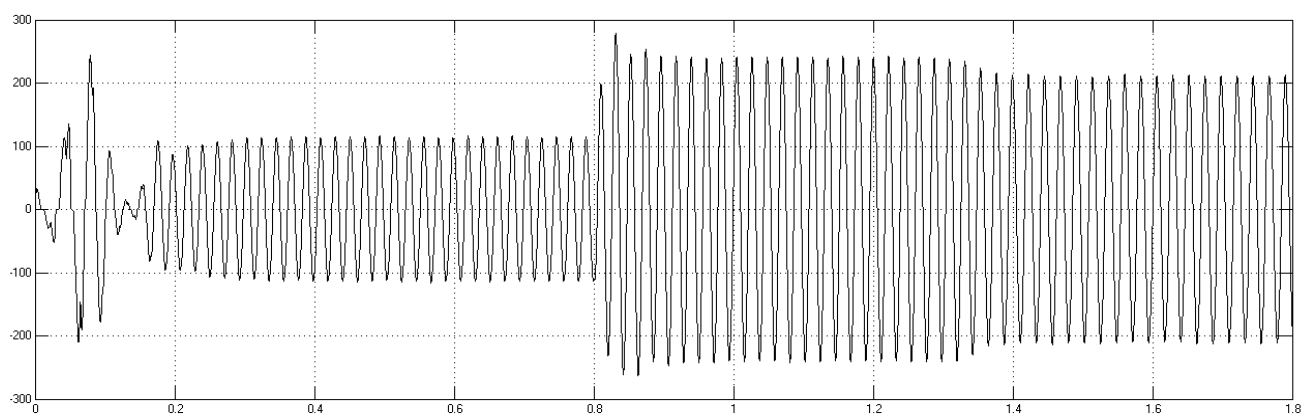


Рисунок 2.33. – Графік струму збудника

2.6. Висновки до розділу 2

1. Застосування валогенераторів дозволяє значно заощаджувати паливо (до 30 %), збільшувати моторесурс допоміжних дизельних установок, робити суднову енергосистему більш гнучкою й економічною. Однак, існує проблема підтримки частоти вихідної напруги на заданому рівні.

2. Запропоновано використовувати в якості валогенератора безщітковий асинхронізований синхронний генератор. На його валові розташовується симетрична трифазна обмотка збудження, що одержує живлення від джерела трифазної напруги перемінної амплітуди і частоти. Частота регулюється таким чином, щоб щодо обмотки статора поле збудження завжди оберталося з однією і тією ж частотою. У результаті частота вихідної напруги завжди буде підтримуватись постійною незалежно від частоти обертання вала.

3. Розглянуті раніше запропоновані конструктивні рішення реалізації безщіткового асинхронізованого синхронного генератора. Вони відрізняються тим що в одній пропонувалося використовувати дві машини постійного струму, в іншій використання двох магнітних систем, що розташовуються одна над одною відносно осі обертання. В наступній системі використовувалася машина з трифазною обмоткою статора та ротора та ланцюгом між ними, в який входять випрямляч та інвертор. В останній системі використовувалася машина в якій замість щіткового апарату додатково встановлений збудник з трифазними обмотками ротора і статора. Але в існуючих моделях присутні конструктивні недоліки, які погіршують масогабаритні показники.

4. Пропонована конструкція, яка представлена в даній роботі, складається з двох машин (збудника та генератора), системи управління, перетворювача частоти та вузла визначення різниці заданої частоти від частоти обертання ротора машини. Збудник та генератор об'єднані єдиною магнітною системою. Для забезпечення магнітної розв'язки обмоток обох машин число пар полюсів збудника було узятو в 2 рази більше ніж число пар полюсів синхронного генератора.

5. Побудована в середовищі MathLAB модель безщіткового асинхронізованого синхронного генератора, проаналізувавши яку, отримали графіки вихідних характеристик, з яких видно, що на виході напруга підтримується з постійною частотою.

6. Розглянуто та розраховано конструкцію системи управління тиристорами інвертора. В роботі запропонована конструкція датчика різниці частоти, який складається з наступних елементів: феромагнітного диска, який розташований на одному роторі з генератором; датчиків Холлу, які встановлені на диску; магнітопроводу із розподіленою трифазною обмоткою, на яку подається сигнал від джерела фіксованої частоти.

РОЗДІЛ 3. ВИМОГИ ПОЛОЖЕНЬ МІЖНАРОДНОЇ КОНВЕНЦІЇ МАРПОЛ 73/78 ЩОДО КОНТРОЛЮ ЗА ВИКИДАМИ З СУДЕН

3.1 Озоноруйнівні речовини.

Озоноруйнівні речовини, які можуть бути виявлені на судні, включають, не обмежуючись цим:

Галон 1211(Halon 1211) – бромхлордіфторметан ($\text{CF}_2 \text{BrCl}$);

Галон 1301(Halon 1301) – бромтрифторметан ($\text{CF}_3 \text{Br}$);

Галон 2402(Halon 2402) – 1,2 дібром-1,1,2,2-тетрафторетан ($\text{C}_2\text{F}_4\text{Br}_2$), також відомий як Галон 114B2 (Halon 114B2);

ХФУ-11(CFC-11) – трихлорфторметан, (CFCl_3);

ХФУ-12 (CFC-12) – діхлордіфторметан, (CF_2Cl_2);

ХФУ-113 (CFC-113) – 1,1,2-трихлор- 1,2,2-трифторетан, ($\text{C}_2\text{F}_3\text{Cl}_3$);

ХФУ-114 (CFC-114) – 1,2 -діхлор-1,1,2,2-тетрафторетан, ($\text{C}_2\text{F}_4\text{Cl}_2$);

ХФУ-115 (CFC-115) – хлорпентафторетан, ($\text{C}_2\text{F}_5\text{Cl}$).

