

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики і електротехніки

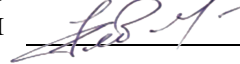
(повне найменування інституту, назва факультету)

Кафедра програмованої електроніки, електротехніки і телекомунікацій

(повна назва кафедри)

«Допущений до захисту»

Завідувач кафедри



В. М. Рябенський

д.т.н., професор

« 16 » червня 2025 р.

Кваліфікаційна робота

на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

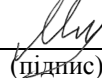
на тему:

**Розробка моделі автоматичного синхронізатора
для точної синхронізації малопотужного синхронного
генератора з системою електропостачання**

Виконав: студент

4321

групи


(підпис)

П.С. Мальованний

Керівник роботи:

старший викладач каф. ПЕЕТ

(посада, науковий ступінь, вчене звання)


(підпис)

В.С. Буряк

м. Миколаїв – 2025 року

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки

Кафедра	програмованої електроніки, електротехніки і телекомунікацій
Спеціальність	171 «Електроніка»
Освітня програма	Електронні системи

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Гарант освітньої програми

 О. С. Дьяконов
(підпис)

« 14 » квітня 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр» (освітньо-кваліфікаційний рівень)

Студенту Мальованному Павлу Сергійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка моделі автоматичного синхронізатора для точної синхронізації малопотужного синхронного генератора з системою електропостачання

керівник роботи Буряк Володимир, старший викладач каф. ПЕЕТ
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ректора № УЧ-343 від «23» квітня 2025 року.

2. Термін подання роботи: «10» червня 2025 року

3. Вихідні дані по роботі: синхронний генератор; засоби автоматичної точної синхронізації синхронних генераторів; комп'ютерне моделювання.

4. Перелік питань, що належать до розробки (найменування розділів) Зробити аналітичний огляд існуючих схемних рішень для забезпечення точної синхронізації малопотужних синхронних генераторів; виконати комп'ютерне моделювання в пакеті Matlab/Simulink; розглянути проблеми охорони праці.

5. Перелік презентаційних матеріалів - Цілі та завдання кваліфікаційної роботи;
- Умови синхронізації синхронних генераторів; - Способи синхронізації синхронних генераторів; - Схеми існуючих рішень; - Модель включення синхронного генератора на паралельну роботу з енергосистемою; - Модель управління синхронізацією генератора; - Результати моделювання; - Висновки

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Тубальцев А. М.		

7. Дата видачі завдання «24» квітня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

[illegible]

Студент

Керівник роботи

(підпис)

П.С. Мальованный

(прізвище та ініціали)

В.С. Буряк

(прізвище та ініціали)

Анотація

У кваліфікаційній роботі «Розробка моделі автоматичного синхронізатора для точної синхронізації малопотужного синхронного генератора з системою електропостачання» розглянуті методи та засоби включення синхронних генераторів на паралельну роботу з мережею і створена відповідна модель. Запропоновано метод визначення моменту подачі команди на включення магнітного пускача, що забезпечує точну синхронізацію синхронного генератора, з урахуванням часу включення. Працездатність методу перевірено шляхом моделювання процесу включення синхронного генератора у програмному пакеті Matlab/Simulink з використанням бібліотеки SimPowerSystems. Розроблено систему управління на підставі запропонованого методу, підтверджено ефективність його роботи.

Ключові слова: *синхронна машина постійного струму, синхронний генератор постійного струму, синхронізація, автоматична точна синхронізація, комп'ютерне моделювання*

Abstract

In the qualifying work "Development of an automatic synchronizer model for precise synchronization of a low-power synchronous generator with the power supply system" the methods and means of including synchronous generators for parallel operation with the network were considered and a corresponding model was created. A method for determining the moment of command to turn on the magnetic starter, which provides accurate synchronization of the synchronous generator, taking into account the time of inclusion. The efficiency of the method was verified by modeling the process of including a synchronous generator in the Matlab/Simulink software package using the SimPowerSystems library. The control system on the basis of the offered method is developed and efficiency of its work is confirmed.

Keywords: *synchronous DC machine, synchronous DC generator, synchronization, automatic precision synchronization, computer simulation*

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ	5
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД	8
1.1. Теоретичні основи синхронізації синхронних генераторів.....	10
1.2. Принцип роботи синхронних генераторів	11
1.3. Умови синхронізації генератора з мережею	12
1.4. Способи синхронізації синхронних генераторів з мережею.....	14
РОЗДІЛ 2. ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ	17
2.1. Огляд існуючих рішень	19
2.2. Ручні системи синхронізації синхронних генераторів	20
2.3. Напівавтоматичні системи синхронізації синхронних генера- торів	21
2.4. Автоматизовані системи синхронізації синхронних генерато- рів	25
2.5. Інтегровані рішення автоматичної синхронізації на базі PLC, IED та SCADA.....	27
2.6. Існуючі системи автоматичної синхронізації	30
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СИСТЕМИ СИНХРОНІ- ЗАЦІЇ	42
3.1. Дослідження процесу точної синхронізації	44
3.2. Модель включення синхронного генератора на паралельну роботу з системою електропостачання.....	50
3.3. Модель системи управління	56
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ	71
4.1. Аналіз небезпечних та шкідливих факторів, впливаючих на людину	72
4.2. Види електричних травм.....	75
4.3. Фактори, що впливають на наслідки ураження струмом.....	76
4.4. Розрахунок захисного заземлення	77

4.5. Системи засобів і заходів безпечної експлуатації електроустановок	80
4.6. Система електрозахисних засобів	81
Висновки	89
Список використаних джерел	90
Додаток А	91
Додаток Б	94

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

AC – *Alternating Current* – змінний струм

DC – *Direct Current* – постійний струм

EPC – електрорушійна сила

PLC – *Programmable Logic Controller* – програмований логічний контролер.

IED – *Intelligent Electronic Device* – інтелектуальний електронний пристрій захисту та автоматики

SCADA – *Supervisory Control And Data Acquisition* – система диспетчерського керування та збору даних

DCS – *Distributed Control System* – розподілена система керування

GPS – *Global Positioning System* – глобальна система позиціонування

OPC UA – *Open Platform Communications Unified Architecture* – уніфікована архітектура відкритої платформи обміну даними

IEC – *International Electrotechnical Commission* – Міжнародна електротехнічна комісія

ERP – *Enterprise Resource Planning* – система планування ресурсів підприємства.

EMS – *Energy Management System* – система керування енергоспоживанням

ТЕС – теплоелектростанція

ГЕС – гідроелектростанція

ТЕЦ – теплоелектроцентрально

ВДЕ – відновлювані джерела енергії

					171.4321.КР.ПЗ.Скорочення	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

ВСТУП

Зазвичай на електростанціях встановлюють декілька синхронних генераторів для паралельної роботи на загальне навантаження. Це дозволяє збільшити загальну потужність електростанції (при обмеженій потужності кожного з встановлених на ній генераторів), значно підвищує надійність енергопостачання споживачів і дозволяє краще організувати обслуговування агрегатів. Електричні станції, в свою чергу, об'єднують для паралельної роботи в потужні енергосистеми, що дозволяє найкращим чином вирішувати завдання виробництва і розподілу електричної енергії із забезпеченням її якості.

У будь-якій системі електропостачання навантаження не є постійним, а змінюється у часі, причому в певний період часу навантаження має пікове значення. Тому при експлуатації будь-якої енергосистеми необхідно забезпечувати регулювання потужності виробленої електроенергії для забезпечення балансу енергії в рамках енергосистеми. При недостатньому регулюванні частота в системі відхилятиметься від номінальної, а напруга у вузлах енергосистеми може вийти за допустимі для безпечної експлуатації межі, що може призвести до виходу з ладу елементів електрообладнання.

Регулювання генерованої в енергосистему потужності здійснюється не тільки зміною рівня потужності, що віддається генератором у систему, але й включенням і вимиканням генераторів. Особливо це характерно для невеликих енергосистем, а також для окремих зон енергосистеми, які з'єднані з основною енергосистемою лініями електропередач недостатньої потужності.

У зв'язку з цим актуальною є задача забезпечення надійного та безпечного запуску генераторів та їх підключення до діючої енергосистеми. Велика частина діючих генераторів виконана у вигляді синхронних машин, що вимагає виконання певних технологічних процедур при запуску, а саме процедур синхронізації, а ці операції для свого виконання вимагають певного часу.

					171.4321.КР.ПЗ.Р1	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Якщо генератор вводиться у систему через брак активної потужності в енергосистемі, то бажано скоротити час включення і синхронізації генератора, це зменшує ризик переходу режиму роботи системи у нестійкий режим.

Крім цього, скорочується час роботи енергосистеми з напругою і частотою нижче номінальних. Скорочення часу запуску також забезпечує економію енергоресурсів, що витрачаються на роботу генератора по суті на холостому ходу. моментом. ручні методи.

					171.4321.КР.ПЗ.Р1	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

					171.4321.КР.ПЗ.Р1				
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата					
Розробник		Мальований П. С.			АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД	Літ.	Арк.	Аркушів	
Консультант								9	
Н. контр.		Добрінова Л. П.				НУК імені адмірала Макарова			
Керівник		Буряк В. С.							
Зав. каф.		Рябенський В. М.							

Розділ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1. Теоретичні основи синхронізації синхронних генераторів

У системах електропостачання змінного струму (АС) процес синхронізації передбачає узгодження частоти, фазового кута та амплітуди напруги генератора або іншого джерела енергії з відповідними параметрами електричної мережі, що забезпечує стійку та безпечну передачу електроенергії. З'єднання незалежних сегментів енергосистеми без досягнення синхронного режиму є неприпустимим, оскільки це може призвести до виникнення перехідних процесів і аварійних режимів.

На відміну від генераторів постійного струму (DC), які допускають підключення до мережі шляхом регулювання вихідної напруги за допомогою зміни швидкості обертання або збудження, генератори змінного струму потребують додаткового узгодження частоти та фази вихідної напруги з параметрами енергосистеми. Це зумовлює необхідність точного керування як механічною швидкістю обертання ротора, так і параметрами електромагнітного збудження. Ця особливість історично була однією з ключових аргументів противників змінного струму під час так званої «війни струмів» у 1880-х роках. У сучасних енергосистемах процес синхронізації зазвичай виконується автоматизованими системами.

Перед здійсненням підключення генератора до мережі мають бути дотримані п'ять основних умов. Генератор (або підмережа), що приєднується, повинен відповідати таким параметрам енергосистеми:

1. рівень середньоквадратичної (ефективної) напруги;
2. частота;
3. послідовність чергування фаз;
4. фазовий кут;
5. форма кривої напруги (синусоїдальна форма сигналу).

Форма сигналу та послідовність фаз обумовлюються конструктивними характеристиками генератора та схемою його підключення. На етапі введен-

					171.4321.КР.ПЗ.Р1	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

ня генератора в експлуатацію здійснюється ретельна перевірка правильності підключення обмоток статора і вторинних кіл керування для забезпечення відповідності порядку фаз параметрам енергосистеми. Порушення цієї вимоги може призвести до значних циркулюючих струмів, що, у свою чергу, спричиняє аварійні стани через протилежний напрямок фазових напруг генератора і мережі.

При кожному підключенні генератора до мережі здійснюється обов'язковий контроль таких параметрів, як напруга, частота і фазовий кут.

Генератори, які працюють у складі енергосистеми, зазвичай оснащуються регуляторами із характеристикою падіння швидкості (droop control), що забезпечує автоматичний розподіл навантаження пропорційно номінальній потужності агрегатів. В окремих випадках, зокрема в автономних або ізолюваних системах, застосовується ізохронне регулювання частоти, яке дозволяє підтримувати стабільну частоту незалежно від змін навантаження.

Послідовність операцій при ручній або автоматизованій синхронізації має загальні принципи. Спершу генератор розганяється до швидкості, близької до синхронної, шляхом збільшення подачі механічної енергії на вал, зокрема – шляхом відкриття регулюючих органів парових чи гідротурбін або підвищення подачі палива у випадку дизельного двигуна. Після досягнення необхідної швидкості активується система збудження, а вихідна напруга генератора постійно контролюється та порівнюється з параметрами мережі. Величина напруги генератора повинна відповідати рівню напруги системи.

При незначному фазовому зсуві синхронізація відбувається поступово та без виникнення суттєвих перехідних процесів. Водночас значна різниця фазових кутів у момент підключення може призвести до виникнення значних перехресних струмів, що зумовлюють коливання напруги та, у крайніх випадках, пошкодження електромашинного обладнання.

					171.4321.KP.ПЗ.Р1	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

1.2. Принцип роботи синхронних генераторів

Синхронний генератор (або альтернатор) – це електрична машина, яка перетворює механічну енергію обертального руху у електричну енергію змінного струму. Принцип дії синхронного генератора ґрунтується на явищі електромагнітної індукції, відкритому М. Фарадеєм у 1831 році: при зміні магнітного потоку, що пронизує замкнений провідниковий контур, у цьому контурі індукується електрорушійна сила (ЕРС).

Конструктивно синхронний генератор складається з двох основних частин:

- ротор – обертовий магнітний елемент, що створює магнітне поле;
- статор – нерухома частина з обмоткою, в якій індукується електрорушійна сила.

Ротор оснащений електромагнітною або постійною системою збудження, яка створює магнітне поле. При обертанні ротора це магнітне поле перетинає провідники трифазної обмотки статора. Згідно із законом Фарадея, зміна магнітного потоку через обмотки статора зумовлює виникнення синусоїдальної електрорушійної сили, а відтак і струму у зовнішньому електричному колі.

Частота змінної напруги, що генерується, визначається швидкістю обертання ротора і кількістю пар полюсів машини за виразом:

$$f = \frac{p \times n}{60}$$

де f – частота змінного струму (Гц), p – кількість пар полюсів ротора, n – механічна швидкість обертання ротора (об/хв).

Для роботи в режимі синхронізму швидкість обертання ротора повинна бути сталою і пропорційною частоті мережі. Саме тому машина й дістала назву *синхронний генератор*.

Робочий процес синхронного генератора можна описати такими основними етапами:

					171.4321.КР.ПЗ.Р1	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

1. Створення магнітного поля. Збудження ротора здійснюється постійним струмом, що подається через контактні кільця або за допомогою безконтактних систем (індукторного типу).

2. Обертання ротора. Механічна енергія, яку передає турбіна (парова, газова, гідравлічна або інший привід), змушує ротор обертатися зі сталою швидкістю.

3. Індукція ЕРС. Магнітне поле, що створюється ротором, обертається відносно обмоток статора. В результаті у кожній фазі обмотки індукується синусоїдальна ЕРС, зсунута по фазі на 120° між фазами.

4. Відбір електричної енергії. Струм, що генерується у статорній обмотці, передається у зовнішню трифазну мережу для споживання.

Стабільна робота синхронного генератора забезпечується за рахунок підтримання рівноваги між електромагнітним моментом, що розвивається машиною, і механічним моментом приводу. Відхилення від синхронної швидкості призводить до розбалансування фазового зсуву, що може призвести до втрати синхронізму.

Серед основних переваг синхронних генераторів слід відзначити:

- високу стабільність частоти вихідної напруги;
- можливість регулювання коефіцієнта потужності за рахунок зміни збудження;
- високу ефективність при експлуатації у складі енергосистеми.

1.3. Умови синхронізації генератора з мережею

Синхронізація генератора із зовнішньою електричною мережею – це процес узгодження його електричних параметрів із параметрами мережі для забезпечення безпечного і стійкого ввімкнення в спільну енергосистему. Порушення умов синхронізації може призвести до виникнення аварійних режимів роботи як генератора, так і системи в цілому.

					171.4321.KP.ПЗ.P1	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Умови синхронізації визначаються необхідністю узгодження наступних параметрів:

- *рівень напруги*. Ефективне значення напруги на клеммах генератора має бути максимально наближеним до напруги в точці підключення до мережі (відхилення не більше $\pm 5\%$). Різка різниця напруг спричиняє протікання значних струмів у момент включення;

- *частота*. Частота напруги генератора повинна дорівнювати частоті мережі (для більшості систем – 50 Гц або 60 Гц). Відхилення частоти при синхронізації допускається не більше $\pm 0,1$ Гц. В іншому разі при включенні виникатимуть ударні перехідні процеси;

- *фазовий кут (кут синхронізації)*. Фазовий зсув між ЕРС генератора та напругою мережі має бути мінімальним (рекомендоване відхилення – не більше $\pm 10^\circ$). При значному фазовому зсуві у момент підключення з'являються великі імпульсні струми;

- *послідовність фаз*. Порядок чергування фаз генератора має повністю відповідати порядку фаз мережі. При неправильному порядку фаз можливі аварійні режими, зокрема виникнення обертових полів протилежного напрямку;

- *форма кривої напруги*. Напруга, яка генерується, повинна мати синусоїдальну форму, гармонійно узгоджену з напругою мережі. Наявність суттєвих гармонік може спричинити додаткові втрати та резонансні явища у спільній мережі.

Методи контролю та забезпечення синхронізації

У сучасних електростанціях для забезпечення точного дотримання умов синхронізації застосовуються автоматизовані системи синхронізації (Automatic Synchronizer), які здійснюють:

- автоматичний контроль частоти та швидкості обертання ротора;
- автоматичне регулювання збудження для узгодження напруги;

					171.4321.KP.ПЗ.P1	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

- вимірювання фазового кута та автоматичне керування моментом підключення;
- перевірку правильності чергування фаз.

У разі ручної синхронізації оператор виконує ті ж самі дії за допомогою індикаторів синхронізації: частотоміра, вольтметра, фазометра або ламп синхронізації.

Наслідки порушення умов синхронізації

Порушення будь-якої з вищенаведених умов при підключенні генератора до мережі може призвести до:

- протікання ударних струмів (імпульсних);
- механічних пошкоджень вала генератора;
- збоїв у системі збудження;
- перевантаження елементів електромережі;
- втрати синхронізму та аварійного вимкнення генератора.

Саме тому на всіх сучасних електростанціях синхронізація є відповідальною процедурою, що передбачає суворий технічний контроль і автоматизоване регулювання.

1.4. Способи синхронізації синхронних генераторів з мережею

Процес синхронізації синхронного генератора з електричною мережею передбачає узгодження основних електричних параметрів генератора – частоти, фазового кута, послідовності фаз та амплітуди напруги – з відповідними параметрами мережі. Це необхідно для забезпечення безаварійного підключення та подальшої стійкої роботи генератора у складі енергосистеми.

Залежно від технічного рівня обладнання електростанції, розрізняють кілька основних способів синхронізації генераторів із мережею:

Ручна синхронізація

Цей спосіб є класичним і передбачає участь оператора. Процедура синхронізації виконується за допомогою спеціальної вимірювальної апаратури:

					171.4321.KP.ПЗ.P1	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

- частотомір – для контролю частоти обертання генератора;
- вольтметр – для узгодження амплітуди напруги;
- фазометр або індикатор синхронізації (лампи синхронізації, стробоскопічний диск) – для контролю фазового зсуву.

У процесі ручної синхронізації оператор шляхом регулювання збудження генератора узгоджує амплітуду напруги, а регулюванням механічної потужності – частоту обертання ротора. Підключення здійснюється вручну у момент мінімального фазового зсуву.

Недоліком цього методу є висока залежність якості синхронізації від кваліфікації оператора та часові затримки у прийнятті рішень.

Автоматична синхронізація

Автоматична синхронізація здійснюється за допомогою систем автоматичного синхронізатора (Automatic Synchronizer). Такі системи забезпечують:

- автоматичне регулювання частоти генератора;
- автоматичне регулювання збудження для узгодження напруги;
- точний контроль фазового кута;
- автоматичне подання команди на підключення генератора у найбільш сприятливий момент.

Перевагою автоматичних систем є висока точність, швидкість та надійність синхронізації. Застосування автоматичної синхронізації особливо актуальне для великих енергоблоків, а також для систем з частими підключеннями-відключеннями генераторів.

Напіваавтоматична синхронізація

Напіваавтоматичний спосіб синхронізації передбачає використання допоміжних автоматичних пристроїв, що спрощують процедуру синхронізації, але сам момент підключення виконується оператором вручну. Наприклад, автоматичний контроль частоти і напруги може здійснюватися системою регулювання, а фазовий зсув оператор спостерігає за індикатором і виконує підключення вручну.

					171.4321.KP.ПЗ.P1	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Такий спосіб часто застосовується на об'єктах середнього рівня автоматизації або у випадках, коли потрібен додатковий контроль з боку персоналу.

Синхронізація за допомогою фазового автомату

У деяких сучасних енергосистемах застосовуються фазові автомати або фазові компаратори, які формують сигнал синхронізованого з'єднання на основі прямого порівняння фаз генератора і мережі у режимі реального часу. Це дозволяє досягти високої точності моменту підключення та мінімізувати динамічні процеси при включенні.

Фазові автомати особливо актуальні для паралельної роботи великої кількості генераторів або для підключення генераторів до слабких мереж, де стійкість системи є критичною.

Спосіб синхронізації	Точність	Швидкість	Рівень автоматизації	Залежність від людини
Ручна	Середня	Низька	Низький	Висока
Напівавтоматична	Висока	Середня	Середній	Середня
Автоматична	Дуже висока	Висока	Високий	Низька
За допомогою фазового автомату	Дуже висока	Дуже висока	Дуже високий	Дуже низька

У сучасних умовах, з урахуванням вимог до надійності та ефективності роботи енергосистем, автоматичні способи синхронізації набувають дедалі ширшого застосування, витісняючи застарілі ручні методи.