Вимоги у відношенні контролю за викидами озоноруйнівних речовин не застосовуються до постійно герметичного обладнання, у якого немає з'єднань для заряджання холодильного агента або потенційно знімних компонентів, утримуючих озоноруйнівні речовини. До такого обладнання можуть бути віднесені побутові холодильники, холодильні камери, кондиціонери повітря тощо.

Будь-які навмисні викиди озоноруйнівних речовин забороняються. Навмисні викиди включають викиди, що відбуваються в процесі технічного обслуговування, догляду, ремонту або видалення систем або обладнання, проте навмисні викиди не включають мінімальні викиди, пов'язані з уловлюванням або рециркуляцією озоноруйнівних речовин. Викиди, які є результатом витоків озоноруйнівних речовин, незалежно від того, є ці витoki навмисними чи ні, можуть регулюватися Сторонами.

Установки, утримуючі озоноруйнівні речовини, які не є гідрохлорфторвуглецями (ГХФВ/ HCFC), забороняються:

.1 на суднах, побудованих 19 травня 2005 року чи після цієї дати; або

.2 у відношенні суден, побудованих до 19 травня 2005 року, договірне постачання обладнання на які здійснюється після цієї дати або, у випадку відсутності дати договірного постачання, фактичне постачання обладнання на які здійснюється 19 травня 2005 року чи після цієї дати.

Установки, утримуючі сполуки гідрохлорфторвуглецю (ГХФВ/ HCFC), забороняються:

.1 на суднах, побудованих 1 січня 2020 року чи після цієї дати; або

.2 у відношенні суден, побудованих до 1 січня 2020 року, договірне постачання обладнання на які здійснюється 1 січня 2020 року чи після цієї дати або, у випадку відсутності дати договірного постачання, фактичне постачання обладнання на які здійснюється 1 січня 2020 року чи після цієї дати.

Речовини, зазначені у цьому підрозділі, і обладнання, утримуюче такі речовини, при видаленні їх з суден, повинні доставлятися на належні приймальні споруди. На кожному судні валовою місткістю 400 і більше, а також кожній стаціонарній і плавучій буровій установці та інших платформах, повинний бути перелік обладнання, утримуючого озоноруйнівні речовини.

На кожному судні валовою місткістю 400 і більше, а також кожній стаціонарній і плавучій буровій установці та інших платформах, на яких є перезаряджуванні системи, утримуючі озоноруйнівні речовини, повинний вестися Журнал озоноруйнівних речовин. Цей журнал може становити частину існуючого судового журналу або електронного журналу реєстрації, схваленого Адміністрацією. Система електронної реєстрації, приписана у Правилі 12.6 Додатку VI до Конвенції МАРПОЛ, прийнята резолюцією МЕРС.176(58), повинна розглядатися як електронний журнал операцій, за умови, що електронна система реєстрації схвалена Адміністрацією підчас або перед першим оглядом для поновлення Міжнародного свідоцтва щодо запобігання забрудненню атмосфери (Свідоцтва IAPP), який здійснюється 1 жовтня 2020 року або після цієї дати, але не пізніше 1 жовтня 2025 року.

Журнал озоноруйнівних речовин повинен містити записи щодо зміни кількості озоноруйнівних речовин, кг, які виробляються при:

- .1 перезаряджуванні (повному або частковому) обладнання, що містить озоноруйнівні речовини;
- .2 ремонті або технічному обслуговуванні обладнання, що містить озоноруйнівні речовини;
- .3 навмисному і ненавмисному викиді озоноруйнівних речовин в атмосферу;
- .4 скиданні озоноруйнівних речовин в берегові приймальні споруди;
- .5 постачанні озоноруйнуючих речовин на судно.

Капітану судна, що користується портами, в яких немає приймальних споруд, слід забезпечити на судні достатні ємкості для зберігання всіх ОРР, які можуть утворюватися під час рейсів, що включають заходи в порти і термінали, де немає приймальних споруд.

3.2 Окисли азоту

Вимоги відносно контролю за викидами окислів азоту (NO_x) застосовуються до:

- .1 кожного суднового дизельного двигуна номінальною потужністю більше 130 кВт, який установлений на судні;
- .2 кожного суднового дизельного двигуна номінальною потужністю більше 130 кВт, який піддається значному переобладнанню 1 січня 2000 року чи після цієї дати, за винятком випадків, коли продемонстровано для задоволення Регістра, що такий двигун є ідентичною заміною двигуна, який він замінює.

Поняття «ідентичний» належить розуміти таким чином: «Ідентичним двигуном» відносно двигуна, який замінюється, є двигун:

- такої ж конструкції і моделі;
- той же номінальної потужності;
- той же номінальної частоти обертання;
- того ж призначення;
- з такою ж кількістю циліндрів;

- з таким же типом паливної системи (включаючи програмне забезпечення управління впорскуванням, якщо доречно);

Вимоги відносно контролю за викидами окислів азоту (NO_x) не застосовуються до:

.1 суднового дизельного двигуна, призначеного для використання винятково у аварійних ситуаціях чи винятково для приведення в дію будь-якого пристрою чи обладнання, призначеного для використання винятково в аварійних ситуаціях на судні, на якому він установлений, або суднового дизельного двигуна, установленного на рятувальних шлюпках, призначених для використання винятково у аварійних ситуаціях;

.2 суднового дизельного двигуна, установленного на судні, що здійснює рейси винятково у водах, що перебувають під суверенітетом або юрисдикцією держави, під прапором якої судно має право плавати, за умови, що такий двигун підпадає під альтернативні заходи контролю викидів NO_x , установлені Адміністрацією;

.3 суднового дизельного двигуна який забезпечує роботу технологічного обладнання плавучих бурових установок (ПБУ), морських стаціонарних платформ (МСП) і плавучих нафтогазодобувних комплексів (ПНК) при розвідуванні, перероблені і пов'язаних з ними процесів оброблення мінеральних ресурсів морського дна.

Адміністрація може надати виняток із застосування цього підрозділу для будь-якого суднового дизельного двигуна, який установлений на судні побудованому до 19 травня 2005 року, або для будь-якого суднового дизельного двигуна, який піддається значному переобладнанню до цієї дати, за умови, що судно, на якому установлений двигун, здійснює рейси винятково в порти або до віддалених від берега терміналів, що перебувають в межах держави, під прапором якої судно має право плавати.

Значне переобладнання означає модифікацію 1 січня 2000 року або після цієї дати суднового дизельного двигуна, який ще не сертифікований у відповідності до стандартів, за якої:

.1 двигун замінюється судновим дизельним двигуном або встановлюється додатковий судновий дизельний двигун;

.2 двигун піддається будь-якій значній модифікації;

.3 максимальна тривала вихідна потужність двигуна збільшується більше ніж на 10% порівняно з максимальною тривалою вихідною потужністю двигуна при його первісній сертифікації.

Відносно значного переобладнання, пов'язаного із заміною суднового дизельного двигуна неідентичним судновим дизельним двигуном або встановленого додаткового суднового дизельного двигуна, застосовуються наступні вимоги (стандарти): Стандарт Ярусу I (3.2.5); Стандарт Ярусу II (3.2.6) та Стандарт Ярусу III (3.2.7), які діють під час заміни або встановлення додаткового двигуна. Тільки відносно двигунів, що замінюються, якщо двигун, що замінює не може відповідати вимогам, викладеним у 3.2.7.1.1 (Стандарт Ярусу III), залежно від конкретного випадку, то цей двигун, що замінює, повинний відповідати стандартам, викладеним в 3.2.6 (Стандарт Ярусу II), з урахуванням Керівництва, розробленого Організацією.

Згідно з VI МАКТ МРС98 і циркуляром ІМО МЕРС.1/Circ.795/Rev.4 «час заміни або встановлення додаткового двигуна» слід визначати, як дату:

.1 контрактну дату поставки двигуна на судно в разі, коли двигун встановлений на борту судна і випробуваний за прямим призначенням в межах шести місяців;

.2 при відсутності контрактної дати поставки - фактичну дату поставки двигуна на судно у разі, коли двигун встановлений на борту судна і випробуваний за прямим призначенням в межах шести місяців, за умови, що дата поставки документально підтверджена;

.3 фактичну дату випробування двигуна на борту судна за прямим призначенням у випадку, коли двигун встановлений на борту судна і випробуваний за прямим призначенням на дату або через шість місяців.

Вищевказані дати є датами значного переобладнання і повинні бути вказані в додатку до Свідоцтва ІАРР. Якщо контракт на поставку двигуна укладений до 1

січня 2021 року, або якщо відсутня контрактна дата поставки, а двигун був установлений на судно (з документальним підтвердженням дати поставки) до цієї дати, але не випробуваний в межах шести місяців після 1 січня 2021 року у зв'язку з непередбаченими обставинами, що не залежать від судновласника, то питання щодо «непередбаченої затримки поставки» може бути розглянуто Адміністрацією на основі положень пункту 4 Єдиних тлумачень Додатку I до Конвенції МАРПОЛ.

Якщо при заміні двигуна встановлено, що двигун, який замінює, не відповідає стандартам, зазначеним у Правилі 3.2.7.1.1 (Ярус III), то він повинен відповідати стандартам, зазначеним у Правилі 3.2.6.1 (Ярус II). Критерії того, в яких випадках двигун, який замінює, не може відповідати стандартам, наведені у вищезгаданому Керівництві ІМО 2013 року по застосуванню вимог Правила 13.2.2 Додатку VI до Конвенції МАРПОЛ відносно неідентичної заміни двигунів, при якій не вимагається виконання вимог стандарту Ярусу III (див. резолюцію ІМО МЕРС.230(65)). Такими критеріями є:

.1 двигун, який замінює, аналогічної потужності і відповідає стандартам викидів за Ярусом III, не є комерційно доступним;

.2 двигун, який замінює, в порядку приведення його у відповідність до вимог стандарту викидів за Ярусом III, повинен бути оснащений пристроєм зниження викидів NO_x , який: в силу своїх розмірів не може бути встановлений через обмежений простір на борту судна; або внаслідок значного тепловиділення може здійснити негативний вплив на конструкцію судна, обшивку та/або обладнання, коли додаткова вентиляція і/або ізоляція машинного відділення/відсіку неможливі;

.3 двигун, який замінює, не може бути встановлений в силу своїх розмірів і ваги, а також через несумісність з компонентами судна (приводні вали, редуктори, гребні вали тощо.), з судновими системами і обладнанням;

.4 регулювання двигуна, який замінює і який повинен бути оснащений пристроєм для зниження викидів NO_x , не допускає можливості спільної роботи

двигуна і цього пристрою, а також інші критерії, зазначені в вищезгаданому Керівництві ІМО 2013 року.