					171.4321.КР.ПЗ.Р1	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

					171.4321.КР.ПЗ.Р2			
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата				
Розробник		Мальований П. С.			ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ	Літ.	Арк.	Аркушів
Консультант							18	
Н. контр.		Добрінова Л. П.				НУК імені адмірала Макарова		
Керівник		Буряк В. С.						
Зав. каф.		Рябенський В. М.						

Розділ 2. Огляд існуючих рішень

2.1. Огляд існуючих рішень

Синхронізація синхронних генераторів з електричною мережею є одним з ключових етапів забезпечення надійної роботи енергетичних систем. Сучасні технічні рішення у цій сфері охоплюють широкий спектр апаратних і програмних засобів, що дозволяють реалізувати як ручну, так і автоматизовану синхронізацію з різними ступенями гнучкості та точності.

Ручні системи синхронізації

Найпростішим класом рішень залишаються **ручні системи синхронізації**, які передбачають використання традиційних приладів:

- частотомірів;
- фазометрів;
- вольтметрів;
- індикаторів синхронізації (лампові або електронні).

Ці рішення зазвичай застосовуються на малих або застарілих електростанціях, де ступінь автоматизації мінімальний. Основним недоліком ручної синхронізації є залежність від кваліфікації персоналу та людського фактора, що істотно обмежує її використання у сучасних енергосистемах.

Напівавтоматичні системи синхронізації

Наступним етапом розвитку стали **напівавтоматичні системи синхронізації**, які включають допоміжні пристрої автоматичного регулювання частоти та напруги генератора, у той час як момент підключення до мережі визначається оператором.

Типові рішення цього класу реалізовані на базі:

- мікропроцесорних контролерів;
- автоматів регулювання збудження;
- систем управління приводом турбіни.

					171.4321.КР.ПЗ.Р2	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Такі системи часто використовуються у малих когенераційних установках, автономних джерелах енергії, а також у технологічних процесах, де потрібен підвищений контроль з боку оператора.

Автоматизовані системи синхронізації

На великих енергоблоках, у мережах середнього та високого класу напруги широко застосовуються **автоматизовані системи синхронізації (Automatic Synchronizer)**. Вони забезпечують повністю автоматичне:

- узгодження частоти обертання ротора;
- регулювання рівня збудження та амплітуди напруги;
- синхронізацію фазового кута;
- оптимальний момент підключення генератора до мережі.

Сучасні рішення автоматичної синхронізації реалізуються на базі програмованих логічних контролерів (PLC), інтелектуальних пристроїв захисту та автоматики (IED), а також SCADA-систем для дистанційного керування і моніторингу.

Прикладами комерційно доступних рішень є:

- ABB SYNCHROTECT (сімейство систем автоматичної синхронізації);
- Siemens SIPROTEC 7UM / 7SJ (пристрої релейного захисту з вбудованими функціями синхронізації);
- GE Multilin G60 (інтелектуальні системи захисту та керування генераторами).

Ці системи дозволяють інтегрувати функції синхронізації у загальний цикл автоматизованого керування енергоблоком та енергосистемою.

Новітні розробки у галузі синхронізації включають:

- використання цифрових фазових автоматів з алгоритмами предиктивного керування;
- застосування GPS-синхронізованих систем керування, що дозволяють здійснювати синхронізацію у мережах з децентралізованими джерелами (smart grids);

					171.4321.КР.ПЗ.Р2	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

- інтеграцію функцій синхронізації у системи керування мікромережами (microgrid controllers);
- використання штучного інтелекту та машинного навчання для оптимізації процесів синхронізації у реальному часі.

Тенденція розвитку полягає у переході до повністю автоматизованих рішень з мінімальним втручанням оператора та широкою інтеграцією у інтелектуальні енергетичні платформи.

2.2. Ручні системи синхронізації синхронних генераторів

Ручна синхронізація є найдавнішим і найпростішим методом узгодження параметрів синхронного генератора з електричною мережею. Вона полягає у безпосередньому контролі та регулюванні основних електричних параметрів – частоти, фази та амплітуди напруги генератора — оператором за допомогою спеціалізованих приладів.

Ручна система синхронізації зазвичай включає такі ключові вимірювальні пристрої:

- Частотомір – для контролю частоти обертання ротора генератора, що визначає частоту вихідної напруги. Відхилення частоти має бути мінімальним для забезпечення синхронізації з мережею.

- Вольтметр – для порівняння амплітуди напруги генератора з напругою мережі. Узгодження напруг є критичним, оскільки значна різниця може призвести до великих струмів при підключенні.

- Фазометр або індикатор синхронізації – пристрій для визначення фазового кута між напругою генератора і напругою мережі. Найпоширенішими індикаторами є лампові синхронізатори або стрілкові фазометри, які сигналізують про момент, коли фазовий зсув близький до нуля (синхронний стан).

Процес ручної синхронізації виконується в такій послідовності:

					171.4321.КР.ПЗ.Р2	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

1. Оператор шляхом регулювання частоти обертання ротора генератора (змінюючи подачу палива, відкриттям клапанів турбіни тощо) добивається частоти вихідної напруги, що максимально наближається до частоти мережі;
2. Регулюється збудження генератора для узгодження амплітуди напруги;
3. Оператор уважно спостерігає за фазовим індикатором і вибирає оптимальний момент для ручного замикання автоматичного вимикача, коли різниця фаз мінімальна, а умови напруги і частоти виконуються;
4. Підключення в цей момент мінімізує струми пуску і механічні навантаження на генератор.

Ручна синхронізація характеризується високою залежністю від кваліфікації оператора, що впливає на точність і безпеку підключення. Помилки можуть призвести до:

- виникнення значних пускових струмів;
- механічних коливань і пошкоджень генератора;
- порушень стабільності мережі.

Крім того, ручна синхронізація є менш ефективною у системах із великою кількістю генераторів або частими підключеннями через значні часові затримки та потребу постійного контролю.

Незважаючи на поширення автоматизованих систем, ручна синхронізація залишається актуальною у деяких малих і середніх електростанціях, а також у резервних або аварійних режимах, де використання автоматичних засобів ускладнене або неможливе.

2.3. Напівавтоматичні системи синхронізації синхронних генераторів

Напівавтоматичні системи синхронізації займають проміжне положення між традиційними ручними методами та повністю автоматизованими рішеннями. Вони поєднують автоматизовані функції контролю та регулювання

					171.4321.КР.ПЗ.Р2	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

параметрів генератора з частковим залученням оператора до ухвалення ключових рішень у процесі підключення генератора до мережі.

Такі системи є поширеним вибором на об'єктах із середнім рівнем автоматизації або там, де потрібно забезпечити баланс між надійністю автоматичного управління та оперативним контролем з боку персоналу.

У типовій напіваавтоматичній системі основні функції автоматизації виконуються спеціалізованими контролерами або модулем синхронізації, тоді як оператор здійснює остаточне підключення генератора вручну.

Основні складові напіваавтоматичної системи:

- Регулятор швидкості – забезпечує автоматичне регулювання частоти обертання ротора генератора до потрібного значення.
- Регулятор збудження – здійснює автоматичне узгодження амплітуди напруги генератора із напругою мережі.
- Фазометр або фазовий компаратор – контролює фазовий зсув між напругою генератора і напругою мережі.
- Операторська панель – відображає стан системи та дає змогу оператору ухвалювати рішення щодо моменту підключення.

Таким чином, система автоматично доводить параметри генератора до стану, сумісного із мережею, а момент замикання вимикача визначається оператором, зазвичай за показаннями індикаторів або автоматичними рекомендаціями системи.

Процедура синхронізації у напіваавтоматичній системі включає такі етапи:

1. Початкове регулювання: запуск генератора, вихід на номінальну швидкість.
2. Автоматичне узгодження частоти: регулятор швидкості підтримує частоту генератора в межах допустимого відхилення від частоти мережі.
3. Автоматичне узгодження напруги: регулятор збудження забезпечує відповідність амплітуди напруги генератора напрузі мережі.

					171.4321.КР.ПЗ.Р2	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

4. Контроль фази: фазовий компаратор вимірює фазовий зсув між напругою генератора та мережі; оператор спостерігає за фазовим індикатором.

5. Підключення: у момент мінімального фазового зсуву оператор вручну подає команду на замикання вимикача.

Переваги:

- Зниження ймовірності помилок завдяки автоматизації основних регулювань;
- Можливість оперативного втручання оператора у разі нештатних ситуацій;
- Простота впровадження на базі існуючої інфраструктури ручної синхронізації.

Обмеження:

- Потреба постійної присутності кваліфікованого персоналу;
- Неможливість повністю автономної роботи при частих підключеннях або у великих системах;
- Менша швидкість та точність у порівнянні з повністю автоматизованими рішеннями;

Напівавтоматичні системи найбільш поширені у таких випадках:

- Малі та середні ТЕЦ (теплоелектроцентралі);
- Резервні джерела енергії (дизель-генераторні установки);
- Автономні енергосистеми промислових підприємств;
- Гібридні системи з можливістю роботи як у автономному, так і у мережевому режимі.

Приклади комерційних рішень:

- ABB SYNCHROTECT Basic – базові модулі автоматизації синхронізації з ручним підтвердженням підключення;
- Siemens SIPROTEC 7SJ6x – пристрої релейного захисту з функціями підтримки напівавтоматичної синхронізації;

					171.4321.КР.ПЗ.Р2	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

- Woodward EasyGen 3200/3500 – контролери синхронізації для дизель- і газогенераторних установок з ручним підтвердженням.

2.4. Автоматизовані системи синхронізації синхронних генераторів

Автоматизовані системи синхронізації (Automatic Synchronizers, Auto-Sync Systems) є найсучаснішим і найефективнішим класом рішень для забезпечення узгодженого підключення синхронних генераторів до енергетичної мережі. Вони забезпечують повністю автоматизоване регулювання всіх параметрів синхронізації без необхідності постійної участі оператора, що дозволяє досягати високої точності, швидкості та надійності процесу.

Типова автоматизована система синхронізації включає такі компоненти:

- Контролер синхронізації (Synchronizer Controller) – спеціалізований пристрій або програмний модуль у складі систем автоматизації, що здійснює регулювання швидкості, збудження та вибір оптимального моменту підключення;
- Регулятор частоти (Speed Governor) – забезпечує динамічне регулювання швидкості обертання ротора генератора до потрібного значення;
- Регулятор збудження (Automatic Voltage Regulator, AVR) – автоматично узгоджує амплітуду напруги генератора із напругою мережі;
- Фазовий компаратор – вимірює та контролює фазовий зсув між напругою генератора та напругою мережі;
- Інтерфейс з автоматичним вимикачем – забезпечує автоматичне замикання вимикача у момент, коли всі параметри синхронізації відповідають нормативним вимогам.

Сучасні автоматизовані системи часто інтегруються у SCADA та DCS (Distributed Control System), що дозволяє здійснювати централізоване управління процесами синхронізації на рівні енергоблоку чи всієї станції.

					171.4321.КР.ПЗ.Р2	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Алгоритм роботи автоматизованої системи

Процес синхронізації у автоматизованій системі відбувається повністю автономно за таким алгоритмом:

1. Початкове регулювання: після запуску генератора контролер доводить частоту та напругу до заданих значень;
2. Автоматичне узгодження частоти: через керування приводом турбіни або двигуна регулюється частота вихідної напруги генератора;
3. Автоматичне узгодження напруги: AVR забезпечує регулювання амплітуди напруги;
4. Контроль фази: фазовий компаратор здійснює постійний моніторинг фазового зсуву;
5. Підключення: коли всі параметри знаходяться у допустимих межах, контролер автоматично подає команду на замикання вимикача;
6. Передача генератора у паралельну роботу з мережею: після підключення здійснюється регулювання режиму навантаження у синхронному режимі.

Технічні переваги:

- Висока точність синхронізації (типове відхилення фазового кута $< 5^\circ$);
- Висока швидкість процесу (час синхронізації – кілька секунд);
- Повна автоматизація процесу – відсутність потреби у постійній участі оператора;
- Можливість інтеграції у складні енергосистеми та автоматичне керування синхронізацією великої кількості генераторів;
- Зниження аварійності та підвищення ресурсу електричних машин завдяки оптимізації моменту підключення.

Експлуатаційні переваги:

- Стабільна робота у умовах динамічної змінної конфігурації енергосистеми (smart grids, мікромережі);

					171.4321.КР.ПЗ.Р2	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

- Підтримка синхронізації генераторів із джерелами відновлюваної енергії;
- Забезпечення функцій віддаленого керування та моніторингу.

Приклади сучасних рішень

На ринку автоматизованих систем синхронізації представлено низку комерційно доступних рішень:

Виробник	Продукт	Особливості
ABB	SYNCHROTECT 6	Висока точність, можливість паралельної синхронізації декількох генераторів
Siemens	SIPROTEC 7UM / 7SJ	Інтеграція у SCADA / DCS, підтримка різних режимів синхронізації
GE	Multilin G60	Інтелектуальні алгоритми керування, підтримка мікромереж
Woodward	EasyGen 3500	Проста інтеграція у дизель- і газогенераторні установки, підтримка ISOchronous режиму

Автоматизовані системи синхронізації сьогодні застосовуються:

- на великих ТЕС та ГЕС;
- у потужних когенераційних установках;
- у централізованих електромережах високої напруги;
- у децентралізованих системах з поновлюваними джерелами енергії;
- у мікромережах (microgrids) та smart grids.

2.5. Інтегровані рішення автоматичної синхронізації на базі PLC, IED та SCADA

У сучасних енергетичних об'єктах (ТЕС, ГЕС, ВДЕ, когенераційних установках, мікромережах) автоматична синхронізація реалізується як частина інтегрованої автоматизованої системи управління.

Типова архітектура включає такі рівні:

- польовий рівень: генератори, датчики (напруги, частоти, фази), вимикачі;

					171.4321.КР.ПЗ.Р2	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

- пристрої управління: IED (Intelligent Electronic Device), контролери автоматизації синхронізації, PLC;
- рівень SCADA: візуалізація, дистанційне керування, історичний аналіз;
- рівень ERP/EMS (Enterprise Resource Planning / Energy Management System) – для інтеграції у бізнес-процеси.

Програмовані логічні контролери (PLC)

- виконують роль центрального вузла автоматизації;
- реалізують алгоритм автоматичної синхронізації (узгодження частоти, напруги, фази);
- здійснюють обмін даними з IED та SCADA;
- автоматично керують вимикачем у момент синхронізації;
- забезпечують гнучкість налаштування (зміна алгоритму за потреби);
- підтримують резервування (redundancy) для підвищення надійності.

Наприклад, для ТЕС або ГЕС використовуються контролери Siemens S7-1500, Schneider M580, ABB AC500 тощо.

Інтелектуальні електронні пристрої (IED)

IED – це "розумні" пристрої нового покоління, які поєднують функції:

- релейного захисту (відключення у разі аварії);
- вимірювання параметрів синхронізації (напруга, частота, фаза);
- управління виконавчими механізмами (вимикачі, регулятори);
- підтримки зв'язку за стандартами IEC 61850, Modbus TCP, Profinet тощо.

IED часто використовуються як локальні контролери синхронізації, що передають інформацію у PLC або SCADA.

Популярні IED:

- Siemens SIPROTEC 5 (7UM, 7SJ);

					171.4321.КР.ПЗ.Р2	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

- ABB Relion;
- GE Multilin G60.

SCADA-системи

SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) – це верхній рівень системи автоматизації:

- надає оператору графічний інтерфейс для візуального контролю процесу синхронізації;
- дозволяє дистанційно запускати процедуру синхронізації;
- здійснює архівування параметрів синхронізації та станів обладнання;
- генерує аварійні повідомлення та історичні звіти.

Типові SCADA-системи:

- Siemens WinCC,
- ABB 800xA,
- GE iFIX,
- Schneider EcoStruxure.

У сучасних рішеннях основою інтеграції є стандарти:

- IEC 61850 – для моделювання даних і обміну у цифрових підстанціях;
- IEC 61131-3 – для програмування PLC;
- OPC UA – для інтеграції SCADA і ERP-систем.

Ці стандарти забезпечують відкриту архітектуру, що дозволяє гнучко адаптувати систему під конкретні потреби.

Приклад роботи системи (сценарій):

1. Оператор задає команду "Синхронізувати" з SCADA;
2. PLC або IED автоматично регулюють частоту і напругу генератора;
3. PLC/IED постійно контролюють фазовий зсув;
4. У момент досягнення допустимих меж PLC подає команду на включення вимикача;

					171.4321.КР.ПЗ.Р2	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

5. SCADA фіксує параметри синхронізації у базі даних.

У повністю автоматичному режимі це може відбуватись без участі оператора, що особливо важливо у гнучких та розподілених енергосистемах (VDER, microgrids).

Переваги інтегрованого підходу:

- Повна автоматизація процесу → підвищення надійності;
- Централізований та дистанційний контроль;
- Гнучкість налаштувань;
- Простота інтеграції у існуючі SCADA та DCS;
- Відповідність вимогам IEC 61850.

2.6. Існуючі системи автоматичної синхронізації

Оскільки нас більше цікавить спосіб точної автоматичної синхронізації (ТАС), який забезпечує процес включення синхронного генератора на паралельну роботу з мережею при менших ударних струмах, то розглядатимемо лише пристрої, що реалізують спосіб точної автоматичної синхронізації.

Точна синхронізація дозволяється при виконанні трьох основних умов: $\delta = 0$, $f_g = f_s$ і $U_g = U_s$. При практичній реалізації не потрібне абсолютно точне вирівнювання частот. Синхронізація допускається при різниці частот $f_s = 0,2-0,3$ Гц або при швидкості ковзання $\omega_s = 1,2-1,9$ рад/с.

Якщо синхронізація відбувається з розрахунковим ковзанням $\omega = \text{const}$, то кут випередження $\delta_{\text{вип}}$ пропорційний часу випередження $t_{\text{вип}}$.

Отже, для того щоб контакти вимикача замикалися у момент, коли кут $\delta = 0$, автоматичний синхронізатор повинен створювати сигнал управління або з випередженням за часом $t_{\text{вип}}$, або з випередженням за кутом $\delta_{\text{вип}}$.

Залежно від того, як створюється випередження (за часом t або кутом δ), існуючі синхронізатори поділяють на два типи: синхронізатори з постійним часом випередження, момент спрацьовування яких визначається безпосередньо заданим часом випередження (по суті, часом спрацьовування вими-

					171.4321.КР.ПЗ.Р2	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

кача), і синхронізатори з постійним кутом випередження, момент спрацьовування яких визначається заданим кутом випередження.

Якщо процес синхронізації відбувається при змінній частоті ($\omega \neq \text{const}$), випередження за кутом не рівнозначно випередженню за часом, тому синхронізатор з постійним випередженням за кутом δ не завжди правильно вловлює момент подачі сигналу на включення вимикача. У цьому відношенні синхронізатори з постійним часом випередження $t_{\text{вип}}$ вигідно відрізняються від синхронізаторів з постійним кутом випередження, у силу чого цей тип синхронізаторів набув найбільшого поширення.

Усі пристрої, що реалізують ТАС, мають виконувати наступні функції:

- 1) встановлювати й підтримувати напругу на затискачах генератора близькою до напруги системи;
- 2) вводити ковзання генератора в область допустимих величин ковзань;
- 3) обирати момент подачі команди на включення з заданим кутом або часом випередження;
- 4) контролювати значення ковзання генератора у момент подачі команди на включення і, відповідно, дозволяти або забороняти включення.

Згідно з позицією 1, приведення напруги генератора до значення напруги системи покладається на автоматичний регулятор збудження генератора. Згідно з позицією 2, приведення частоти генератора до частоти мережі виконує зрівнювач частоти, який здійснює відповідні зміни уставки автоматичного регулятора приводу генератора. Функції по пунктах 3 і 4 здійснюють органи випередження і контролю ковзання, які є основною частиною пристрою.

У таблиці 1.1 наведені основні параметри поширених в експлуатації на сьогоднішній день пристроїв автоматичної синхронізації.

					171.4321.КР.ПЗ.Р2	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Таблиця 2.1 – Технічні параметри синхронізаторів

Параметр	Тип синхронізатора			
	АСТ-4	СА-1	Спрінт	ABB Synchrotact 5
Вхідні напруги, В	100	100	100	100..230
Частота, Гц	50 ± 5	50 ± 5	50 ± 5	50 ± 5
Гранична різниця частот при синхронізації, Гц	0,25	1,0	0,8	1
Граничний кут випередження, ел.град.		120	120	100
Час випередження, с		0,1 ... 1,0 с		
Гранична різниця вхідних напруги, %	15	20	20	40
Діапазон робочих температур, °С	-10 .. + 45	0..40	-10 .. + 45	+5 .. + 55
Максимальна кутова помилка в робочому діапазоні температур, ел.град.	3	3	3	
споживання по вимірювальних колах, ВА		2,5	0,5	4
Маса, не більше, кг		15	6	8
Облік прискорення при виборі кута випередження	-	+	+	+
Потужність по колу живлення, ВА, не більше	20	20	20	35
Час синхронізації, хв	1..35	1..35	1..30	0,5..15

Автоматичний синхронізатор АСТ-4 використовується для включення генератора за методом точної синхронізації і є синхронізатором з постійним часом випередження. Модуль підгонки частоти обертання реагує не на абсолютну частоту генератора, який потрібно синхронізувати, а на його ковзання відносно частоти мережі. У цьому випадку синхронізатор правильно підганяє частоту обертання генератора не тільки при нормальному режимі енергосистеми, коли частота дорівнює 50 Гц, але й в аварійному режимі, в якому мож-

					171.4321.КР.ПЗ.Р2	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

ливі відхилення частоти від номінального значення. Випробування показують, що синхронізатор працює правильно при зниженні частоти до 45 Гц.