У разі значного переобладнання (заміна суднового дизельного двигуна на неідентичний або встановлення додаткового суднового дизельного двигуна) 1 січня 2000 року або після цієї дати, але до 1 липня 2010 року, необхідно застосовувати УІ МАКТ МРС20 (Rev.1 Apr 2014). Для ідентифікації двигуна щодо встановлення, чи є він ідентичним двигуном, необхідно враховувати Єдині тлумачення згідно циркуляру ІМО МЕРС.1/Circ.795/Rev/4.

Під час виявлення неможливості заміни суднового двигуна на двигун Ярусу ІІІ слід не тільки оцінювати розміри і вагу двигуна, але й, можливо, враховувати інші характеристики судна, що мають істотне значення з цієї точки зору. Такі суттєві характеристики можуть включати:

.1 суднові пристрої та системи, які пов'язані з двигуном, такі, як приводні вали, редуктори, система охолодження, система газовипуску і вентиляції та гребні вали;

.2 електричні системи для дизельних генераторів (двигуни з редукторами);

.3 інші допоміжні системи та суднове обладнання, що впливають на вибір двигуна.

Також мають бути розглянуті обмеження, що стосуються регулювання/синхронізації двигунів, які необхідні для дотримання граничних умов, і дані про робочі характеристики, необхідні для використання системи селективного каталітичного відновлення СКВ (SCR) у всіх відповідних точках режиму.

Якщо двигун, що замінює, є частиною силової установки з декількох (двох) двигунів і він замінює двигун, який не є двигуном, що відповідає Ярусу ІІІ, оскільки він був встановлений до дати введення в дію вимог Ярусу ІІІ, необхідність синхронізації двигуна, що замінює, з цією силовою установкою має бути одним з критеріїв, що підлягає контролю. У подібних випадках, коли прийнято рішення про відмову від заміни двигуна в системах з декількома двигунами, має бути ясно, що в разі установки головних двигунів синхронними

парами (або синхронними групами двигунів кількістю більше двох), таке узгодження необхідно для забезпечення порівнянного маневрування/набирання потужності, що не так істотно для установки декількох двигунів з іншими функціями, наприклад, для дизель-генераторів. Двигун, що замінює, який відповідає граничним показникам Ярусу III, має бути встановлений, якщо його установка не призведе до збільшення потреби судна в електроенергії, що перевищує встановлену потужність.

Ні в якому разі не допускається модифікація конструкції судна, яка призводить до зниження остійності судна нижче прийнятного рівня. Регістр повинен проаналізувати, якою мірою надані судновласником технічні характеристики агрегату можуть служити підставою для визначення відсутності необхідності відповідності межі по Ярусу III неідентичного двигуна (наприклад, внаслідок того, що він вимагає надмірно великих - у порівнянні з місткістю паливних танків - ємностей для заливки сечовини, або внаслідок того, що система СКВ не призведе до збільшення ваги/габаритів двигуна на невиправдано високий відсоток).

Між двигунами, що відповідають вимогам Ярусів III і II, можуть існувати відмінності, які не повинні впливати на визначення того, чи повинен неідентичний двигун, що замінює, відповідати межі по Ярусу III, такі як:

- .1 гарантійний період або очікуваний термін експлуатації;
- .2 вартість;
- .3 час між розміщенням замовлення і постачанням готового виробу.

Судновласник повинен надати Регістру докази того, що двигун, що відповідає вимогам Ярусу III, не може бути встановлений, і повідомити, що саме перешкоджає монтажу такого двигуна. Судновласник повинен надати документи, зібрані в ході пошуку двигуна, що відповідає вимогам Ярусу III, і роз'яснити, чому найбільш близький з наявних за розмірами і робочими характеристиками двигун, що відповідає вимогам Ярусу III, не підходить для даного судна. У ході пошуку повинні бути розглянуті двигуни, що випускаються іншими виробниками, ніж виробник двигуна, що замінюється. Ця документація має бути належним

чином затверджена Адміністрацією і повинна зберігатися разом зі Свідоцтвом ЕІАРР на двигун, що замінює.

Стандарт «Ярус І». Експлуатація суднового дизельного двигуна, який установлений на судні, побудованому 1 січня 2000 року або після цієї дати і до 1 січня 2011 року, забороняється, за винятком випадків, коли викид окислів азоту (розрахований як повний зважений викид NO_2) із двигуна перебуває в наступних межах, де n – номінальна частота обертання двигуна (оберти колінчастого валу за хвилину):

- .1 17,0 г/кВт·год якщо n менше 130об/хв;
- .2 $45,0 \cdot n^{(-0,2)}$ г/кВт·год якщо n , рівне або більше 130 об/хв, але менше 2000об/хв;
- .3 9,8 г/кВт·год якщо n , рівне або більше 2000об/хв.