На роботу синхронізатора не чинять істотного впливу неномінальні величини напруги генератора та мережі. При відхиленні напруги у межах $\Delta U = \pm 15\%$ від номінального значення усі елементи синхронізатора функціонують нормально.

Час випередження синхронізатора може бути налаштований з урахуванням часу спрацьовування вимикача і практично залишається постійним незалежно від ковзання. У діапазоні різниці частот $f_s = 0,04-0,25$ Гц розкид часу випередження включення не перевищує 3-х електричних градусів. За своїми технічними та експлуатаційними характеристиками синхронізатор АСТ-4 є одним з найкращих автоматичних синхронізаторів, тому він отримав велике поширення на електричних станціях.

Синхронізатор АСТ-4 (рис. 2.3) складається з наступних основних вузлів:

- вузла випередження, що визначає момент подачі імпульсу на включення магнітного пускача;
- вузла контролю різниці частот, що визначає допустимість величини ковзання генератора;
- вузла контролю різниці напруги, який порівнює напруги мережі і генератора;
- вузла вирівнювання частоти обертання генератора, який потрібно синхронізувати, та мережі;
- вузла блокувань, який забезпечує необхідну взаємодію елементів у схемі синхронізатора.

					171.4321.КР.ПЗ.Р2	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

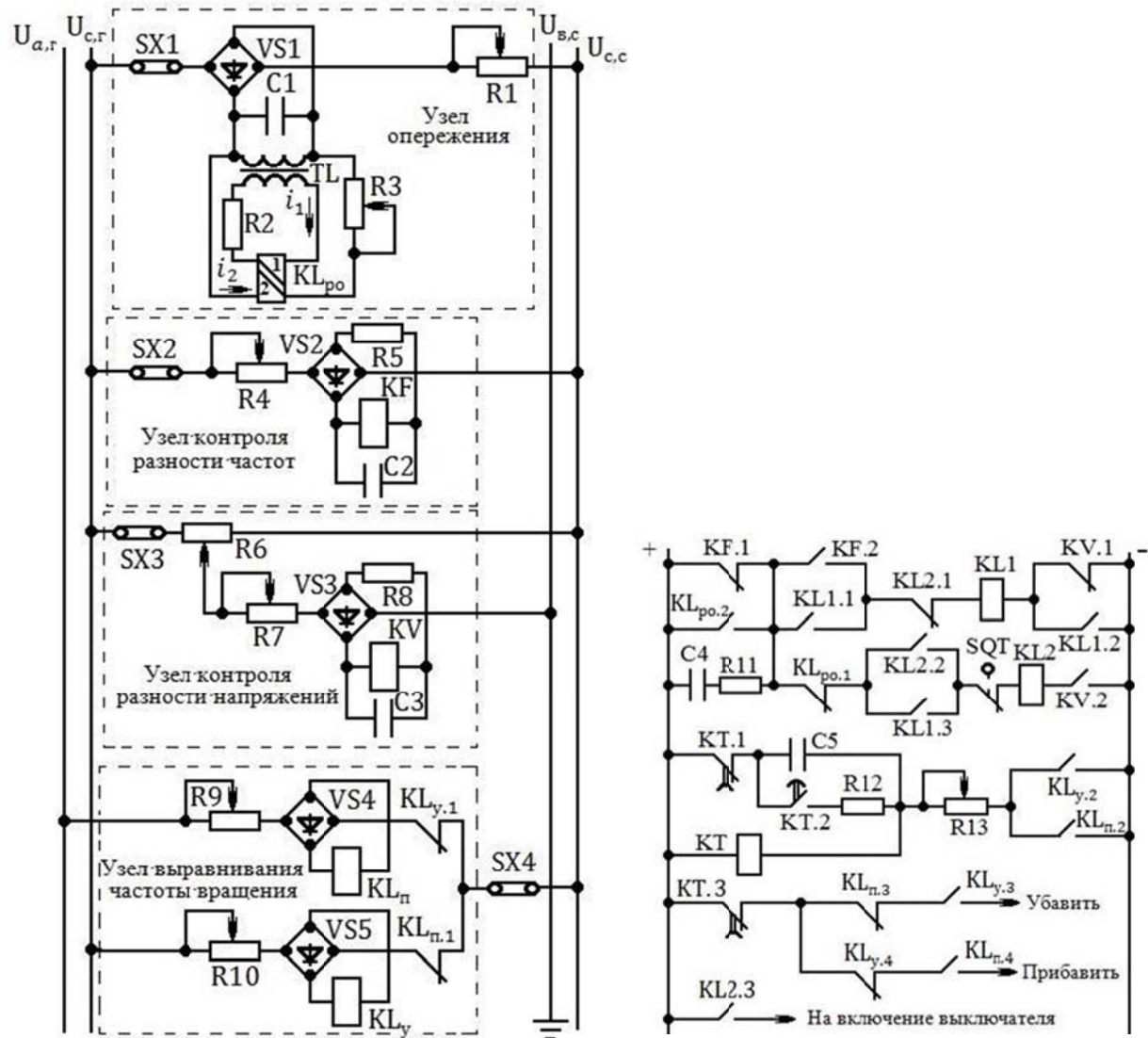


Рисунок 2.3 – Схема синхронизатора АСТ-4

З огляду на те, що практично усі генератори забезпечуються автоматичними регуляторами напруги, які забезпечують підгонку напруги генератора до напруги мережі з розбіжністю не більше $\pm 10\%$, синхронізатор виконується без пристрою підгонки напруги. На синхронізатор в якості вимірюваних сигналів подається напруга з боку генератора та мережі.

Вузол випередження синхронізатора складається з трансреактора (диференціюючого трансформатора) TL та двообмотувального поляризованого реле KL_{po} . До первинної обмотці трансреактора TL підводиться випрямлена напруга ковзання генератора (напруга биття).

					171.4321.КР.ПЗ.Р2	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

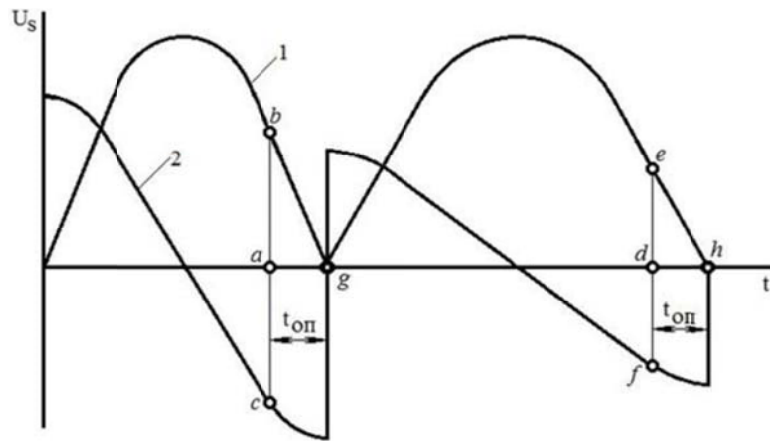


Рисунок 2.4 – Діаграма, яка пояснює роботу вузла випередження:
1 – вхідна напруга; 2 – напруга на вторинній обмотці
диференціюючого трансформатора (трансреактора)

У кожен період биття випрямлена напруга ковзання, відфільтрована конденсатором С1, безперервно змінює своє значення, тому у вторинній обмотці трансреактора індукується ЕРС. Вторинна напруга трансреактора змінює знак у момент максимуму (точніше, дуже близько до нього) первинної напруги, а при збігу фаз векторів ЕРС генератора і енергосистеми досягає найбільшого амплітудного значення (див. діаграму на рис. 2.4).

Струм, що протікає по другій обмотці реле KL_{po} , пропорційний напрузі биття:

$$i_2 = K_2 U_s = K_2 \cdot 2 \cdot U \cdot \sin\left(\frac{\omega_s t}{2}\right). \quad (2.2)$$

Крізь першу обмотку реле KL_{po} протікає вторинний струм трансреактора, пропорційний похідній випрямленої напруги биття:

$$i_1 = K_1 \cdot 2 \cdot U \cdot \frac{\omega_s}{2} \cdot \cos\left(\frac{\omega_s t}{2}\right). \quad (2.3)$$

У виразах (1.2) і (1.3) K_1 і K_2 – коефіцієнти пропорційності, значення яких можна змінити регулюванням підстроювальних опорів R_1 і R_3 .

Реле випередження включено таким чином, що коли струми обох обмоток мають позитивний знак, то на рухому систему реле діє гальмівний момент. Реле KL_{po} спрацює і перемкне свої контакти лише після того, як струм в обмотці 1 змінить знак і стане рівним струму в обмотці 2 (рис. 2.4).

Інтервал часу, на який відбувається випередження спрацьовування реле KL_{po} до моменту збігу фаз, є величиною постійною і не залежить від величини ковзання ω_s . Це і є час випередження, яке задає вузол випередження синхронізатора.

Розкид часу випередження, створюваний вузлом випередження, не перевищує трьох електричних градусів при різниці частот $\Delta f = 0,04-0,25$ Гц.

Значення часу випередження синхронізатора регулюється за допомогою резистора R3. Чим більше значення опору резистора R3 встановлено, тим менше струм у другій обмотці реле і тим більше час випередження.

Контроль різниці частот напруг генератора і мережі здійснюється за допомогою реле KF, включеного через випрямляч VS2 і резистор R4 на напругу биття U_s . Реле KF спрацює, якщо напруга на його затискачах зменшиться до напруги спрацьовування.

Ковзання генератора, при якому реле KF відпускає свій якір, визначається зміною опору резистора R4.

Для запобігання аварійної роботи синхронізатора при великому ковзанні паралельно обмотці реле KF включений конденсатор C2. Ємність його обирається такою, щоб при різниці частот, більшій 0,5- 1,0 Гц, реле KF утримувало б свій якір і блокувало роботу синхронізатора. Наявність конденсатора не дає напрузі на обмотці реле KF при великій різниці частот знизитися до нуля, так як внаслідок розряду конденсатора підтримується напруга на обмотці реле. При малій різниці частот наявність конденсатора не впливає на роботу реле KF, адже напруга на його обмотці в цьому випадку знижується по кривій напруги биття.

Напруга спрацьовування UKF обирається з умови сумісної роботи реле контролю частоти і реле випередження. Якщо частота ковзання $\omega_s > \omega_{s,доп}$, то першим спрацьовує реле випередження, а потім – реле контролю частоти, і включення вимикача не відбудеться. Якщо частота ковзання $\omega_s < \omega_{s,доп}$, пер-

					171.4321.КР.ПЗ.Р2	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

шим спрацьовує реле контролю частоти, другим – реле випередження, і тоді в цьому випадку подається імпульс на включення вимикача.

Для контролю ковзання генератора і вибору моменту включення при куті фаз $\delta = 0$ використовується напруга ковзання $u_s(\delta)$, яка отримується в результаті обробки напруг генератора $u_r(t) = U_r \sin(\omega_r t)$ та мережі $u_m(t) = U_m \sin(\omega_m t)$. У разі рівності амплітуд напружень $U_r = U_m$, отримаємо:

$$u_r - u_m = 2 U_m \sin \sin \left(\frac{\omega_r - \omega_m}{2} t \right) \cos \left(\frac{\omega_r + \omega_m}{2} t \right). \quad (2.4)$$

Після випрямлення напруги ковзання дорівнює: $u_m(\delta) = 2U_m \sin(\frac{\delta}{2})$.

Якщо напругу генератора виразити як $U_r = U_m \pm \Delta U$, де ΔU – розбіжність напруг мережі і генератора за величиною, то після деяких перетворень отримаємо:

$$u_r - u_m = 2 U_m \sin \sin \left(\frac{\omega_r - \omega_m}{2} t \right) \cos \left(\frac{\omega_r + \omega_m}{2} t \right) \pm \Delta U \sin(\omega_r t). \quad (2.5)$$

Розглянемо вплив величини $\Delta U \sin(\omega_r t)$ на напругу ковзання. При рівній нулю різниці напруг ($\Delta U = 0$) напруга ковзання $u_s(\delta)$ при куті $\delta = 0$ також дорівнює нулю. Ця обставина і використовується в елементах синхронізатора для фіксації факту проходження нульового значення кута неузгодженості фаз.

При відмінній від нуля різниці напруг генератора і мережі ($\Delta U \neq 0$) вираз $\Delta U \sin(\omega_r t)$ впливає на роботу вимірювальних елементів. Особливий інтерес представляє вплив цієї напруги на величину випрямленої напруги при малих значеннях кута δ : при різниці напруг $\Delta U \neq 0$ і куті $\delta = 0$ напруга ковзання $u_s(\delta) \approx \Delta U$. Графік напруги ковзання $u_s(\delta)$ при різниці напруг $\Delta U \neq 0$ показаний на рис. 2.5 (крива 1).

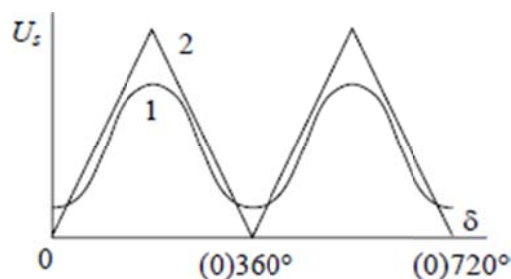


Рисунок 2.5 – Напруга ковзання $u_s(\delta)$

					171.4321.КР.ПЗ.Р2	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		37

З графіку (рис. 2.5) видно, що в області кутів $\delta \approx 0$ напруга ковзання нечітко визначає момент рівності нулю кута δ , і це є суттєвим недоліком синхронізатора АСТ-4.

Для усунення цього недоліку був розроблений безконтактний синхронізатор СА-1, що містить вимірювальний перетворювач (фазометр), вихідна напруга якого лінійно залежить від кута (рис. 1.3, крива 2).

Сигнал на включення визначається наступною умовою:

$$k_1 u_s + k_2 \frac{dU_s}{dt} t_{\text{вип}} + \frac{d^2 U_s}{dt^2} \frac{t_{\text{вип}}^2}{2} = 0. \quad (2.6)$$

Тобто контролюється не тільки значення $k_1 u_s = 0$, але й введені сигнали по першій і другій похідних від напруги ковзання.

Синхронізатор СА-1 (рис. 1.4) складається з: часо-імпульсного перетворювача (ЧІП); фільтру низьких частот (ФНЧ), що виділяє постійну складову напруги, пропорційну куту; двох диференціаторів AD1, AD2 та елемента порівняння – компаратора EA1. Зазначені елементи утворюють вимірювальний орган кута випередження (ВОКВ), що обчислює кут випередження і формує дискретний сигнал $U_{\text{в}}$ на включення вимикача синхронного генератора. Також до складу автоматичного синхронізатора входять вимірювальні органи вимірювання ковзання (різниці частот) (ВОК) та вимірювання різниці амплітуд (ВОРА) напруг.

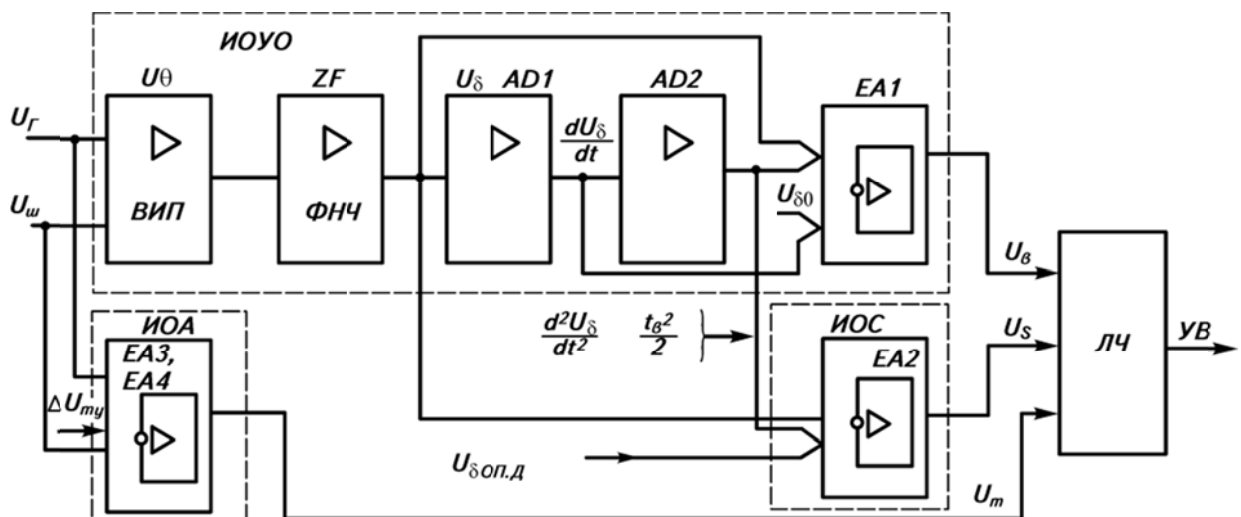


Рисунок 2.6 – Функціональна схема аналогового автоматичного синхронізатора СА-1

Особливістю синхронізатора є обмеження максимально допустимої кутової швидкості ковзання генератора в момент включення вимикача. Для цього контролюється максимально допустимий кут випередження, який враховується по кутовий швидкості ковзання в момент спрацьовування синхронізатора і прискоренню. Вимірювальний орган ВОК містить у собі елемент порівняння кута – компаратор ЕА2 напруги з встановленою напругою $U_{\text{двип.д.}}$, який скоригований за швидкістю ковзання і видає дозволяючий сигнал U_s . У вимірювальному органі ВОРА за абсолютною різницею амплітуд напруг формується сигнал ΔU_m на виході діодного елемента порівняння з випрямлячем на виході. Компаратори ЕА3 і ЕА4 порівнюють ΔU_m з встановленим $\Delta U_{\text{му}}$. Дискретні сигнали надходять в логічну частину (ЛЧ) синхронізатора, яка видає керуючі впливу (КВ) на включення вимикача.

Автоматичний синхронізатор «Спрінт» – мікропроцесорний пристрій для точної автоматичної синхронізації, який є цифровим аналогом аналогового автоматичного синхронізатора СА-1. Автоматичний синхронізатор розміщений в плоскому металевому корпусі, має переднє підключення зовнішніх кіл, виконаних у вигляді збірки гвинтових затискачів (клем), і контрольний роз'єм, які закриваються окремими прозорими кришками. На передній панелі розташовані рідкокристалічний алфавітно-цифровий індикатор і клавіатура режиму управління. На правій частині передньої панелі розташовані движки резисторів змінного опору для настройки синхронізатора, поруч з якими розташовані пояснення їх призначень.

Основною обчислювальною частиною ОЧ (рис. 2.7) автоматичного синхронізатора «Спрінт» є мікропроцесор МП типу K1810BM88 з ОЗП і ПЗП, контролером переривань КП і таймерами Т.

Вимірювально-перетворювальна частина (ВПЧ) містить вимірювальні трансформатори TVL напруг U_r і $U_{\text{ш}}$, аналого-дискретні перетворювачі

					171.4321.КР.ПЗ.Р2	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

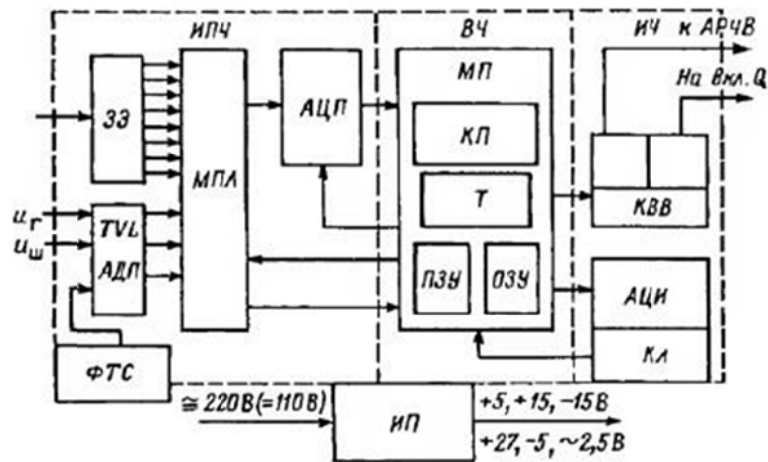


Рисунок 2.7 – Принципова схема синхронізатора «Спрінт»

(АДП) синусоїдальних напруг у прямокутні імпульси з тривалістю, рівними півперіодам напруг U_r і $U_{ш}$; аналоговий перемикач – мультиплексор (МПЛ), що підключає до аналого-цифрового перетворювача АЦП коло аналогових сигналів; задаючий (установчий) елемент (ЗЕ) і формувач тестових сигналів (ФТС).

Принцип дії синхронізатора Synchrotact 5 аналогічний синхронізатору «Спрінт». Функціональна схема представлена на рис. 2.8.

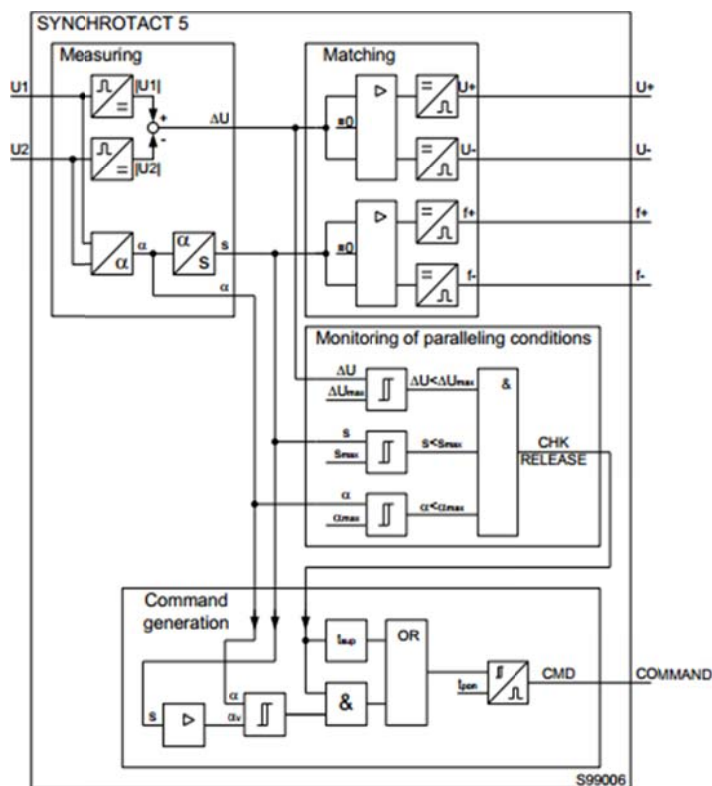


Рисунок 2.8 – Функціональна схема автоматичного синхронізатора Synchrotact 5

					171.4321.КР.ПЗ.Р2	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		40

Спосіб точної автоматичної синхронізації є найбільш використовуваним при підключенні синхронних генераторів на паралельну роботу з мережею. Він забезпечує найменші ударні впливи на генератор і мережеву апаратуру.

Недоліками способу точної синхронізації є складність схеми та апаратури включення; порівняно великий час, необхідний для включення генератора у мережу; неможливість використання у системах, які не мають швидкодіючого і точного регулювання частоти обертання приводу генератора.

Узагальнена функціональна схема пристрою автоматичної синхронізації представлена на рис. 2.9.

Даний спосіб здійснюється за допомогою пристрою автоматичної синхронізації, що містить блок перетворення напруги мережі і генератора 1 (БП), блок порівняння різниці напруг синхронного генератора і мережі із заданою величиною 2 (БС) і логічний блок 3 (ЛБ). Блок перетворення служить для отримання різниці напруги генератора (U_G) і мережі (U_M) (напруги биття U_s). Блок порівняння порівнює напруга биття (U_s) з опорною величиною ($U_{оп}$) і формує сигнал, при отриманні якого логічний блок створює сигнал на включення генератора на паралельну роботу з мережею [5].

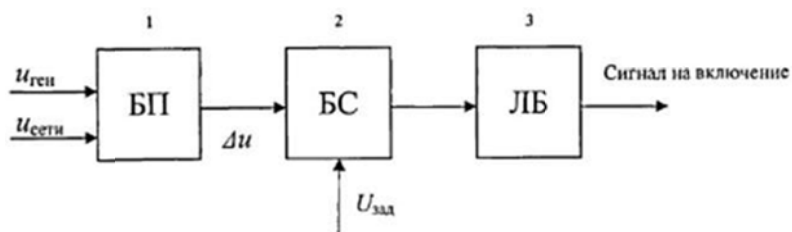


Рисунок 2.9 – Узагальнена функціональна схема пристрою автоматичної синхронізації

Перевагою даного способу є використання в якості керуючих тільки двох сигналів: миттєвих значень напруги однієї з фаз генератора і мережі.

Завданням даного дослідження є розробка та аналіз способу отримання сигналу на включення магнітного пускача, що забезпечує швидкодіючий включення синхронного генератора на паралельну роботу з мережею. При цьому ударні струми повинні не перевищувати допустимих значень і даний спосіб повинен здійснюватися без точного регулювання потужності (швид-

					171.4321.КР.ПЗ.Р2	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

кості) приводу генератора в процесі розгону. Забезпечення цієї умови з одного боку зменшить складність і вартість апаратури управління приводом генератора, з іншого боку забезпечить зменшення часу запуску генератора. Технічним результатом має бути підвищення швидкодії включення синхронного генератора в мережу з малим ударним струмом і електромагнітним моментом.

					171.4321.КР.ПЗ.Р2	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

					171.4321.КР.ПЗ.РЗ				
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата					
Розробник		Мальованний П. С.			МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СИСТЕМИ СИНХРОНІЗАЦІЇ	Літ.	Арк.	Аркушів	
Консультант								43	
Н. контр.		Добрінова Л. П.				НУК імені адмірала Макарова			
Керівник		Буряк В. С.							
Зав. каф.		Рябенський В. М.							

Розділ 3. МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СИСТЕМИ СИНХРОНІЗАЦІЇ

3.1. Дослідження процесу точної синхронізації

Найбільший інтерес при розгляді процесу точної синхронізації при включенні синхронного генератора на паралельну роботу з мережею представляють процеси, що відбуваються в області величин відносного ковзання генератора, близьких до нуля. Розглянемо процеси генератора і мережі за умови, що інтенсивність розгону генератора залишається постійною.

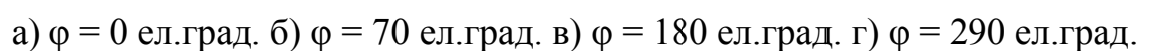
На рис. 3.1 представлені діаграми різниці напруг генератора і мережі (так звана напруга ковзання) при різному куті фаз у момент проходження точки, коли ковзання генератора дорівнює нулю. Графіки побудовані при швидкості зміни ковзання (df), що дорівнює 0,1 Гц/с. Через таку невелику величину df на графіках не помітно пульсацій напруги ковзання, близьких до частоти мережі, а добре видно огинаючу напруги ковзання. На рисунку представлені чотири діаграми, на яких кут фаз ϕ напруги при ковзанні генератора, рівному нулю, становить 0, 70, 180, 270 електричних градусів відповідно.

Діаграма а) є ідеальною для проведення включення синхронного генератора, на ній у момент збігу частот генератора і мережі ($s = 0$) фази напруг теж збігаються, проте на інших діаграмах такого ідеального збігу немає. При цьому слід зазначити, що при реальному пуску генератора заздалегідь передбачити, який кут фаз ϕ буде при ковзанні рівному нулю неможливо.

Проаналізуємо, які точки є найбільш вигідними для реалізації в них підключення генератора до мережі. Однією з умов реалізації точного методу підключення є збіг фаз напруг генератора і мережі.

Збіг фаз відбувається в точках Т (с нумерацією -5 до 1), проставлених на діаграмі (рис. 3.1).

					171.4321.КР.ПЗ.РЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		



Нумерація точок виконана таким чином, за позначення нуль прийнята точка, в якій положення фази напруги генератора не відстає і не випередило на 2π напруга мережі. Ця точка спостерігається одразу ж після проходження генератором ковзання рівного нулю (або в окремому випадку в момент проходження нуля). Негативна нумерація проставлена для точок, де фаза напру-

ги генератора випереджала на кут, кратний 2π напруга мережі, а позитивна нумерація – для випадку відставання.

Оскільки ще однією умовою успішної синхронізації є якомога менша величина ковзання генератора в момент включення, то найбільш хорошими для дотримання перерахованих умов є точки T_0 і T_{-1} . Їхня привабливість є рівнозначною, адже вони симетрично розміщуються щодо нуля ковзання генератора. Тут треба звернути увагу, що є випадок, коли вони збігаються.

При реалізації методу передбачається, що, знайшовши чергову точку збігу фаз, ми визначаємо, чи не є наступна точка точкою включення вимикача, визначаємо період часу до наступної точки і формуємо імпульс включення, подавши його раніше на час включення вимикача. Таким чином, з'являється ще одне обмеження: період перед останньою крапкою повинен бути більше, ніж час включення вимикача. Це відразу виключає з розгляду точку T_0 , тому що вона взагалі може збігатися з точкою T_{-1} . Тому за точку включення приймаємо точку T_{-1} .

У зв'язку з вище зазначеним, приймаємо наступний алгоритм визначення моменту подачі імпульсу на включення. Знаходимо точку збігу фаз (за мінімумом огинаючої); визначаємо період до наступної точки; визначаємо, чи не є наступна точка точкою T_{-1} (нижче наведений алгоритм для такого аналізу) і, якщо наступна точка T_{-1} , то формуємо імпульс включення з випередженням приходу в точку T_{-1} на час включення вимикача.

Розглянемо алгоритм для визначення періоду між точками збігу фаз. Оскільки у поточний момент часу нам не відомо, в якій точці, згідно позначень рис. 3.1, ми знаходимося, то введемо іншу систему позначення точок збігу фаз, наведену на рис. 3.2, відлік в якій починається від деякої довільної точки T_0 , до точки T_3 , а періоди часу між точками позначимо t_{01} , t_{12} і t_{23} .

					171.4321.КР.ПЗ.РЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

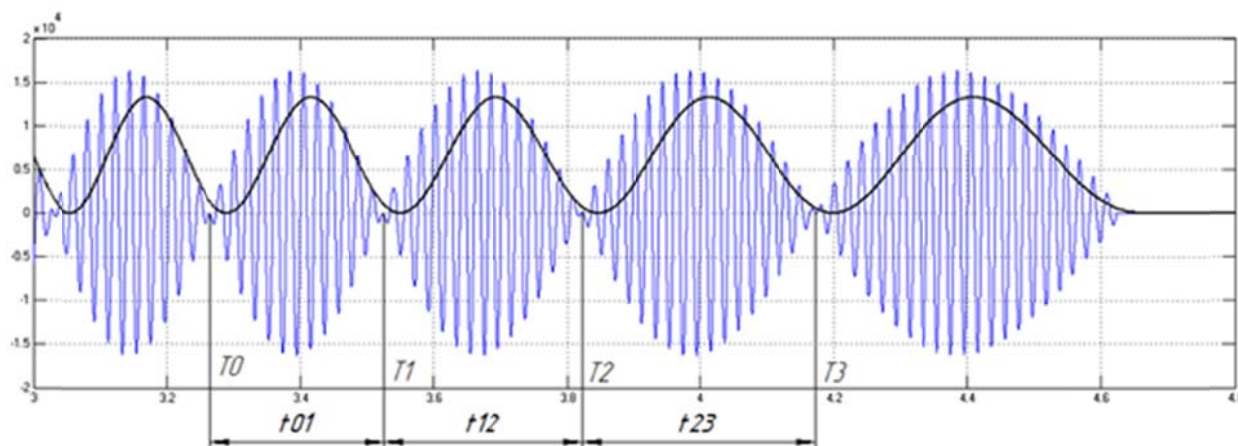


Рисунок 3.2 – Розрахункова діаграма позначень точок збігу фаз напруг

Якщо задатися обмеженням, що швидкість збільшення частоти напруги генератора у деякий невеликий проміжок часу – наприклад, при проходженні трьох послідовних збігів фаз напруг генератора і мережі – залишається постійною або змінюється незначно, а також – що в цей період частота мережі також змінюється незначно, то можна провести наступні викладки.

За точку відліку часу $t = 0$ приймаємо положення, в якому фази напруг генератора і мережі збігаються.

Вираз для визначення кута положення фазної напруги генератора, за умови лінійного збільшення швидкості обертання генератора, представляється виразом:

$$\varphi_{\Gamma} = 2 \pi f_{\Gamma} t + \frac{2 \pi df t^2}{2}. \quad (3.1)$$

де: f_{Γ} – частота генератора у нульовий відлік часу, Гц;

t – час, с;

df – швидкість зміни частоти генератора, Гц/с.

Вираз для визначення кута положення фазної напруги мережі представляється формулою:

$$\varphi_{\text{м}} = 2 \pi f_{\text{м}} t, \quad (3.2)$$

де: $f_{\text{м}}$ – частота мережі, Гц;

t – час, с.

Залежність зміни частоти напруги генератора визначається виразом:

$$f_{\Gamma} = f_{\Gamma 0} + df t, \quad (3.3)$$

де $f_{г0}$ – частота напруги генератора при $t=0$, Гц.

Ковзання генератора визначається виразом:

$$s = \frac{f_{г} - f_{м}}{f_{м}}. \quad (3.4)$$

Припустимо, що процес синхронізації знаходиться в точці T_0 (див. рис. 2.2) і частота напруги генератора в цій точці дорівнює f_0 . Тоді, використовуючи вираз (3.3), можна визначити частоту напруги генератора в точці T_1 :

$$f_1 = f_0 + df t_{01}, \quad (3.5)$$

де t_{01} – час, що пройде до досягнення наступної точки збігу фаз напруг (T_1), с.

Оскільки розглядаємо процес синхронізації у зоні, де швидкість обертання генератора поки нижче синхронної, тобто частота напруги генератора менше частоти напруги мережі, то збіг фаз напруг після точки T_0 в точці T_1 відбувається тоді, коли різниця кутів повороту фаз напруг генератора і мережі складе 2π . Таким чином, використовуючи вирази (3.1) і (3.2), можна записати:

$$2\pi f_0 t_{01} + \frac{2\pi df t_{01}^2}{2} + 2\pi = 2\pi f_{м} t_{01}. \quad (3.6)$$

Скоротивши вираз (2.6) на 2π і перенісши всі значення вліво, отримаємо:

$$\frac{df t_{01}^2}{2} + (f_0 - f_{м}) t_{01} + 1 = 0. \quad (3.7)$$

У точці T_1 також можемо визначити частоту в точці T_2 , використовуючи вираз (3.5):

$$f_2 = f_1 + df t_{12}, \quad (3.8)$$

де t_{12} – час, що пройде до досягнення наступної точки збігу фаз напруг (T_2), с.

Для інтервалу часу t_{12} , за аналогією з виразом (3.7), отримаємо вираз:

$$\frac{df t_{12}^2}{2} + (f_1 - f_{м}) t_{12} + 1 = 0. \quad (3.9)$$

Підставивши у вираз (3.9) визначення величини f_1 з (3.5), отримаємо:

$$\frac{df t_{12}^2}{2} + (f_0 + df t_{01} - f_{м}) t_{12} + 1 = 0. \quad (3.10)$$

В результаті отримали два рівняння (3.7) і (3.10), в яких якщо вважати відомими (або вимірними) величини f_s , t_{01} і t_{12} , то залишаються невідомими

					171.4321.КР.ПЗ.РЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

df і f_0 . Помноживши вираз (3.7) на t_{12} , а вираз (2.10) на t_{01} , а потім, віднявши одне від іншого, можна виключити змінну f_0 . З отриманого виразу отримуємо формулу для визначення швидкості зміни частоти генератора:

$$df = \frac{2(t_{12}-t_{01})}{t_{12} t_{01} (t_{12}-t_{01})}. \quad (3.11)$$

З виразу (3.7) можна отримати виразу для визначення частоти генератора в точці T_0 :

$$f_0 = f_M - \frac{df t_{01}}{2} - \frac{1}{t_{01}}. \quad (3.12)$$

Використовуючи рівняння (2.4), визначимо ковзання генератора у точці T_0 :

$$s_0 = -\frac{1}{f_M t_{01}} - \frac{df t_{01}}{2f_M}. \quad (3.13)$$

Використовуючи рівняння (2.5), визначимо ковзання у точці T_1 :

$$s_1 = -\frac{1}{f_M t_{01}} + \frac{df t_{01}}{2f_M}. \quad (3.14)$$

Аналогічно визначимо ковзання у точці T_2 :

$$s_2 = s_1 + \frac{df t_{01}}{f_M}. \quad (3.15)$$

Для інтервалу часу t_{23} , за аналогією з виразом (2.7), отримуємо:

$$\frac{df t_{23}^2}{2} + (f_2 - f_M) t_{23} + 1 = 0. \quad (3.16)$$

Підставивши у нього вираз для ковзання, отримуємо:

$$\frac{df t_{23}^2}{2} + s_2 f_M t_{23} + 1 = 0. \quad (3.17)$$

Розв'язавши квадратне рівняння (3.17), отримуємо вираз для визначення інтервалу часу між точками T_2 і T_3 :

$$t_{23} = \frac{-s_2 f_M \pm \sqrt{(s_2 f_M)^2 - 2 df}}{df}. \quad (3.18)$$

Рівняння (3.17) має два корені, але нас цікавить тільки менше значення, адже більше значення кореня визначає момент часу на ділянці, коли частота напруги генератора вже більше частоти напруги мережі.

Слід звернути увагу, що корені можуть бути й комплексними (у разі від'ємної величини підкорінного виразу); це відбувається у той момент, коли

					171.4321.KP.ПЗ.РЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

точка T_2 знаходиться вже в області позитивних значень ковзання. Ця особливість може бути використана для визначення стану, коли ми вже пропустили точку можливого підключення генератора.

Остаточно вираз для визначення інтервалу часу між точками T_2 і T_3 має наступний вигляд:

$$t_{23} = \frac{-s_2 f_M - \sqrt{(s_2 f_M)^2 - 2 df}}{df}. \quad (3.19)$$

Таким чином, перебуваючи у точці T_2 і знаючи періоди часу t_{01} і t_{12} , можна, використовуючи вираз (3.11), визначити швидкість зміни частоти напруги генератора df , а потім за допомогою виразів (3.14) і (3.15) визначити ковзання генератора s_1 і s_2 . Знаючи ковзання s_2 і df , можна за виразом (2.19) визначити період часу до наступної точки збігу фаз. Це дозволяє реалізувати алгоритм формування сигналу управління на вимикач з урахуванням часу на включення вимикача.

На рис. 3.3 представлені діаграми зміни кута фази між напругою генератора та мережі при різних кутах фаз φ в момент проходження точки $s = 0$. Ці діаграми побудовані за допомогою скрипта MATLAB, наведеного у додатку А. Як видно, є тільки одна ідеальна діаграма, коли в момент проходження через нуль ковзання генератора фази генератора і мережі збігаються. Розглянемо цю діаграму більш детально.

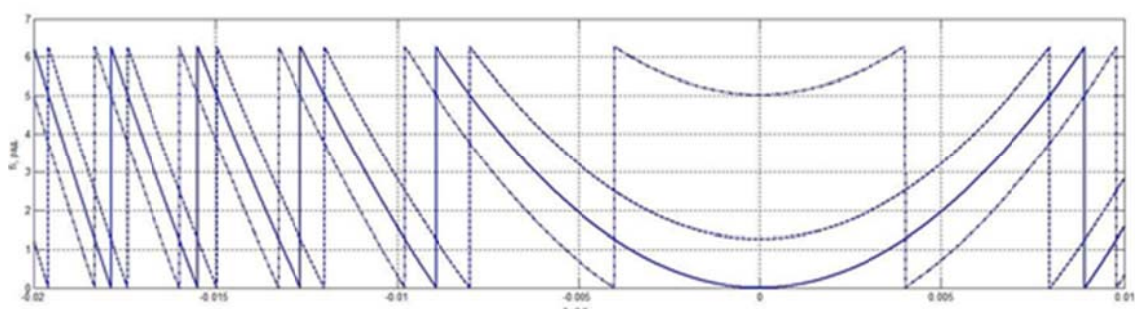
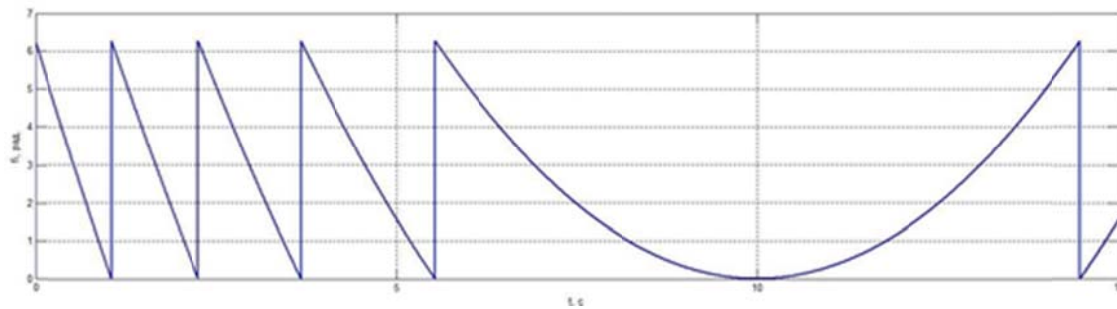


Рисунок 3.3 – Діаграми зміни фази між напругою генератора та мережі при різних кутах фаз φ в момент проходження точки $s = 0$

На рис. 3.4 представлена тільки одна діаграма, яка нас цікавить. Для неї можна визначити тривалості періодів між збігами фаз. Відлік періодів поч-

немо з 1, позначивши так період, прилеглий до точки нульового ковзання. Нумерація зростає до напрямку початку розгону генератора.