Стандарт «Ярус ІІ». Експлуатація суднового дизельного двигуна, який установлений на судні, побудованому 1 січня 2011 року або після цієї дати, забороняється, за винятком випадків, коли викид окислів азоту (розрахований як повний зважений викид NO_2) із двигуна перебуває в наступних межах, де n – номінальна частота обертання двигуна (оберти колінчастого валу за хвилину):

- .1 14,4 г/кВт·год, якщо n менше 130об/хв;
- .2 $44 \cdot n^{(-0,23)}$ г/кВт·год, якщо n , рівне або більше 130об/хв, але менше 2000об/хв;
- .3 7,7 / г/кВт·год, якщо n , рівне або більше 2000об/хв.

Стандарт «Ярус ІІІ». Експлуатація суднового дизельного двигуна, який установлений на судні:

.1 забороняється, за винятком випадків, коли викид окислів азоту (розрахований як повний зважений викид NO_2) із двигуна перебуває в наступних межах, де n – номінальна частота обертання двигуна (оберти колінчастого валу за хвилину):

- .1.1 3,4 г/кВт·год, якщо n менше 130об/хв;
- .1.2 $9 \cdot n^{(-0,2)}$ г/кВт·год, якщо n , рівне або більше 130об/хв, але менше 2000об/хв;

.1.3 2,0 г/кВт·год якщо n , рівне або більше 2000об/хв., якщо:

.2 дане судно знаходиться на етапі побудови: 1 січня 2016 року або після цієї дати і яке експлуатується в Північноамериканському районі контролю викидів або районі контролю викидів в Карибському морі Сполучених штатів; 1 січня 2021 року або після цієї дати і яке експлуатується в районі контролю викидів Балтійського моря або в районі контролю викидів Північного моря;

.3 дане судно експлуатується в районі контролю викидів NO_x за Ярусом III і такому, що відрізняється від району контролю викидів, і побудоване в дату або після дати затвердження такого району контролю викидів, або більш пізню дату, як може бути указано в поправці, згідно з якою призначається район контролю викидів NO_x за Ярусом III, залежно від того, яка із них наступить пізніше.

Викладені вимоги не застосовуються до:

.1 суднового дизельного двигуна, встановленого на судні довжиною (L) менше 24 метрів, якщо воно спеціально спроектоване і використовується винятково з метою відпочинку;

.2 суднового дизельного двигуна, встановленого на судні, загальна номінальна потужність дизельних двигунів якого становить менше 750 кВт, якщо для задоволення Регістру продемонстровано, що судно не може відповідати стандартам, через проектні або конструктивні обмеження судна;

.3 суднового дизельного двигуна, встановленого на побудованому до 1 січня 2021 року судні валовою місткістю менше 500 і довжиною (L) 24 метри та більше, якщо воно спеціально спроектоване і використовується винятково з метою відпочинку.

У разі суднового дизельного двигуна, встановленого на судні, яке знаходиться на судновій верфі або судноремонтному підприємстві, розташованих в районі контролю викидів NO_x за Ярусом III, стандарти викидів NO_x за Ярусом III тимчасово не застосовуються у випадках і за умов, зазначених у Правилі 13 Додатку VI до Конвенції МАРПОЛ (резолюція ІМО МЕРС.286(71)) «Поправки до Додатку VI до Конвенції МАРПОЛ (Призначення Балтійського і Північного морів, як районів контролю викидів NO_x за Ярусом III.).

Районом контролю викидів NO_x за Ярусом III є будь-який морський район, включаючи будь-який портовий район, визначений Організацією відповідно до критеріїв і процедур, викладених в Доповненні III до Додатку VI до Конвенції МАРПОЛ. Районами контролю викидів NO_x за Ярусом III є:

.1 Північноамериканський район контролю викидів, який означає район, позначений координатами, вказаними в Доповненні VII до Додатку VI до Конвенції МАРПОЛ;

.2 район контролю викидів Карибського моря Сполучених Штатів, який означає район, визначений координатами, зазначеними в Доповненні VII до Додатку VI до Конвенції МАРПОЛ;

.3 район контролю викидів Балтійського моря, який визначений Правилom 1.11.2 Додатку I до Конвенції МАРПОЛ;

.4 район контролю викидів Північного моря, який визначений Правилom 1.14.6 Додатку V до Конвенції МАРПОЛ.

Незважаючи на положення, судновий дизельний двигун номінальною потужністю більше 5000кВт і з об'ємом циліндра, що становить 90 літрів чи більше, установлений на судні, побудованому 1 січня 1990 року або після цієї дати, але до 1 січня 2000 року, відповідає межах викидів за умови, що Адміністрація Сторони сертифікувала схвалений засіб для цього двигуна і Адміністрація, що сертифікувала, надала Організації повідомлення про цю сертифікацію з застосуванням Керівництва 2014 року, прийнятого резолюцією МЕРС.242(66). Відповідність повинна бути підтверджена за допомогою одного із наступних варіантів:

.1 установкою сертифікованого схваленого засобу, з застосуванням «Керівництва 2014 року з процедури застосування схваленого засобу», прийнятого резолюцією МЕРС.243(66) та відповідно до нього підтвердження, оглядом з використанням процедури перевірки, зазначеної в документації схваленого засобу, включаючи відповідну вказівку в судовому Свідоцтві IAPP на наявність схваленого засобу;

.2 сертифікацією двигуна, яка підтверджує, що він експлуатується в межах, викладених Стандарту Ярус I, Стандарту Ярус II чи Стандарту Ярус III, і відповідної вказівки на сертифікацію двигуна в судовому Свідоцтві IAPP.