Рису-

нок 3.4 – Діаграми зміни фази між напругою генератора і мережі при куті фаз $\varphi = 0$ в момент проходження точки $s = 0$

У загальному вигляді тривалість періоду визначається наступним виразом:

$$t_i = \sqrt{\frac{2}{df}} (\sqrt{i} - \sqrt{i-1}), \quad (3.20)$$

де i – номер періоду.

Нас цікавить тривалість другого періоду ($i = 2$). Вона дорівнює:

$$t_2 = \sqrt{\frac{2}{df}} (\sqrt{2} - 1). \quad (3.21)$$

Тривалість цього періоду визначає максимальну тривалість періоду, при якій ще існує точка збігу фаз напруг в зоні від'ємних значень ковзання генератора. Саме з цієї тривалості можна організувати вибір того періоду, на якому виробляється включення вимикача, що під'єднує генератор до мережі.

3.2. Модель включення синхронного генератора на паралельну роботу з системою електропостачання

Для вирішення поставленого завдання проведемо дослідження проблеми шляхом аналізу поведінки математичної моделі, яка описує процес включення синхронного генератора на паралельну роботу з мережею.

Математичну модель можна побудувати шляхом складання системи диференціальних рівнянь, що описують з необхідною точністю процес розгону синхронного генератора і його включення, а потім рішення чисельними

					171.4321.КР.ПЗ.РЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		51

методами отриманої системи в якомусь програмному математичному пакеті. У даному випадку можуть бути використані програмні пакети MATLAB, MathCad, Mathematica або інші пакети. Однак даний метод вирішення досить складний, особливо при складанні системи диференціальних рівнянь, і може таїти в собі труднощі знаходження можливих помилок.

Існує інший шлях створення математичної моделі об'єкта і його дослідження. Даний шлях полягає у використанні програмних систем, в яких вже створені та зібрані у бібліотеки математичні моделі окремих елементів системи, і досліднику необхідно з існуючих бібліотечних елементів зібрати свою систему. В якості таких програмних систем можна навести системи Simulink з пакета MATLAB, а також AmeSim.

Зупинимо свій вибір на системі Simulink компанії MathWorks, оскільки у складі цього пакету є бібліотека SimPowerSystems [2], що містить елементи трифазних мереж, і в тому числі модель синхронної машини, яка може працювати як в режимі двигуна, так і генератора. Так само є набір елементів достатній для побудови системи управління.

На рис. 3.5 представлена модель включення синхронного генератора на паралельну роботу з мережею, розроблена в програмі Simulink з використанням бібліотеки SimPowerSystems.

Основним елементом моделі є бібліотечний елемент синхронної машини, параметри якої встановлено відповідно до завдання на проектування 2 MVA потужності і 10 кV напруги. Мережа моделюється трьох фазної ЕРС у вигляді елемента Voltage Source. Як параметри цього елемента встановлюється напруга, частота і початкова фаза. За допомогою зміни початкової фази можна промодельовати ситуацію, коли в момент проходження ковзанням генератора нуля спостерігаються різні фазні розбіжності напруг генератора і мережі.

					171.4321.KP.ПЗ.РЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

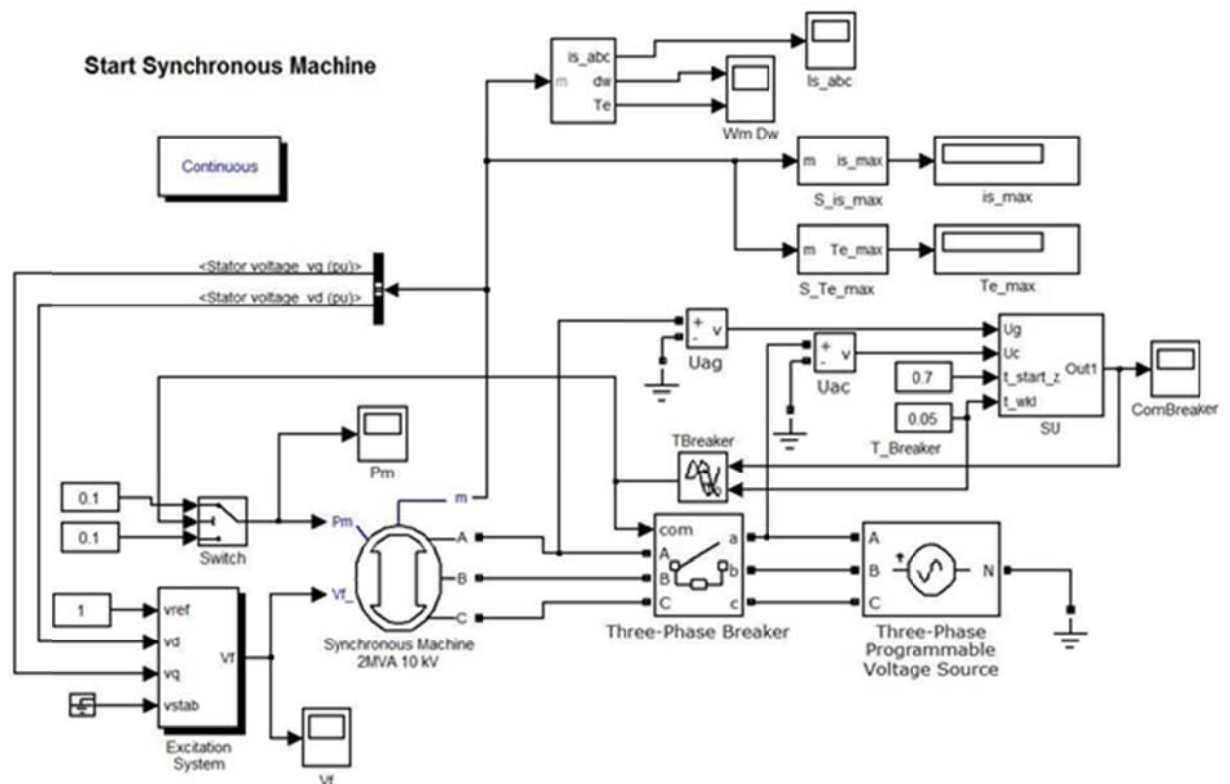
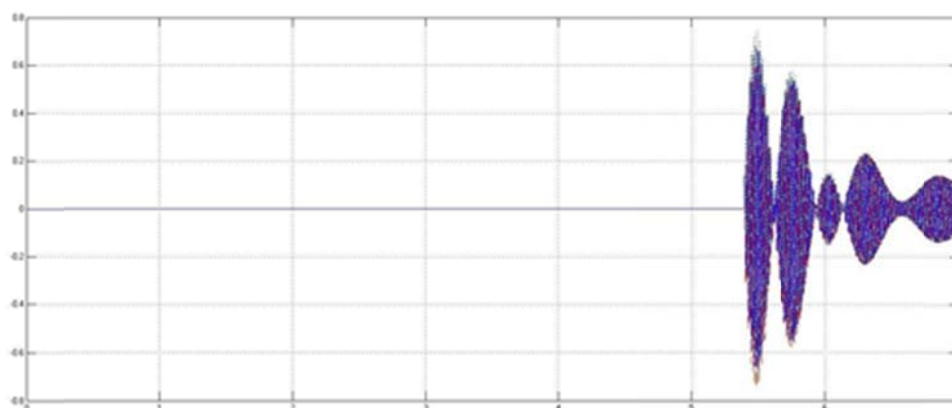


Рисунок 3.5 – Модель включення синхронного генератора на паралельну роботу з енергосистемою

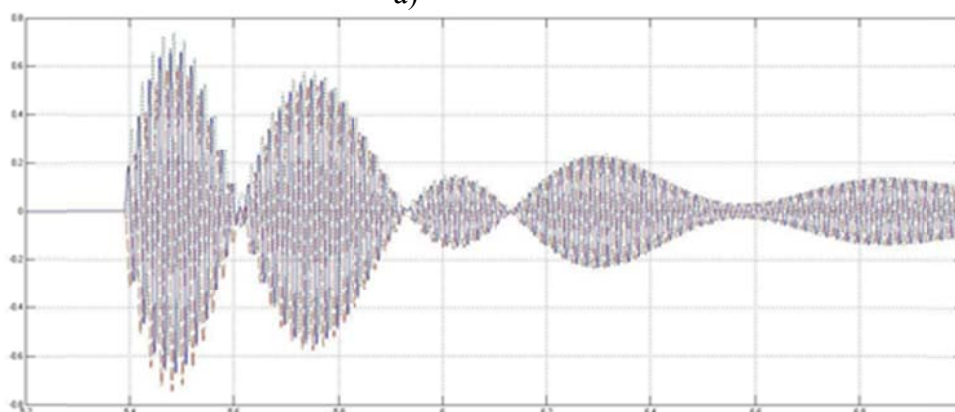
Синхронний генератор і трифазна ЕРС з'єднані між собою через трифазний вимикач. Включення цього вимикача і моделює підключення синхронного генератора на паралельну роботу з мережею. Час затримки включення вимикача моделюється за допомогою блоку затримки T_Breaker. Тривалість цієї затримки встановлюється константою T_Breaker, встановленої в якості прикладу в величину 0,05 с.

З моделі синхронної машини видається комбінований інформаційний сигнал m, в який входять показники струмів стартера, оборотів ротора, ковзання та інші параметри. Ці параметри подаються на елементи Scope, за допомогою яких можна проконтролювати діаграми зміни цих параметрів. На рис. 3.6, а) представлена діаграма ковзання генератора. Для визначення максимального ударного струму включення використовується субмодель

S_is_max. Результат відображається на елементі дисплея is_max, приклад представлений на рис. 3.6, б).



а)



б)

Рисунок 3.6 – Діаграми струмів стартера: а) весь період синхронізації;
б) діапазон ударних струмів в момент включення вимикача

На рис. 3.7 і рис. 3.8 представлені діаграми зміни ковзання генератора і величини електромагнітного моменту.

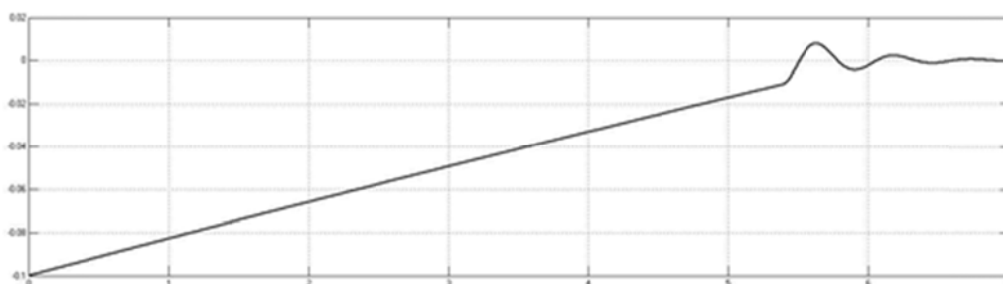


Рисунок 3.7 – Діаграма зміни ковзання генератора

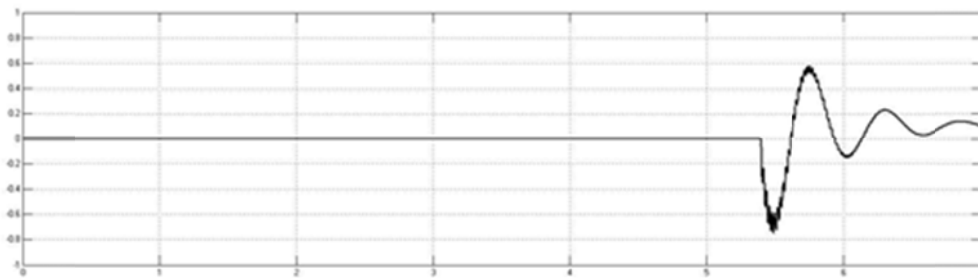


Рисунок 3.8 – Діаграма електромагнітного моменту генератора

Проекції напруг статора на осі d і q (v_d і v_q) подаються на блок керування збудженням синхронного генератора, який визначає величину напруги, що виробляється. Величина уставки подається на вхід v_{ref} ; у моделі вона встановлена рівною 1, що відповідає номінальній напрузі генератора. Четвертий вхід для управління потужністю генератора в моделі не використовуємо.

Діаграма сигналу управління збудженням генератора представлена на рис. 3.9.

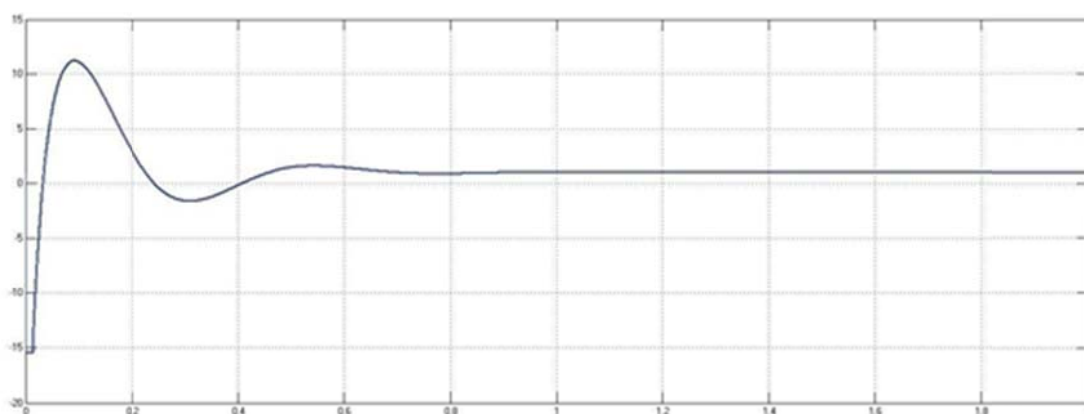


Рисунок 3.9 – Діаграма зміни струму збудження генератора

На вхід P_m моделі синхронної машини подається сигнал, пропорційний моменту від системи приводу синхронного генератора. У моделі встановлено перемикач, за допомогою якого можна задавати різні величини моменту приводів для періоду розгону генератора і періоду після включення вимикача.

Змінюючи величину моменту приводу, можна забезпечувати різну швидкість розгону генератора, причому, чим більший момент, тим більша швидкість розгону.

Управління процесом включення вимикача здійснюється в субмоделі системи управління SU. На вхід системи управління подаються величини миттєвих напруг фази А генератора і мережі, отримані з вимірників напруги U_{ag} і U_{ac} . Так само на вхід системи управління подається величина часу затримки включення вимикача для формування часу випередження. Четвертим параметром вказується час стартової затримки, який необхідний для переходу моделі системи управління збудженням синхронного генератора в усталений режим, а також для забезпечення стартової прогонки системи управління. Величина стартової затримки встановлена в 0,7 с, що обґрунтовується діаграмою, представленою на рис. 3.9.

Як вихід із системи, формується імпульс на включення вимикача, який подається на блок затримки. Даний імпульс можна проконтролювати за допомогою елемента Scope ComBreak, приклад представлений на рис. 3.10.



Рисунок 3.10 – Діаграма імпульсу на включення вимикача

На діаграмі видно, що сигнал включення зі схеми управління приходить раніше на 0,05 с, чим відбувається момент включення вимикача і початок процесу втягування генератора у синхронізм (див. рис. 3.6, момент початку ударних струмів синхронізації).

У моделі відбувається розрахунок не лише часу розгону генератора від нульової швидкості, але й також моделюється процес розгону від деякої швидкості до моменту настання моменту синхронізму з деяким запасом на перехідні процеси після підключення генератора до мережі. Початкова швидкість генератора встановлюється у вигляді параметру в моделі синхронної

					171.4321.KP.ПЗ.РЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		56

машини. Зокрема, розрахунки проводилися для стартовою величини ковзання генератора -0,1. Управління початковою фазою старту в бібліотечному елементі синхронної машини відсутня.

3.3. Модель системи управління

На рис. 3.11 представлена модель системи управління синхронізацією включення синхронного генератора на паралельну роботу з енергосистемою. Модель виконана як субмодель загальної моделі процесу синхронізації включення генератора. Субмодель має чотири входи і один вихід. В якості вхідних приймаються наступні сигнали:

- U_g – миттєва напруга фази А генератора;
- U_c – миттєва напруга фази А мережі;
- t_{start_z} – час затримки виконання розрахунку вихідних величин, необхідний для накопичення масиву вхідних сигналів, в яких повинно бути як мінімум три точки збігу фаз напруг генератора і мережі;
- t_z – час включення магнітного пускача, що з'єднає обмотки статора синхронної машини з мережею.

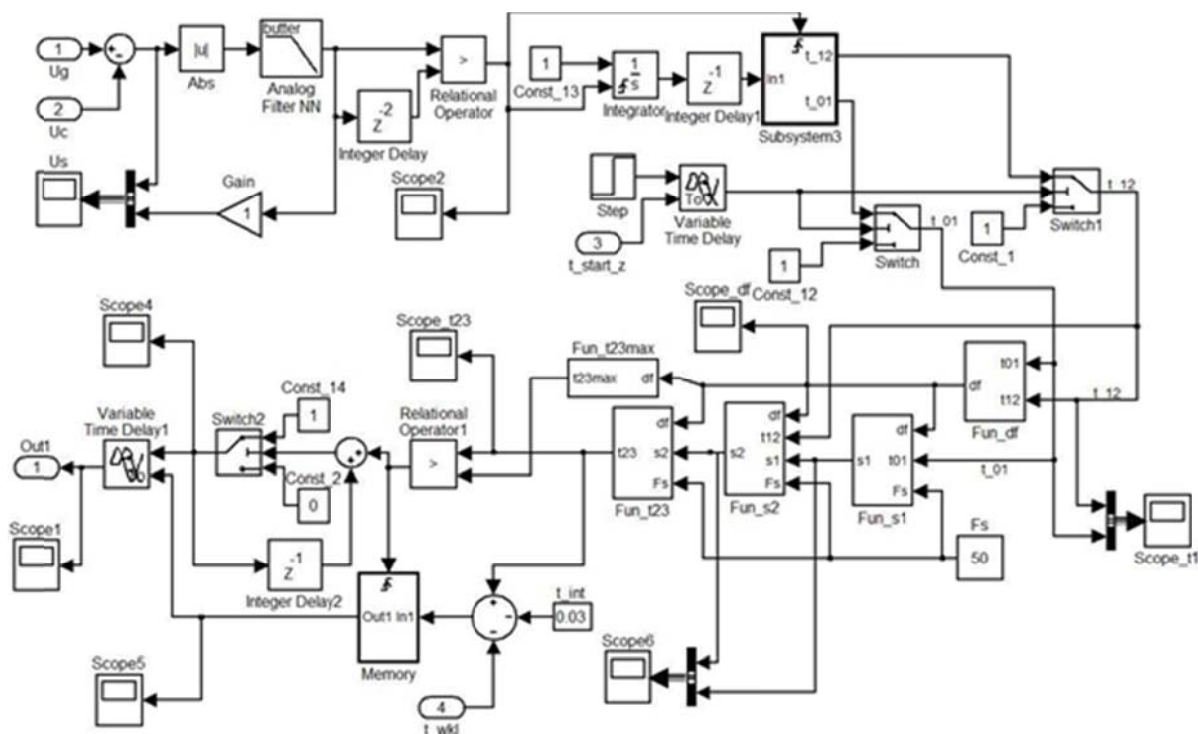


Рисунок 3.11 – Модель системи управління синхронізацією генератора

Розглянемо призначення основних блоків моделі управління. Одразу на вході сигнали U_g і U_c віднімаються, і одержується так звана напруга ковзання (у деяких джерелах – напруга биття). Далі береться абсолютне значення сигналу, що аналогічно операції випрямлення в існуючих синхронізаторах. Цей блок необхідний для переводу сигналу з близького до симетричного відносно нуля у сигнал, завжди більший або рівний нулю, щоб по ньому можна було оцінювати, хоча б якісно, рівень неузгодженості фаз генератора і мережі. Даний сигнал носить імпульсний характер, і для його згладжування встановлюємо блок «Analog Filter NN» – фільтр високих частот. Це аналогічно установці конденсатора після випрямного моста. Даний фільтр забезпечує достатнє згладжування сигналу, що дозволяє однозначно визначити мінімум сигналу, який показує положення точки збігу фаз напруг. Приклад вхідного сигналу і сигналу після фільтру наведено на рис. 3.12. Для відображення на одній числовій вісі для сигналу після фільтру проведено масштабування. З діаграми видно, що сигнал після фільтру досить характерно зазначає точки збігу фаз напруги генератора і мережі. У початковій частині діаграми можна відзначити, що сигнал після фільтру має меншу амплітуду і для надійної роботи системи управління потрібно початкова пауза в обробці.

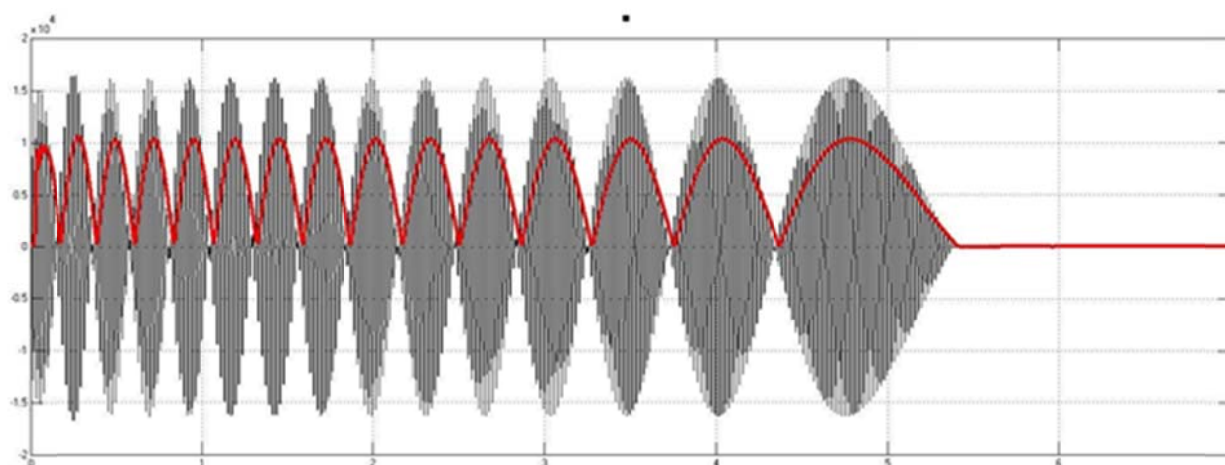


Рисунок 3.12 – Діаграми різниці фазних напруг і вихідного сигналу після фільтра

					171.4321.КР.ПЗ.РЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		58

Форма останньої хвилі биття, перед включенням вимикача, набуває витягнутого характеру, що характерно для ковзання генератора, близького до нуля.

На рис. 3.13 наведена частина попередньої діаграми з великим масштабом за часом. На даній діаграмі видно, що сигнал після фільтру дещо відстає за фазою на величину dT_{int} . Дане відставання сигналу характерне для фільтрів високої частоти.

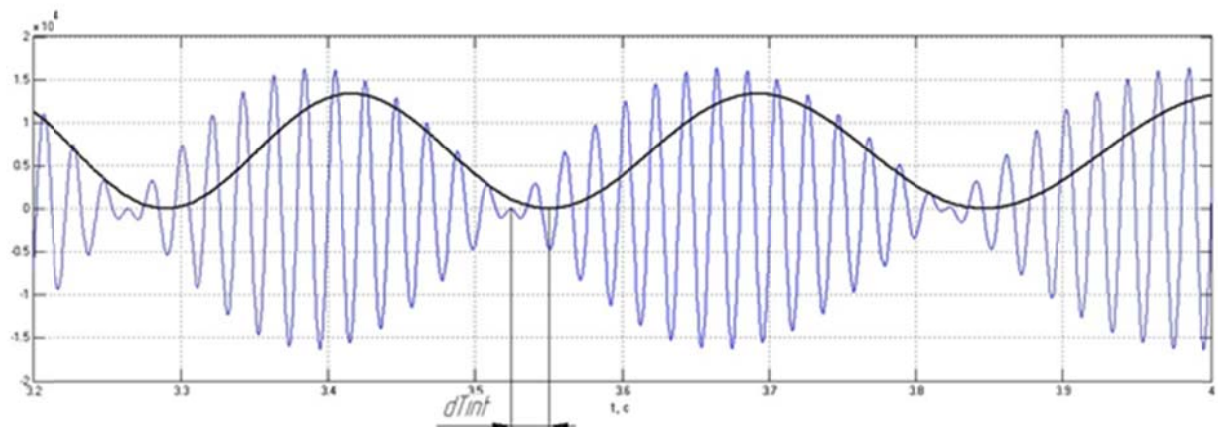


Рисунок 3.13 – Діаграми різниці фазних напруг і вихідного сигналу після фільтру та позначення часової затримки сигналу

Дане відставання сигналу огинаючої характерно і для існуючих синхронізаторів, проте в описах це відставання у більшості випадків не згадується, і йому не приділяється належної уваги. Причина того, що на це відставання не звертають уваги, полягає у тому, що це відставання закладають в область визначення (регулювання або установки) часу випередження, встановлюючи час випередження більше часу спрацьовування вимикача. І, оскільки робота відомих синхронізаторів відбувається при малій величині ковзання генератора і незначній швидкості зміни ковзання, то ця величина відставання залишається практично однаковою і не сильно впливає на визначення часу випередження. У нашому ж випадку це зміщення відіграє негативну роль, особливо його неоднаковість при проході черговий точки збігу фаз. Хоча середня його величина може бути скомпенсована вирахуванням з інтервалу затримки на включення вимикача, по суті так само, як в реалізованих синхронізаторах.

Далі слідує модуль порівняння Relational Operator, який порівнює відфільтрований сигнал з тим самим сигналом, але з невеликим відставанням, що дозволяє визначити момент часу, коли відфільтрований сигнал починає зростати, причому дрібні коливання сигналу не будуть виявлені. Таким чином, після елемента Relational Operator формується одиничний імпульсний сигнал, причому одиниця з'являється в момент проходження мінімуму огинаючої напруги ковзання (звичайно з урахуванням запізнювання), і скидається в нуль у момент проходження максимуму.

Далі за схемою розміщується елемент Integrator, відлік якого скидається в нуль наростаючим фронтом сигналу з виходу Relational Operator. Після інтегратора отримуємо пилкоподібний сигнал, амплітуди імпульсів якого відповідають періоду, який пройшов з моменту попереднього збігу фаз напруг.

На елементі Subsystem3 реалізовано зберігання тривалості двох періодів t_{01} і t_{12} , які елемент видає у вигляді сигналів t_01 і t_12 . Значення величин періодів подаються з інтегратора із затримкою на один розрахунковий крок, і перемикання здійснюється наростаючим фронтом сигналу з виходу Relational Operator.

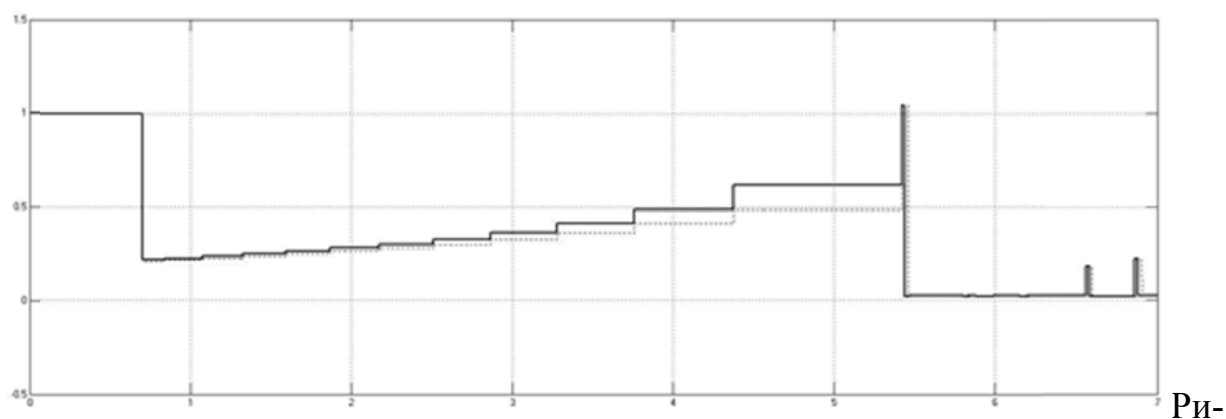
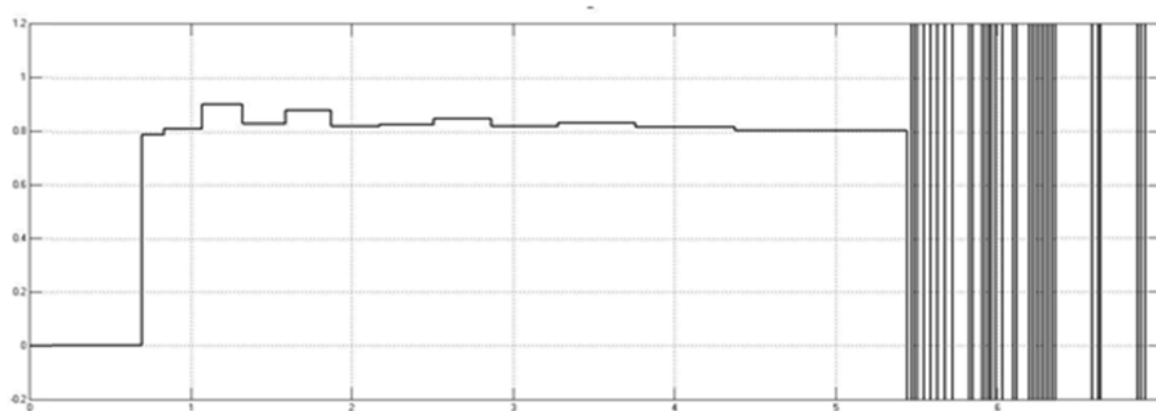


Рисунок 3.14 – Діаграма певних значень періодів часу між моментами збігами фаз

На рис. 3.14 представлена діаграма певних значень періодів t_{01} і t_{12} , де період t_{01} позначений точкової лінією, а період t_{12} – суцільною лінією.

Далі в схемі реалізовані два ключі Switch і Switch1, за допомогою яких реалізовано привласнення періодам t_{01} і t_{12} на початковій ділянці розрахунку значень, рівних 1, що необхідно для виключення операції ділення на нуль, поки величини періодів ще не набули деяких початкових значень.

Сигнали t_{01} і t_{12} подаються на субмодель Fun_df, в якій проводиться розрахунок швидкості зміни ковзання df . Діаграма сигналу df представлена на рис. 3.15.



Ри-
сунок 3.15 – Діаграма розрахованої швидкості зміни ковзання генератора df

На шум в кінці діаграми можна не звертати уваги, адже він виникає вже після подачі імпульсу на включення вимикача (шум виникає через початок перехідних процесів), а в цей час сигнал не використовується для аналізу.

Сигнал df носить ступінчастий характер, що викликається неточностями визначення точок збігу фаз через нестабільне зміщення сигналу, одержуваного після фільтрації. Однак при наближенні до моменту синхронізації тривалість періодів збільшується, і вплив помилок знижується.

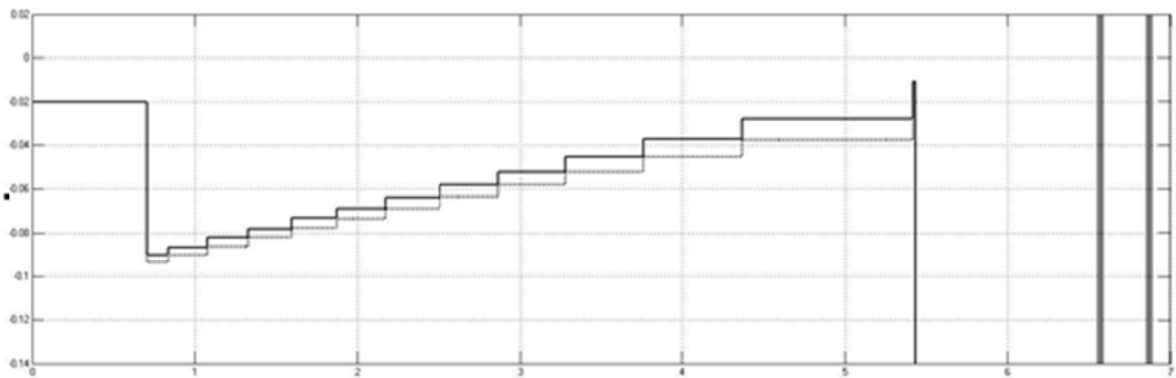


Рисунок 3.16 – Діаграма розрахованих величин ковзання s_1 і s_2

Далі сигнали t_{01} , t_{12} , fd і значення частоти мережі F_s подаються на субмоделі Fun_s1 , Fun_s2 і Fun_t23 , в яких проводиться розрахунок ковзань генератора s_1 , s_2 і величини періоду t_{23} до наступного збігу фаз напруг.

На рис. 3.16 представлені діаграми розрахованих величин ковзання s_1 і s_2 . З діаграм видно, що ковзання генератора поступово наближається до нуля за слабо вираженою експоненційною залежністю. Тому загальне зниження df на наведеному вище рисунку є обґрунтованим.

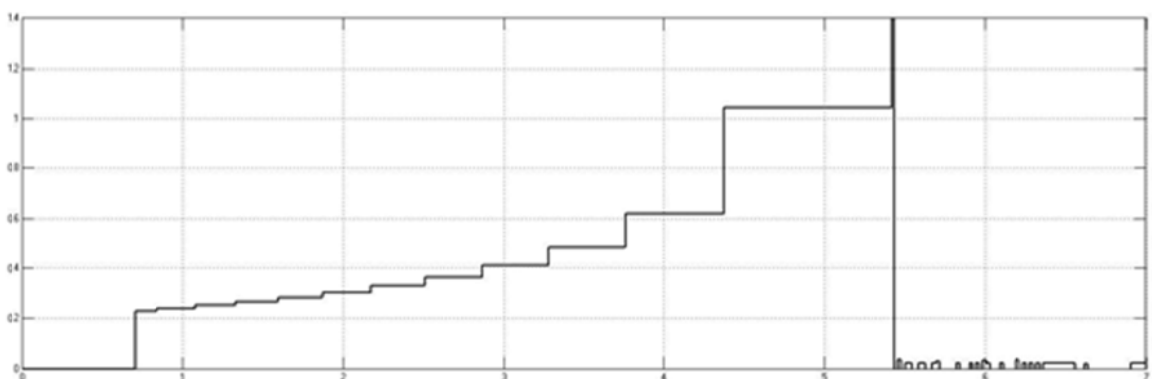


Рисунок 3.17 – Діаграма розрахованого наступного періоду збігу фаз t_{23}

На рис. 3.17 наведена діаграма розрахованого періоду до наступного збігу фаз t_{23} .

У субмоделі Fun_t23max проводиться розрахунок величини максимально допустимої тривалості періоду на даній швидкості зміни ковзання, після якого вже не буде точок збігу фаз до точки з нульовим ковзанням генератора.

Отримана величина порівнюється з тривалістю періоду t_{23} в елементі Relational Operator1, і у разі, якщо $t_{23} > t_{23\max}$, формується одиничний імпульс про необхідність формування імпульсу на включення вимикача.

За допомогою елементів Switch2 і Integer Delay2 формується стійкий одиничний імпульс, який не скинеться при переході до нуля сигналу з Relational Operator1, що, власне, і необхідно для стійкого включення вимикача. Фронт наростання імпульсу формується в момент часу збігу фаз напруг ($T_{.2}$ за класифікацією рис. 3.1), коли відбулося визначення, що наступна точка збігу фаз остання перед проходом ковзання генератора через нульове значення. Залишається тільки сформувати затримку фронту цього імпульсу, щоб він був поданий на вимикач у необхідний момент часу.

Затримка імпульсу включення виконується елементом Variable Time Delay1. Тривалість затримки визначаємо шляхом вирахування з величини t_{23} часу затримки сигналу фільтром (див. рис. 3.13), на схемі це константа t_{int} , і тривалості включення вимикача, яка береться з виходу t_{wkl} субмоделі схеми управління.

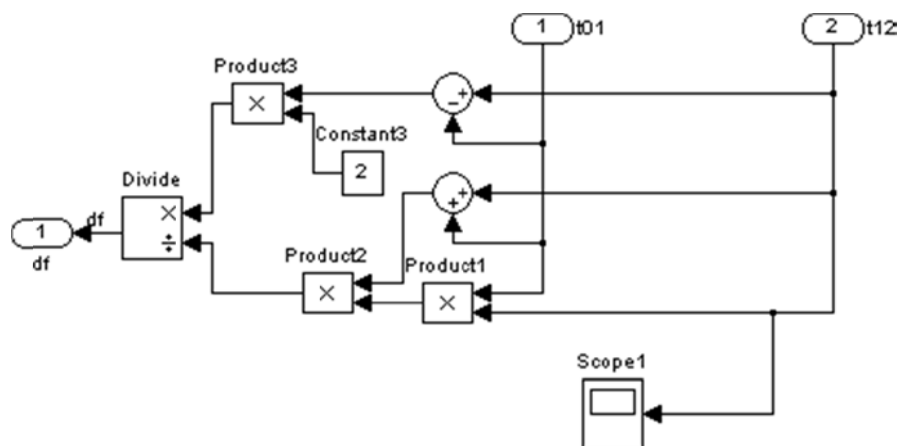


Рисунок 3.18 – Модель Fun_df розрахунку швидкості зміни частоти генератора (df)

На рис. 3.18 представлена субмодель Fun_df розрахунку величини швидкості зміни частоти генератора df . Субмодель приймає на входи величини параметрів: інтервалу часу між точками 0 і 1 t_{01} і інтервалу часу між точками 1 і 2 t_{12} . Використовуючи стандартні оператори Simulink, проводяться обчис-

лення за формулою (3.11), визначаючи величину швидкості зміни частоти генератора df . Отримана величина подається на вихід df субмоделі.

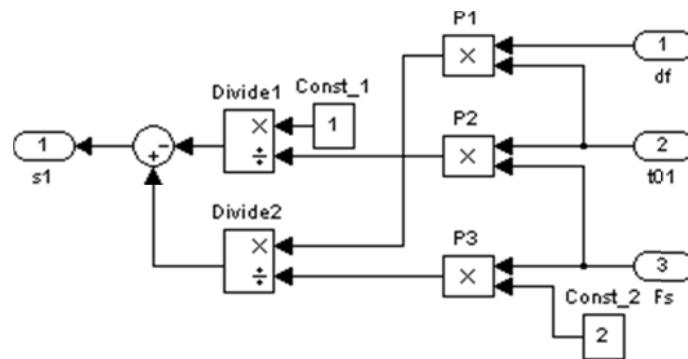


Рисунок 3.19 – Модель Fun_s1 розрахунку величини ковзання (s_1)

На рис. 3.19 представлена субмодель Fun_s1 розрахунку величини ковзання s_1 у точці 1. Субмодель приймає на входи величини параметрів: швидкість зміни частоти напруги генератора df , тривалість інтервалу часу між точками 0 і 1 t_{01} і частоту мережі F_s . Використовуючи стандартні оператори Simulink, проводяться обчислення за формулою (2.14), визначаючи величину ковзання s_1 у точці 1. Отримана величина подається на вихід s_1 субмоделі.

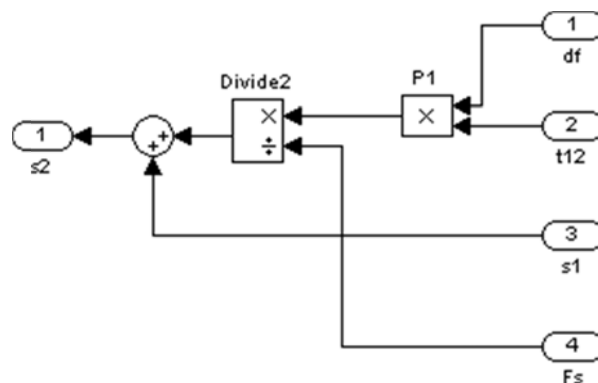


Рисунок 3.20 – Модель Fun_s2 розрахунку величини ковзання (s_2)

На рис. 3.20 представлена субмодель Fun_s2 розрахунку величини ковзання s_2 у точці 2. Субмодель приймає на входи величини: швидкість зміни частоти напруги генератора df , тривалість інтервалу часу між точками 1 і 2 t_{12} , ковзання у точці 1 s_1 і частоту мережі F_s . Використовуючи стандартні оператори Simulink, проводяться обчислення за формулою (3.15), визначаючи величину ковзання s_2 у точці 2. Отримана величина подається на вихід s_2 субмоделі.

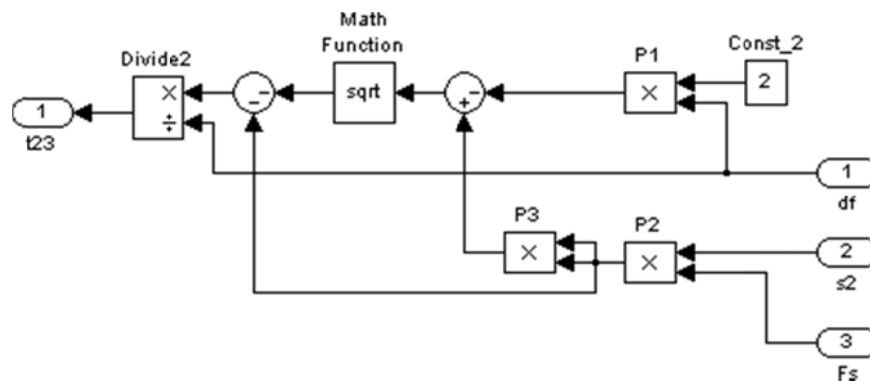


Рисунок 2.21 – Субмодель Fun_t23 розрахунку інтервалу часу до наступного збігу фаз (t_{23})

На рис. 2.21 представлена субмодель Fun_t23 розрахунку інтервалу часу t_{23} до наступного збігу фаз. Субмодель приймає на входи величини параметрів: швидкість зміни частоти напруги генератора df , ковзання у точці 2 s_2 і частоту мережі F_s . Використовуючи стандартні оператори Simulink, проводяться обчислення за формулою (3.18), визначають величину інтервалу часу до наступного збігу фаз напруг генератора і мережі t_{23} . Отримана величина подається на вихід t_{23} субмоделі Fun_t23.