Експлуатація судового дизельного двигуна забороняється, за винятком випадків, коли викид окислів азоту (розрахований як повний зважений викид NO_2) із двигуна перебуває в наступних межах, де n – номінальна частота обертання двигуна (оберти колінчастого валу за хвилину):

- .1 17,0г/кВт·год якщо n менше 130 об/хв;
- .2 $45,0 \cdot n^{(-0,2)}$ г/кВт·год якщо n , рівне чи більше 130об/хв, але менше 2000об/хв;
- .3 9,8г/кВт·год якщо n , рівне чи більше 2000об/хв.

Сертифікація схваленого засобу включає перевірку:

.1 проектантом базового судового дизельного двигуна, до якого застосовується схвалений засіб, того, що розрахунковий ефект схваленого засобу зменшить потужність двигуна не більше ніж на 1,0%, підвищить споживання палива не більше ніж на 2,0%, як це обмірювано у відповідності з належним випробним циклом, викладеним у переглянutoму Технічному кодексі по NO_x 2008 року, або не зробить негативного впливу на зносостійкість або надійність двигуна;

.2 того, що вартість схваленого засобу не є надмірною, що визначається шляхом порівняння кількості NO_x , скороченого за допомогою схваленого засобу для досягнення стандарту і витрат на придбання і установаження такого схваленого засобу (визначається формулою ефективності згідно з циркуляром ІМО МЕРС.1/Circ.678). Вартість схваленого засобу (BC3/Cost Approved Method) - не повинна перевищувати 375 одиниць спеціальних прав запозичення на метричну тону NO_x , розрахованих за формулою витратіефективність (Be), наведеною нижче:

$$Be = BC3 \cdot 10^6 / (P \cdot 0,768 \cdot 6000(\text{год} / \text{рік}) \cdot 5(\text{років}) \cdot \Delta NO_x)$$

де ΔNO_x – різниця між специфікаційним повним зваженим викидом NO_x із двигуна і застосовним граничним зваженим викидом NO_2 із двигуна, г/кВт·год; P – нормальна потужність двигуна, як вона визначена для схваленого засобу, кВт; ВСЗ – вартість схваленого засобу плюс вартість монтажу і технічного обслуговування в експлуатації.

3.3 Окисли сірки і тверді частки

Згідно з Правилем 14.1 Додатку VI до Конвенції МАРПОЛ вміст сірки в будь-якому рідкому паливі, яке використовується на судні, не повинен перевищувати 0,50% за масою з 1 січня 2020 року і після цієї дати (згідно з резолюцією МЕРС.305(73) поправки вступають в силу 01.03.2020 року).

З 1 березня 2020 року вміст сірки у рідкому паливі, яке використовується або перевозиться для використання на судні, не повинне перевищувати 0,50% за масою. Вимога заборони на перевезення невідповідного палива застосовується також до палива для суднового обладнання, призначеного для використання виключно в аварійних ситуаціях (згідно з резолюцією МЕРС.305(73) поправки вступають в силу 01.03.2020 року). При цьому застосовується «Керівництво 2019 року з послідовного дотримання обмеження вмісту сірки на рівні 0,50% згідно з Додатком VI до Конвенції МАРПОЛ», прийняте резолюцією МЕРС.320(74).

Світовий вміст сірки в залишковому рідкому паливі, яке поставляється для використання на судах, контролюється з урахуванням керівництва, розробленого Організацією. Під рідким паливом тут мається на увазі залишкове або дистилятне паливо, що поставляється і використовується на судах для цілей згоряння і яке, відповідно до стандарту ISO 8217, має кінематичну в'язкість при 40°C:

- залишкове паливо - більш або рівну 11,00 сантистокса (мм²/с);
- дистилятне паливо - менше 11,00 сантистокса (мм²/с).

Районом контролю викидів є будь-який морський район, включаючи будь-який портовий район, визначений Організацією відповідно до критеріїв і процедур, викладених в Доповненні III до Додатку VI до Конвенції МАРПОЛ. Районами контролю викидів згідно з цим правилом є:

.1 район Балтійського моря, як він визначений в Правилі 1.11.2 Додатку I до Конвенції МАРПОЛ;

.2 район Північного моря, як він визначений в Правилі 1.14.6 Додатку V до Конвенції МАРПОЛ;

.3 Північноамериканський район контролю викидів, який означає район, позначений координатами, вказаними в Доповненні VII до Додатку VI до Конвенції МАРПОЛ; і .4 район контролю викидів Карибського моря Сполучених Штатів, який означає район, позначений координатами, вказаними в Доповненні VII до Додатку VI до Конвенції МАРПОЛ.

Згідно з Правилем 14.4 Додатку VI до Конвенції МАРПОЛ при експлуатації суден в районі контролю викидів SO_x , вміст сірки в рідкому паливі, яке використовується на цих суднах, не повинен перевищувати 0,10% за масою. (згідно з резолюцією МЕРС.305(73), поправки вступають в силу 01.03.2020 року).

Вміст сірки в рідкому паливі повинний документуватися його постачальником. На суднах, що використовують інші види палива, які заходять в який-небудь район контролю викидів або виходять із нього, повинна бути письмова процедура, що показує, яким чином повинна виконуватися операція по зміні складу палива, передбачаючи достатній час для того, щоб до входу в район контролю викидів система подачі рідкого палива була повністю промита від усіх видів рідкого палива із вмістом сірки, який перевищує застосовну величину. Об'єм низькосірчистого рідкого палива в кожному танку, а також дата, час і місцезнаходження судна в момент завершення будь-якої операції по зміні складу рідкого палива до входу в район контролю викидів або в момент початку такої операції після виходу із цього району, повинні реєструватися в судовому журналі або в електронному журналі операцій, приписаних Адміністрацією.

Система (агрегат) очищення відпрацьованих газів (СОВГ) може застосовуватися, як еквівалент. При цьому система (агрегат) СОВГ повинна відповідати положенням Керівництва 2015 року щодо систем очищення відпрацьованих газів, прийнятого резолюцією МЕРС.259(68), бути схвалена Регістром, а на судно повинен бути виданий, схвалений Регістром, План

відповідності викидів SOx. Про застосування на судні указанного еквівалента Регістр інформує Адміністрацію.

3.4 Летучі органічні сполуки

Кожний танкер, який здійснює рейси в порти або термінали, де регулюються викиди летучих органічних сполук (ЛОС), повинний бути забезпечений системою збирання викидів пари, схваленою Регістром з урахуванням стандартів безпеки для таких систем і використовувати цю систему під час навантаження відповідних вантажів (циркуляр MSC/Circ.585 «Стандарти для систем контролю викидів пари»). Порт або термінал, де установлені системи контролю викидів пари у відповідності з положеннями цього підрозділу, можуть приймати танкери, які не обладнані системами збирання пари, протягом трьох років після дати вступу в силу контролю.

На танкері, що перевозить сиру нафту, повинний бути і виконуватися План керування викидом ЛОС, схвалений Регістром. Такий план підготовлюється з урахуванням керівництва, розробленого Організацією (резолюція МЕРС.185(59): «Керівництво по розробці плану керування викидом летучих органічних сполук (ЛОС)», циркуляр МЕРС.1/Circ.680 «Технічна інформація по системах і процесах для допомоги в розробці плану керування викидом летучих органічних сполук (ЛОС)»).

План є конкретним для кожного судна і принаймні повинний:

- .1 містити письмові процедури по зведенню до мінімуму викидів ЛОС під час навантаження, морського рейсу і вивантаження вантажу;
- .2 урахувати додаткові ЛОС, що утворюються в результаті миття сирою нафтою;
- .3 містити вказівку на особу, що відповідає за виконання плану;
- .4 у відношенні суден, які здійснюють міжнародні рейси, складатися на робочій мові капітана і осіб командного складу та включати переклад на англійську мову.

Вимоги цього підрозділу повинні застосовуватися також до газовозів тільки в тому випадку, якщо тип вантажної системи і системи місткостей допускають безпечне зберігання на судні неметанових ЛОС або їх безпечне передавання на берег (резолюція MSC.30(61) «Міжнародний кодекс побудови і обладнання суден, що перевозять скраплені гази наливом», глава 5).

ВИСНОВКИ

1. В якості електричної машини, що входить до складу асинхронізованої машини може використовуватися асинхронна машина з фазним ротором як серійного виготовлення, так і спеціально спроектована.
2. Для опису перехідних процесів машини використовують рівняння Парка - Горєва. Ці рівняння записані для ідеальної машини, в якій відсутні втрати в сталі, а також нелінійні магнітні явища, не враховуються гістерезис, вищі гармонійні у складі магнітного поля.
3. До складу асинхронізованої машини окрім електричної машини входять збудник і автоматичний регулятор збудження, що утворюють систему автоматичного керування машиною.
4. Якщо машина працює генератором, то при $s_0 < 0$ область стійкості буде рости, а при $s_0 > 0$ зменшуватися. При певному значенні ковзання $s_0 < 0$ можна забезпечити стійку роботу на межі пропускної здатності лінії. При $s_0 = 0$ у машини, працюючої в узагальненому синхронному режимі (так само як і при роботі в узагальненому асинхронному режимі), теоретично можливо забезпечення стійкості необхідного усталеного режиму без застосування засобів компенсації інерційності ротора.
5. Асинхронізовані генератори можуть бути технічно і економічно доцільні не лише для традиційних теплових і гідравлічних електростанцій середньої і великої потужності, але і для вітроелектричних установок, деяких типів малих ГЭС. Крім того, асинхронізовані машини можуть ефективно використовуватися для роботи в режимах як генератора, так і двигуна для оборотних агрегатів гідроакумуючих електростанцій і приливних електростанцій, а також в так званих асинхронізованих електромеханічних перетворювачах частоти для гнучкого зв'язку між електричними мережами.
6. Використання асинхронізованого синхронного генератора з огляду на проведений аналіз дозволяє говорити про доцільність його використання в якості

валогенератора. Застосування валогенераторів дозволяє значно заощаджувати паливо (до 30 %), збільшувати моторесурс допоміжних дизельних установок, робити суднову енергосистему більш гнучкою й економічною. Однак, існує проблема підтримки частоти вихідної напруги на заданому рівні.

7. Запропоновано використовувати в якості валогенератора безщітковий асинхронізований синхронний генератор. На його валові розташовується симетрична трифазна обмотка збудження, що одержує живлення від джерела трифазної напруги перемінної амплітуди і частоти. Частота регулюється таким чином, щоб щодо обмотки статора поле збудження завжди оберталося з однією і тією ж частотою. У результаті частота вихідної напруги завжди буде підтримуватись постійною незалежно від частоти обертання вала.