Субмодель S_is_max, представлена на рис. 3.22, визначає величину максимального значення кидка струму генератора і виводить це значення на вихід is_max. Це виконується шляхом отримання сигналів миттєвих струмів з комбінованого сигналу m в елементі розкладання комбінованого сигналу, потім береться абсолютне значення сигналів струмів, щоб врахувати максимуми на негативній півхвилі струму.

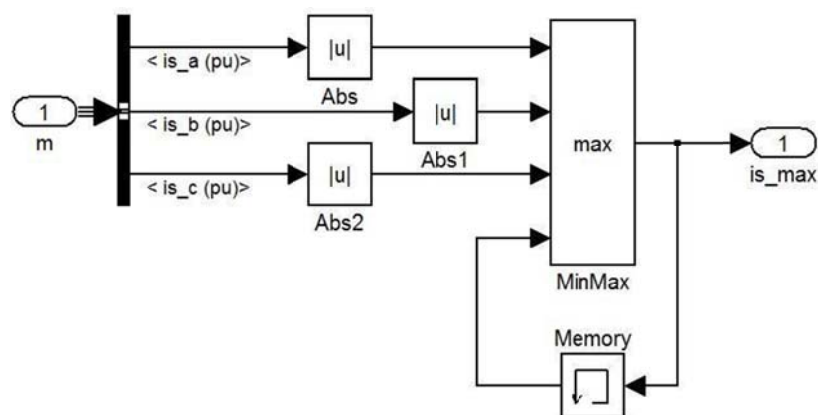


Рисунок 3.22 – Субмодель визначення максимального ударного струму генератора

Абсолютні значення сигналів струмів, разом з раніше отриманими та збереженими в елементі Memory, подаються на елемент визначення максимального сигналу, що забезпечує постійне розміщення в елементі Memory максимального на поточний момент часу сигналу.

3.4. Моделювання процесу включення синхронного генератора на паралельну роботу з мережею

У системі Simulink версії R2009a проведемо моделювання процесу включення синхронного генератора на паралельну роботу з мережею, використовуючи розроблену вище модель і систему управління.

Моделювання проведемо для різних величин тягового моменту приводу, при цьому для кожного значення тягового моменту проводитимемо серію розрахунків для різного стартового положення фази напруги мережі, зокрема проводитимемо розрахунки від 0 до 360 ел. градусів з кроком 15 ел. градусів. Це дозволить оцінити діапазон зміни величин максимальних ударних струмів і моментів при різних кутах проходження точки збігу частот генератора і мережі. Звичайно, можливо, що деяке відхилення потрапить всередину кроку по куту, але дрібніший крок значно збільшить число модельних розрахунків.

Вихідні параметри для конкретного генератора, який заданий у завданні, були взяті з бібліотеки елементів SimPowerSystems для генератора потужністю 2 МВА і напруги 10 кВ.

Було проведено три цикли розрахунків при різних значеннях тягового зусилля, що подається на синхронний генератор (P_m рівні 0,10; 0,06 і 0,04 в.о.), було виконано моделювання при різних стартових значеннях кута фази напруги мережі. Наприкінці кожного запуску моделювання знімалися показання по максимальному ударному струму і моменту, які вдалося отримати при відпрацюванні системою управління підключення синхронного генератора.

Результати моделювання зведені у таблицю 3.1.

					171.4321.КР.ПЗ.РЗ	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Для того, щоб якось систематизувати отримані результати, результати моделювання зазнали невеликої обробки. Оскільки стартовий кут фази напруги мережі не є пов'язаним показником для різних циклів розрахунку, то результати моделювання були оброблені таким чином: відшукувався мінімум величини ударного струму в циклі, і цей результат приймався за нуль для відліку кута фази напруги мережі.

Величини максимального ударного моменту в відносних одиницях практично відповідають величині максимального ударного струму, тому додатково його можна не розглядати.

Таблиця 3.1 – Результати моделювання процесу підключення синхронного генератора на паралельну роботу з мережею

Тяговий момент, в.о.	0,1		0,06		0,04	
Швидкість зміни ковзання, Гц / с	0,81		0,48		0,28	
Фаза напруги мережі, ел. град.	I _{max} , в.о.	M _{max} , в.о.	I _{max} , в.о.	M _{max} , в.о.	I _{max} , в.о.	M _{max} , в.о.
0	0,68	0,69	0,59	0,59	0,61	0,61
15	0,74	0,75	0,65	0,66	0,66	0,66
30	0,90	0,91	0,69	0,70	0,71	0,71
45	1,00	1,02	0,72	0,73	0,75	0,75
60	1,08	1,10	0,75	0,76	0,78	0,78
75	1,20	1,20	0,79	0,79	0,79	0,79
90	1,34	1,34	0,85	0,86	0,79	0,80
105	1,28	1,30	0,88	0,88	0,83	0,84
120	1,31	1,31	0,90	0,90	0,86	0,87
135	1,35	1,35	0,92	0,93	0,88	0,89
150	1,45	1,45	1,07	1,07	0,90	0,91
165	1,46	1,45	0,98	0,98	0,93	0,93
180	1,60	1,58	0,98	0,98	0,95	0,95
195	1,50	1,50	1,14	1,14	0,97	0,97
210	1,56	1,55	1,12	1,12	0,98	0,98

225	1,52	1,51	1,18	1,18	0,98	0,98
240	1,56	1,54	1,15	1,16	0,98	0,98
255	1,64	1,63	1,26	1,26	0,85	0,85
270	1,64	1,62	1,22	1,23	0,71	0,71
285	1,74	1,73	1,33	1,33	0,70	0,70
300	1,86	1,84	1,31	1,31	0,68	0,68
315	1,76	1,74	1,31	1,31	0,67	0,67
330	1,19	1,24	1,33	1,33	0,66	0,66
345	0,74	0,74	1,36	1,36	0,64	0,64
360	0,68	0,68	0,59	0,39	0,61	0,61
Максимальне	1,86	1,84	1,36	1,36	0,98	0,98
Мінімальна	0,68	0,69	0,39	0,39	0,61	0,61

За отриманими результатами побудуємо графік залежності максимального ударного струму від початкового кута фази для різних величин тягового моменту, що прикладається до генератора в кінці процедури синхронізації. Для автоматизації побудови графіку використовуємо скрипт MATLABa `grafic_Rez`, представлений в Додатку Б. У скрипті проведено згладжування результуючих графіків. Результат представлений на рис. 3.23.

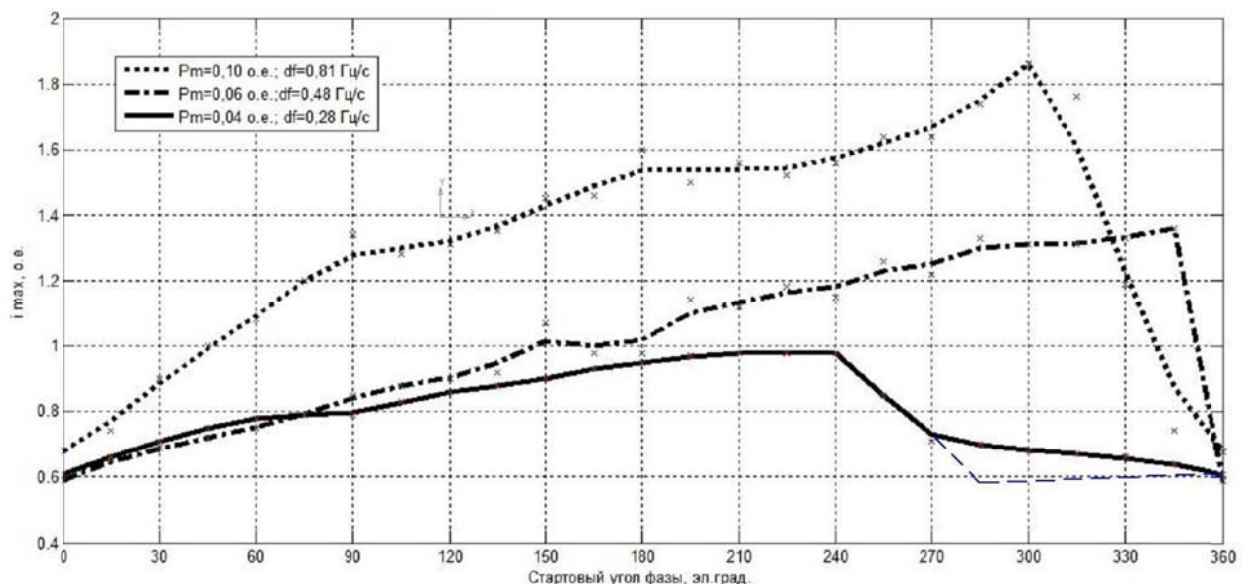


Рисунок 3.23 – Залежності максимального ударного струму від початкового кута фази напруги для різних величин тягового моменту

Аналізуючи отримані результати, бачимо, що графіки мають характерно виражений максимум, що пояснюється тим, що при деякому співвідношенні кутів фаз напруги генератора і мережі доводиться виконувати включення викидача при досить великому ковзанні, тому що при меншому ковзанні немає точки збігу фаз.

В результаті моделювання були отримані можливі діапазони величин ударних струмів при включенні синхронного генератора на паралельну роботу мережею при різних швидкостях зміни ковзання генератора при підході до точки рівності частот генератора і мережі.

Оскільки залежність величини ударного струму від початкового кута фази практично лінійна, а отримати при синхронізації будь-який початковий кут рівноймовірно, то ймовірність отримання максимальних і мінімальних ударних струмів приблизно дорівнює один одному.

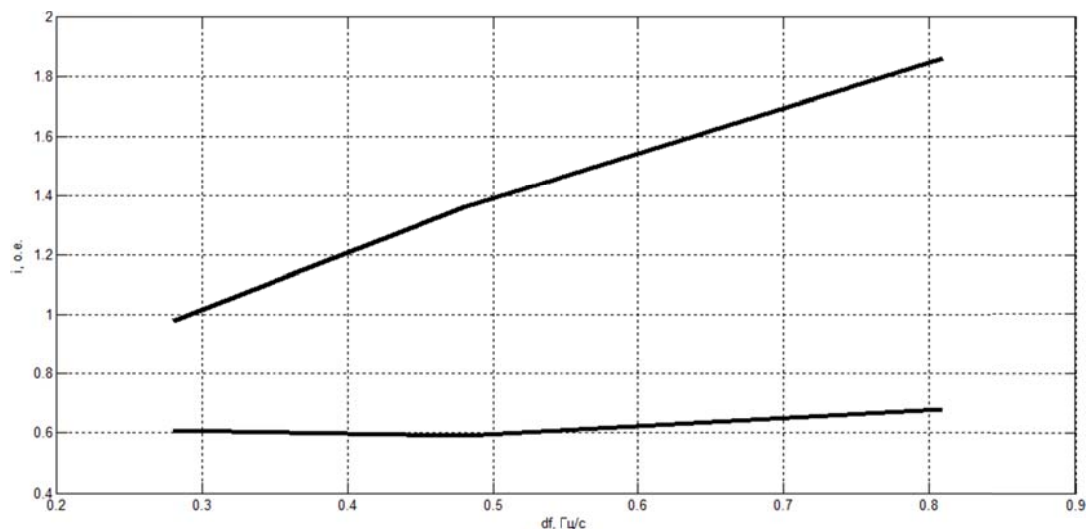


Рисунок 3.24 – Залежності максимальних і мінімальних рівнів ударного струму від швидкості зміни ковзання генератора

На рис. 3.24 наведені залежності можливих максимальних і мінімальних рівнів ударного струму від швидкості зміни ковзання генератора (df) при підході до точки рівності частот генератора і мережі. З графіків можна зробити висновок, що, виконуючи синхронізацію при $df = 0,28$ Гц/с, ударні струми ні-

коли не перевищать номінальних значень, а якщо виконувати синхронізацію при $df = 0,40$ Гц/с, ударні струми приблизно у 30% випадків включення становитимуть від номінального значення до величини 120% від номінального

					171.4321.КР.ПЗ.РЗ	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

					171.4321.КР.ПЗ.Р4			
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата				
Розробник		Мальованний П. С.			ОХОРОНА ПРАЦІ	Літ.	Арк.	Аркушів
Консультант		Тубальцев А. М.					71	
Н. контр.		Добрінова Л. П.				НУК імені адмірала Макарова		
Керівник		Буряк В. С.						
Зав. каф.		Рябенський В. М.						

Розділ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

Одна з найважливіших державних задач – охорона життя та здоров'я громадян в процесі їх трудової діяльності, створення безпечних та нешкідливих умов праці.

За даними Всесвітньої організації охорони праці смертність від нещасних випадків на сьогодні займає третє місце після серцево-судинних і онкологічних захворювань, причому переважно гинуть працездатні люди віком до 40 років. Аналіз причин смертності в Україні (1994-1998 рр.) показує, що основною причиною смертності чоловіків у працездатному віці є нещасні випадки, отруєння, травми (30-35% усіх смертей у цьому віці).

Охорона праці відіграє важливу роль, як суспільний чинник, оскільки, якими б вагомими не були трудові здобутки, вони не можуть компенсувати людині втраченого здоров'я, а тим більше життя.

Окрім соціального, охорона праці має, безперечно, важливе економічне значення – це і висока продуктивність праці, зниження витрат на оплату лікарняних, компенсацій за важкі та шкідливі умови праці тощо. Фахівці Міжнародної організації праці (МОП) підраховали, що економічні витрати, пов'язані з нещасними випадками, складають 1% світового валового національного продукту.

За статистичними даними МОП кількість нещасних випадків на виробництві останнім часом зросла і становить 125 млн. чол. щорічно, з них близько 220 тис. гине.

Рівень травматизму і профзахворюваності значно вищий у країнах, що розвиваються, ніж у промислово розвинених державах.

На думку іноземних фахівців, які за програмою МОП працювали в Україні, велика кількість нещасних випадків зі смертельними наслідками пояснюється п'ятьма основними причинами: незадовільною підготовкою робітників і роботодавців з питань охорони праці; відсутністю належного контролю за станом безпеки на робочих місцях та виконанням встановлених норм; недо-

					171.4321.КР.ПЗ.Р4	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

статнім забезпеченням працюючих засобами індивідуального захисту; повільним впровадженням засобів та приладів колективної безпеки на підприємствах; спрацьованістю засобів виробництва.

Правовою основою законодавства щодо охорони праці є Конституція України, Закони України: *“Про охорону праці”*, *“Про охорону здоров’я”*, *“Про пожежну безпеку”*, *“Про використання ядерної енергії та радіаційний захист”*, *“Про забезпечення санітарного та епідеміологічного благополуччя населення”*, а також Кодекс законів про працю України (КЗпП).

Основоположним законодавчим документом в галузі охорони праці є Закон України *“Про охорону праці”*, дія якого поширюється на всі підприємства, установи і організації незалежно від форм власності та видів їх діяльності, на усіх громадян, які працюють, а також залучені до праці на цих підприємствах.

Охорона праці – це система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних та лікувально-профілактичних заходів та засобів, спрямованих на збереження здоров’я та працездатності людини в процесі праці.

4.1. Аналіз небезпечних та шкідливих факторів, впливаючих на людину

Небезпечний виробничий фактор – це такий виробничий фактор, вплив якого на працюючого обумовлений умовами, які призводять до травми або іншого несподіваного різкого погіршення здоров’я. Результатом впливу небезпечного виробничого фактора є нещасний випадок.

Шкідливий виробничий фактор – це такий виробничий фактор, вплив якого на працюючого приводить до захворювання або зниження працездатності. Результат впливу цього фактору – професійне захворювання.

За характером та природою впливу всі небезпечні та шкідливі фактори поділяються на чотири групи: фізичні, хімічні, біологічні та психофілогічні.

Їх основна характеристика:

1) фізичні:

					171.4321.КР.ПЗ.Р4	Арк.
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		73

- підвищена швидкість руху повітря;
- підвищена або понижена вологість;
- підвищений або понижений атмосферний тиск;
- недостатня освітленість;
- конструкції, що руйнуються;
- підвищений рівень статичної електрики та ін.

2) хімічні:

- хімічні елементи, речовини та сполуки, які перебувають у різному агрегатному стані (твердому, газоподібному, рідкому);
- які різними шляхами проникають в організм людини (через органи дихання, через шлунково-кишковий тракт, через шкірні покриви та слизові оболонки);
- які за характером дії виділяють такі речовини (токсичні, наркотичні, подразнюючі, задушливі, сенсibiliзуючі, канцерогенні, мутагенні, такі, що впливають на репродуктивну функцію).

3) біологічні:

- макроорганізми (рослини та тварини);
- мікроорганізми (бактерії, віруси, рикетсії, спірохети, грибки, найпростіші).

4) психофізіологічні

- фізичні перевантаження (статичні, динамічні);
- нервово-психічні перевантаження (розумові перевантаження, перевантаження аналізаторів, монотонність праці, емоційні перевантаження).

Аналіз нещасних випадків у промисловості, які супроводжуються тимчасовою втратою працездатності потерпілими свідчить про те, що кількість травм, викликаних дією електрики, порівняно невелика і складає 0,5-1% від загальної кількості нещасних випадків, що трапляються в промисловості. Проте слід зауважити, що з загальної кількості нещасних випадків зі смертельним наслідком на виробництві 20-40% трапляються внаслідок ураження

					171.4321.КР.ПЗ.Р4	Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

електрострумом, що більше, ніж внаслідок дії інших причин, причому близько 80% смертельних уражень електричним струмом відбувається в електроустановках напругою до 1000 В.

Електротравма – це травма, викликана дією електричного струму або електричної дуги. Електротравми поділяються на два види: електротравми, які виникають при проходженні струму через тіло людини, і електротравми, поява яких не пов'язана з проходженням струму через тіло людини. Ураження людини в другому випадку пов'язується з опіками, засліпленням електричною дугою, падінням, а відтак – суттєвими механічними ушкодженнями.

Проходячи через тіло людини, електричний струм справляє термічну, електричну та механічну (динамічну) дію. Це фізико-хімічні процеси, притаманні живій матерії. Одночасно електричний струм здійснює і біологічну дію, яка є специфічним процесом, властивим лише живій тканині.

Термічна дія струму проявляється через опіки окремих ділянок тіла, нагрівання до високої температури кровоносних судин, нервів, серця, мозку та інших органів, які знаходяться на шляху струму, що викликає в них суттєві функціональні розлади.

Електролітична дія струму характеризується розкладом органічної рідини, в тому числі і крові, що супроводжується значними порушеннями їх фізико-хімічного складу.

Механічна (динамічна) дія струму – це розшарування, розриви та інші подібні ушкодження тканин організму, в тому числі м'язової тканини, стінок кровоносних судин, судин легеневої тканини внаслідок електродинамічного ефекту, а також миттєвого вибухоподібного утворення пари від перегрітої струмом тканинної рідини та крові.

Біологічна дія струму проявляється через подразнення та збудження живих тканин організму, а також через порушення внутрішніх біологічних процесів, що відбуваються в організмі і котрі тісно пов'язані з його життєвими функціями.

					171.4321.КР.ПЗ.Р4	Арк.
						75
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

4.2. Види електричних травм

Місцева електротравма – яскраво виявлене порушення щільності тканин тіла, в тому числі кліток, викликане впливом електричного струму або електричної дуги.

Характерні місцеві електротравми – електричні опіки, електричні знаки, металізація шкіри, механічні пошкодження та електрофтальмія.

Електричні опіки – це ушкодження поверхні тіла під дією електричної дуги або великих струмів, що проходять через тіло людини. Опіки бувають двох видів: струмові, коли струм проходить через тіло людини, та дугові (під дією електричної дуги температурою понад 3500°C).

Електричний знак – це чітко окреслена пляма діаметром 1-5 мм сірого або блідо-жовтого кольору, що з'являється на поверхні шкіри людини, яка зазнала дії струму.

Електрометалізація – проникнення в шкіру частинок металу внаслідок його розбризкування та випаровування під дією струму. Вона може статися при коротких замиканнях, від'єднаннях роз'єднувачів та рубильників під навантаженням. При цьому дрібні частинки розплавленого металу під впливом динамічних сил та теплового потоку розлітаються у всі сторони з великою швидкістю. Ушкоджуються відкриті частини тіла – руки та обличчя. Уражена ділянка тіла має шорстку поверхню.

Механічні ушкодження є в більшості випадків наслідком різких судомних скорочень м'язів під впливом струму, котрий проходить через тіло людини. Внаслідок цього можуть відбутися розриви сухожиль, шкіри, кровоносних судин та нервової тканини і навіть переломи кісток.

Електрофтальмія – це запалення зовнішніх оболонок очей, що виникає під впливом потужного потоку ультрафіолетових променів. Таке опромінення можливе при утворенні електричної дуги (при короткому замиканні). Електрофтальмія спостерігається приблизно у 3% потерпілих від струму.

					171.4321.КР.ПЗ.Р4	Арк.
						76
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Інфрачервоні (теплові) промені також шкідливі для очей, але лише на близькій відстані або при інтенсивному і тривалому опроміненні.