8. Розглянуті раніше запропоновані конструктивні рішення реалізації безщіткового асинхронізованого синхронного генератора. Вони відрізняються тим що в одній пропонувалося використовувати дві машини постійного струму, в іншій використання двох магнітних систем, що розташовуються одна над одною відносно осі обертання. В наступній системі використовувалася машина з трифазною обмоткою статора та ротора та ланцюгом між ними, в який входять випрямляч та інвертор. В останній системі використовувалася машина в якій замість щіткового апарату додатково встановлений збудник з трифазними обмотками ротора і статора. Але в існуючих моделях присутні конструктивні недоліки, які погіршують масогабаритні показники.

9. Пропонована конструкція, яка представлена в даній роботі, складається з двох машин (збудника та генератора), системи управління, перетворювача частоти та вузла визначення різниці заданої частоти від частоти обертання ротора машини. Збудник та генератор об'єднані єдиною магнітною системою. Для забезпечення магнітної розв'язки обмоток обох машин число пар полюсів збудника було узятو в 2 рази більше ніж число пар полюсів синхронного генератора.

10. Побудована в середовищі MathLAB модель безщіткового асинхронізованого синхронного генератора, проаналізувавши яку, отримали

графіки вихідних характеристик, з яких видно, що на виході напруга підтримується з постійною частотою.

11. Розглянуто та розраховано конструкцію системи управління тиристорами інвертора. В роботі запропонована конструкція датчика різниці частоти, який складається з наступних елементів: феромагнітного диска, який розташований на одному роторі з генератором; датчиків Холлу, які встановлені на диску; магнітопроводу із розподіленою трифазною обмоткою, на яку подається сигнал від джерела фіксованої частоти.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ботвинник М. М. Управляемая машина переменного тока. [Текст] / М. М. Ботвинник, Ю. Г. Шакарян – Л.: Наука, 1969. – 140 с.
2. Ботвинник М. М. Асинхронизированная синхронная машина. [Текст] / М. М. Ботвинник – Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 70 с.
3. Шакарян Ю. Г. Асинхронизированные синхронные машины. [Текст] / Ю. Г. Шакарян – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 192 с.
4. Лабунец И. А. Установившиеся режимы работы асинхронизированных турбогенераторов. [Текст] // И. А. Лабунец, Ю. Г. Шакарян, А. П. Лохматов – Электричество. – 1981. – №3. – С. 23-28.
5. Шакарян Ю. Г. Синтез функций регулирования асинхронизированных синхронных машин с использованием теории инвариантности. [Текст] // Ю. Г. Шакарян, Т. В. Плотникова. – Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1980. – №3. – С. 118-126.
6. А. с. 523501 СССР. Устройство управления асинхронизированной машиной с фазным ротором/ М. М. Ботвинник, Н. Н. Блоцкий, Ю. Г. Шакарян. Оpubл. в Б. И. 1976. №28.
7. Лабунец И. А. Дифференциальные уравнения бесконтактной асинхронизированной синхронной машины. [Текст] // И. А. Лабунец, Л. Я. Шапиро. – Известие вузов. Энергетика и транспорт. – 1980. – №6. – С 68-76.
8. Шакарян Ю. Г. О режимах работы мощных асинхронизированных машин. [Текст] // Ю. Г. Шакарян, Р. С. Цгоев, Л. А. Суханов. – Электричество. – 1980. – №7. – С. 61-64.
9. Кабанов П. С. Режимы работы, статические и динамические характеристики асинхронизированных (АС) турбогенераторов. [Текст] // П. С. Кабанов, Л. Г. Мамиконянц, Ю. Г. Шакарян. – Электрические станции. 1983. – №10. – С. 41-45.
10. Осин И. Л. Электрические машины: Синхронные машины: Учеб. пособие для вузов по спец. Электромеханика/ Под ред. И. П. Копылова. [Текст] / И. Л. Осин, Ю. Г. Шакарян. – М.: Высш. шк., 1990. – 304 с.

11. А.с. RU 55516 U1 РФ. Устройство бесконтактного возбуждения асинхронизированных синхронных генераторов [Текст] / А.Ю. Злобин – заявка 2005139289/22; заявл. 15.12.2005; опубл. 10.08.2006, Бюл. №22

12. А.с. RU 66635 U1 РФ. Асинхронизированный синхронный генератор [Текст] / Ганджа С.А. – заявка 2007112437/22; заявл. 03.04.2007; опубл. 10.09.2007, Бюл. №25

13. А.с. RU 151665 U1 РФ. Асинхронизированный синхронный генератор [Текст] /В.Г. Еременко, А.В. Берилов, Нгуен Хын Нам – заявка 2014138373/07; заявл. 23.09.2014; опубл. 10.04.2015, Бюл. №10

14. А.с. RU 55733 U1 РФ. Асинхронизированный синхронный генератор [Текст] /С.А. Панкратов, В.С. Богомоллов, Е.В. Афанасьева – заявка 2006114724/22; заявл. 28.04.2006; опубл. 27.08.2006, Бюл. №24

15. Зархи М. И. Промышленные испытания асинхронизированного генератора мощностью 50 МВА. [Текст] / М. И. Зархи. Электричество. 1973. №4. – С. 52-54.

16. Блоцкий Н.Н. Исследование и применение асинхронизированных машин в энергетических системах. [Текст] // Н.Н. Блоцкий, Л.Г. Мамиконяиц, Ю.Г. Шакария. – Электричество. – 1985. – № 12. – С. 2-8.

17. Радин В.И. Управляемые электрические генераторы при переменной частоте. [Текст] / В.И. Радин, А.Е. Загорский, Ю.Г. Шакарян. – М.: Энергия, 1978. – 152 с.