Загальна електротравма (електричний удар) – ураження (або виникнення загрози ураження) всього організму внаслідок порушення нормальної діяльності життєво важливих органів та систем.

Електричний удар – збудження живих тканин організму електричним струмом, що супроводжується судомним скороченням м'язів.

В залежності від наслідку ураження електричні удари можна умовно розділити на 5 ступенів:

1. Судомні ледь відчутні скорочення м'язів;
2. Судомні скорочення м'язів, що супроводжуються сильним болем, що ледь переноситься без втрати свідомості;
3. Судомне скорочення м'язів з втратою свідомості, але зі збереженням дихання і роботи серця;
4. Втрата свідомості та порушення серцевої діяльності або дихання (або одного і другого разом);
5. Клінічна смерть, тобто відсутність дихання та кровообігу.

4.3. Фактори, що впливають на наслідки ураження струмом

Зі зростанням сили струму небезпека ураження ним тіла людини зростає. Розрізняють порогові значення струму (при частоті 50 Гц):

- пороговий відчутний струм – 0,5-1,5 мА при змінному струмі і 5-7 мА при постійному струмі;
- пороговий невідпускний струм (струм, що викликає при проходженні через тіло людини нездоланні судомні скорочення м'язів руки, в якій затиснений провідник) – 10-15 мА при змінному струмі і 50-80 мА при постійному струмі;

					171.4321.КР.ПЗ.Р4	Арк.
						77
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

- пороговий фібриляційний струм (струм, що викликає при проходженні через організм фібриляцію серця) – 100 мА при змінному струмі і 300 мА при постійному струмі.

Електричний опір тіла людини – це опір струму, який проходить по ділянці тіла між двома електродами, прикладеними до поверхні тіла. Він складається з опору тонких зовнішніх шарів шкіри, які контактують з електродами, і з опору внутрішніх тканин тіла. Опір людини складається з ємнісного та активного опорів.

Величина електричного опору тіла залежить від стану рогового шару шкіри, наявності на її поверхні вологи та забруднень, від місця прикладання електродів, частоти струму, величини напруги, тривалості дії струму. Ушкодження рогового шару (порізи, подряпини, волога, потовиділення) зменшують опір тіла, а відтак – збільшують небезпеку ураження. Опір тіла людини в практичних розрахунках приймається рівним 1000 Ом.

Постійний струм приблизно у 4-5 разів безпечніший, ніж змінний струм частотою 50 Гц. Порівняльна оцінка постійного та змінного струмів справедлива лише для напруг до 500 В. Вважається, що при більш високих напругах постійний струм стає небезпечнішим, ніж змінний частотою 50 Гц.

4.4. Розрахунок захисного заземлення

Розрахувати сполучений заземлюючий пристрій (СЗП) для цехової трансформаторної підстанції 6/0,4 кВ, приєднаної до електромережі з ізольованою нейтраллю. При цьому прийняти: розімкнутий контур, як вертикальний електрод – куточок шириною $b_{\epsilon} = 16$ мм; $\epsilon = 50$ м; горизонтальний електрод $S_{\epsilon} = 40$ мм²; $d_{\Gamma} = 12$ мм.

Дані: Грунт кам'янистий, $H_0 = 5$ м, $l_{\text{воз}} = 15$ км, $l_{\text{каб}} = 60$ км, $n_{\epsilon} = 6$ шт, $l_{\epsilon} = 2,5$ м, $a_{\text{в}} = 5$ м, $R_{\epsilon} = 15$ Ом.

Розрахунковий струм замикання на землю:

					171.4321.КР.ПЗ.Р4	Арк.
						78
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

$$J_3 = \frac{U_{\text{л}} \cdot (35 \cdot l_{\text{каб}} + l_{\text{воз}})}{350} = \frac{6 \cdot (35 \cdot 60 + 15)}{350} = 36,3 \text{ А}$$

де $U_{\text{л}}$ – лінійна напруга мережі, кВ; $l_{\text{каб}}$ – загальна довжина підключених до мережі кабельних ліній, км; $l_{\text{воз}}$ – загальна довжина підключених до мережі ЛЕП, км.

Визначення питомого опору ґрунту:

$$\rho_{\text{расч}} = \rho_{\text{табл}} \cdot \psi = 700 \cdot 1,3 = 910 \text{ Ом} \cdot \text{м},$$

де $\rho_{\text{табл.}} = 700 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ – питомий опір ґрунту; $\psi = 1,3$ – кліматичний коефіцієнт.

Визначення необхідності штучного заземлювача й обчислення його необхідного опору.

Опір заземлювача $R_3^{\text{н}}$ вибирається залежно від U електрообладнання й $\rho_{\text{расч}}$ у місці спорудження СЗП, а також режиму нейтралі даної електромережі:

$$R_3^{\text{н}} = \frac{0,25 \rho}{J_3} = \frac{0,25 \cdot 910}{36,3} = 6,3 \text{ Ом} \leq 100 \text{ Ом}.$$

$R_e > R_3^{\text{н}}$, $\Rightarrow$ штучний заземлювач необхідний. Його необхідне заземлення:

$$R_u \leq \frac{R_e \cdot R_3^{\text{н}}}{R_e - R_3^{\text{н}}} \leq 10,9 \text{ Ом}.$$

Визначення довжини горизонтальних електродів для розімкнутого контуру:

$$l_2 = n \cdot a \cdot b = 6 \cdot 5 = 30 \text{ м},$$

де a – відстань між вертикальними електродами n .

Розрахункове значення опору вертикального електрода:

$$\begin{aligned} H &= H_0 + 0,5 \cdot l_e = 05 + 0,5 \cdot 2,5 = 1,75 \text{ м} \\ R_e &= \frac{\rho_{\text{расч}}}{2 \cdot \pi \cdot l_e} \cdot \left(\ln \frac{2 \cdot l_e}{d_e} + \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{4 \cdot H + l_e}{4 \cdot H - l_e} \right) = \\ &= \frac{910}{2 \cdot 3,14 \cdot 2,5} \cdot \left(\ln \frac{2 \cdot 2,5}{0,016} + \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{4 \cdot 1,75 + 2,5}{4 \cdot 1,75 - 2,5} \right) = 354 \text{ Ом} \end{aligned}$$

Розрахункове значення опору горизонтального електрода:

					171.4321.КР.ПЗ.Р4	Арк.
						79
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

$$R_z = \frac{\rho_{расч}}{2 \cdot \pi \cdot l_z} \cdot \ln \frac{l_z^2}{d_z \cdot H_0} =$$

$$= \frac{910}{2 \cdot 3,14 \cdot 30} \cdot \ln \frac{30^2}{0,012 \cdot 0,5} = 57 \text{ Ом}$$

Коефіцієнти використання для вертикальних і горизонтальних електродів рівні: $\eta_B = 0,73$, $\eta_T = 0,48$.

Розрахунковий опір групового заземлювача:

$$R = \frac{R_B \cdot R_z}{R_B \cdot \eta_z + R_z \cdot \eta_B \cdot n_B} =$$

$$= \frac{354 \cdot 57}{354 \cdot 0,48 + 57 \cdot 0,73 \cdot 6} = 48 \text{ Ом}$$

$R > R_u$, значить збільшуємо кількість електродів.

Приймаємо $n = 25$.

$$l_z = 125 \text{ м}$$

$$R_z = 17,2 \text{ Ом}$$

$$\eta_B = 0,63, \quad \eta_z = 0,32$$

$$R = 15,84 \text{ Ом}$$

$$R > R_u$$

$$n_B = 45$$

$$l_z = 225 \text{ м}$$

$$R_z = 10,3 \text{ Ом}$$

$$\eta_B = 0,58, \quad \eta_z = 0,29$$

$$R = 10,8 \text{ Ом}$$

$$R_K = R_e \cdot R / (R_e + R) \leq R^M_z$$

$$R_L = 15 \cdot 10,8 / (15 + 10,8) = 6,27 \text{ Ом} \leq 6,3 \text{ Ом};$$

R_e – природний опір, Ом;

R_u – опір штучного заземлювача, Ом;

R_B – опір вертикального електрода, Ом;

R_z – опір горизонтального електрода, Ом;

R – опір групового заземлювача, Ом;

R_K – загальний опір комбінованого заземлювача, Ом;

					171.4321.КР.ПЗ.Р4	Арк.
						80
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

η_v, η_g – коефіцієнт використання вертикального й горизонтального електродів;
 a_g – відстань між електродами, м;
 l_g – довжина електродів, м;
 n_g – кількість вертикальних електродів.

Схема розташування вертикального заземлювача представлена на рис. 5.1.

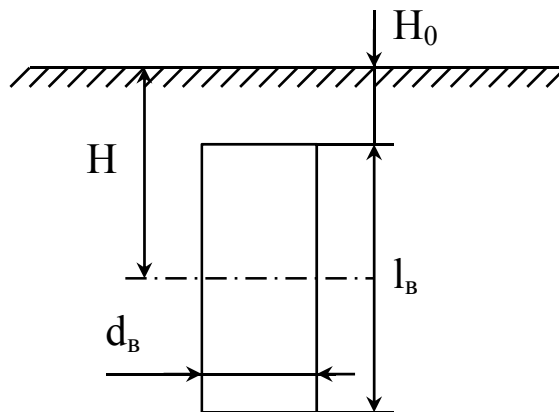


Рисунок 5.1 – Вертикальний електрод

4.5. Системи засобів і заходів безпечної експлуатації електроустановок

Застосовувані в електроустановках захисні заходи умовно можна поділити на дві групи: ті, що забезпечують безпеку при нормальному режимі роботи електроустановок і ті, що забезпечують безпеку при аварійному режимі роботи.

Електрична ізоляція – це шар діелектрика або конструкція, виконана з діелектрика, котрим вкривається поверхня струмоведучих частин, або котрим струмоведучі частини відділяються одна від одної. Ізоляція запобігає протіканню струмів через неї завдяки великому опору.

В електроустановках напругою до 1000 В застосування ізольованих проводів забезпечує достатній захист від ураження при дотику до них. Однак ізольовані дроти, котрі знаходяться під напругою понад 1000 В, не менш небезпечні, ніж оголені. В цих випадках одним із засобів забезпечення безпеки

					171.4321.КР.ПЗ.Р4	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		81

є стаціонарні огорожувальні пристрої. Вони поділяються на суцільні та сітчасті.

Блокуванням називається автоматичний пристрій, за допомогою якого запобігають неправильним, небезпечним для людини діям (механічне, електричне і електромагнітне блокування).

Електричне блокування дозволяє вимикати напругу при відкриванні дверей огорожень, дверей корпусів та кожухів або при знятті кришок.

Розташування струмоведучих частин на недосяжній висоті або в недоступному місці забезпечує безпеку без огорожень та блокувань. Вибираючи висоту підвішування, слід враховувати можливість ненавмисного дотику до частин, що перебувають під напругою, довгими металевими предметами.

Низькі напруги. При напрузі до 42 В струм, який проходить через тіло людини, безпечний. Джерелами малої напруги є знижувальні трансформатори, акумулятори, випрямні установки, перетворювачі частот, батареї гальванічних елементів.

Вирівнювання потенціалів – це зниження напруг дотику та кроку між точками електричної ланки, до яких можливий одночасний дотик або на котрих може одночасно стояти людина.

Захисне заземлення – це навмисне електричне з'єднання з землею або з її еквівалентом металевих не струмоведучих частин, котрі можуть опинитись під напругою. Принцип дії захисного заземлення – зниження до безпечних значень напруг дотику та кроку, зумовлених замиканням на корпус.

Захисне вимкнення – це швидкодіючий захист, котрий забезпечує автоматичне вимкнення електроустановки при виникненні небезпеки ураження струмом.

4.6. Система електрозахисних засобів

Електрозахисні засоби – це переносні засоби, призначені для захисту людей, котрі працюють з електроустановками, від ураження електричним струмом, від дії електричної дуги та електромагнітного поля.

					171.4321.КР.ПЗ.Р4	Арк.
						82
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

Ізолювальні електрозахисні засоби (основні та допоміжні) призначені для ізоляції людини від частин електрообладнання, котрі знаходяться під напругою, а також від землі.

Основними називають такі ізолювальні електрозахисні засоби, ізоляція котрих надійно витримує робочу напругу електроустановки і за допомогою котрих дозволяється доторкнутись до струмоведучих частин, котрі знаходяться під напругою.

Додатковими називають такі ізолювальні електрозахисні засоби, котрі самі не можуть забезпечити безпеку персоналу при даній напрузі електроустановки і є додатковим захисним заходом до основних ізолювальних електрозахисних засобів.

					171.4321.КР.ПЗ.Р4	Арк.
						83
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Висновки

У кваліфікаційній роботі розглянуті методи включення синхронного генератора на паралельну роботу з мережею. Запропоновано метод визначення моменту подачі команди на включення магнітного пускача, що забезпечує точну синхронізацію синхронного генератора, з урахуванням часу включення магнітного пускача. Визначення моменту включення здійснюється на підставі обробки миттєвих значень напруг генератора та мережі. Аналізуючи огинаючу напруги ковзання генератора, визначається тривалість періодів між збігами фаз напруг, за отриманими періодами визначається швидкість зміни ковзання генератора, поточне ковзання та очікуваний період часу до збігу фаз напруг. На підставі величини очікуваного періоду формується імпульс на включення вимикача.

У програмі Simulink з використанням бібліотеки SimPowerSystems розроблена модель включення синхронного генератора на паралельну роботу з мережею і система керування, яка реалізує запропонований метод.

Шляхом проведення циклу моделювання була доведена працездатність запропонованого методу керування та отримані характеристики, що показують очікувані величини ударних струмів синхронізації при різних швидкостях зміни ковзання генератора.

Запропонований метод дозволяє значно скоротити набір вимірювального обладнання для проведення процесу синхронізації, залишивши тільки трансформатори напруги для напруги генератора і мережі, що зменшує вартість встановленого обладнання. Також запропонований метод дозволяє скоротити час виконання операції синхронізації.

					171.4321.КР.ПЗ.Висновки	Арк.
						84
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. **Кузнєцов Б.І.** Електричні станції та підстанції. – К.: Вища школа, 2010. – 472 с.
2. **Hughes T.P.** *Networks of Power: Electrification in Western Society, 1880–1930.* Johns Hopkins University Press, 1983.
3. **IEEE Standard 1159-2019:** IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality.
4. **IEC 60034-1:** Rotating electrical machines – Part 1: Rating and performance.
5. **Кузнєцов Б.І.** Електричні машини. – К.: Вища школа, 2012. – 468 с.
6. **Fitzgerald A.E., Kingsley C., Umans S.D.** *Electric Machinery.* 7th Edition. – McGraw-Hill, 2013.
7. **IEEE Std C37.102-2006:** IEEE Guide for AC Generator Protection.
8. **Siemens AG.** SIPROTEC 5 System Manual. – Siemens, 2020.
9. **ABB.** SYNCHROTECT Automatic Synchronizers – Technical Application Guide. – ABB, 2019.
10. **ABB.** SYNCHROTECT 6 Automatic Synchronizer — Technical Application Guide. – ABB, 2021.
11. **GE Multilin G60 Instruction Manual.** – General Electric, 2022.
12. **IEC 61850 Standard,** International Electrotechnical Commission, 2013.

					171.4321.КР.ПЗ.Джерела	Арк.
						85
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

ДОДАТОК А

Програма MATLAB для побудови графіків напруг ковзання та гра-

фіків зміни кута між фазами напруг:

```
clc, clear all, close
all f0=49;
fk=5
0.5;
df=0
.1;
fs=50; fis00=0; fis01=0.4*pi; fis02=1.6*pi;
fis03=1.*pi; tk=(fk-f0)/df;
t=0:0.001:tk;
f_t=f0+df.
*t;
s=(f_t-
fs)/fs;

fis0=2*pi*fs*t+fis00;
fig0=2*pi*f0*t+2*pi*df*t.^2/2+fi
s00;
fig1=2*pi*f0*t+2*pi*df*t.^2/2+fi
s01;
fig2=2*pi*f0*t+2*pi*df*t.^2/2+fi
s02;
fig3=2*pi*f0*t+2*pi*df*t.^2/2+fi
s03;

fi0=2*pi*(f0-
fs)*t+2*pi*df*t.^2/2+fis00;
fi1=2*pi*(f0-
fs)*t+2*pi*df*t.^2/2+fis01;
fi2=2*pi*(f0-
fs)*t+2*pi*df*t.^2/2+fis02; fl=true;
while fl
    k=find(fi0>=2*pi);
    k1=find(fi1>=2*pi);
    k2=find(fi2>=2*pi);
    if length(k)>0 | length(k1)>0 |
        length(k2)>0 fi0(k)=fi0(k)-2*pi;
        fi1(k1)=fi1(k1)-
        2*pi;
        fi2(k2)=fi2(k2)-
        2*pi;
    else
        fl=false;
    end
end
```

					171.4321.КР.ПЗ.Додатки	Арк.
						86
Змн.	Арк.	№ документи	Підпис	Дата		

```

end
fl=t
rue;
while
e fl
    k=find(fi0<
    0);
    k1=find(fi1
    <0);
    k2=find(fi2
    <0);
    if length(k)>0 | length(k1)>0 |
        length(k2)>0 fi0(k)=fi0(k)+2*pi;
        fi1(k1)=fi1(k1)+2*pi;
        fi2(k2)=fi2(k2)+2*pi;
    else
        fl=false;
    end
end

U=sqrt(2)*sin(fis0)-
sqrt(2)*sin(fig0);
U1=sqrt(2)*sin(fis0)-
sqrt(2)*sin(fig1);
U2=sqrt(2)*sin(fis0)-
sqrt(2)*sin(fig2);
U3=sqrt(2)*sin(fis0)-sqrt(2)*sin(fig3);

hf=figure;
set(hf, 'Color', [1 1
1]);
h=plot(t, fi0, 'b');
set(h(1), 'Color', [0 0
1], 'LineWidth', 2); grid on;

hf=figure;
set(hf, 'Color', [1 1
1]);
h=plot(s, fi0, 'r', s, fi1, 'g--', s, fi2, 'b-.');
set(h(1), 'Color', [0 0 1], 'LineWidth', 2);
set(h(2), 'Color', [0 0 1], 'LineWidth', 2);
set(h(3), 'Color', [0 0
1], 'LineWidth', 2); grid on;
xlabel('s, о.е. ');
ylabel('fi, рад. ');

hf=figure;
set(hf, 'Color', [1 1
1]); h=plot(s, U);
set(h(1), 'Color', [0 0

```

					171.4321.КР.ПЗ.Додатки	Арк.
						87
Змн.	Арк.	№ документи	Підпис	Дата		


```
1], 'LineWidth', 2); grid on;
xlabel('s, o.e.');
```

```
ylabel('U, o.e.');
```

```
hf=figure;
set(hf, 'Color', [1 1
1]); h=plot(s,U1);
set(h(1), 'Color', [0 0
1], 'LineWidth', 2); grid on;
xlabel('s, o.e.');
```

```
ylabel('U, o.e.');
```

```
hf=figure;
set(hf, 'Color', [1 1
1]); h=plot(s,U2);
set(h(1), 'Color', [0 0
1], 'LineWidth', 2); grid on;
xlabel('s, o.e.');
```

```
ylabel('U, o.e.');
```

```
hf=figure;
set(hf, 'Color', [1 1
1]); h=plot(s,U3);
set(h(1), 'Color', [0 0
1], 'LineWidth', 2); grid on;
xlabel('s, o.e.');
```

```
ylabel('U, o.e.');
```

					171.4321.КР.ПЗ.Додатки	Арк.
						88
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

ДОДАТОК Б

Програма MATLAB `grafic_Rez` для побудови графіків результатів

моделювання:

```
function graphic_Rez
clc, clear all, close all
Fi=[0;15;30;45;60;75;90;105;120;135;150;165;180;195;...
210;225;240;255;270;285;300;315;330;345;360];
i_max1=[0.68;0.74;0.90;1.00;1.08;1.20;1.34;1.28;1.31;...
1.35;1.45;1.46;1.60;1.50;1.56;1.52;1.56;1.64;1.64;...
1.74;1.86;1.76;1.19;0.74;0.68];
Te_max1=[0.69;0.75;0.91;1.02;1.10;1.20;1.34;1.30;1.31;...
1.35;1.45;1.45;1.58;1.50;1.55;1.51;1.54;1.63;1.62;...
1.73;1.84;1.74;1.24;0.74;0.69];
i_max2=[0.59;0.65;0.69;0.72;0.75;0.79;0.85;0.88;0.9;...
0.92;1.07;0.98;0.98;1.14;1.12;1.18;1.15;1.26;1.22;...
1.33;1.31;1.31;1.33;1.36;0.59];
Te_max2=[0.59;0.66;0.7;0.73;0.76;0.79;0.86;0.88;0.9;...
0.925;1.07;0.98;0.98;1.14;1.12;1.18;1.16;1.26;...
1.23;1.33;1.31;1.31;1.33;1.36;0.59];
i_max3=[0.61;0.66;0.71;0.75;0.78;0.79;0.79;0.83;0.86;...
0.88;0.90;0.93;0.95;0.97;0.98;0.98;0.98;0.85;...
0.71;0.70;0.68;0.67;0.66;0.64;0.61];
Te_max3=[0.61;0.66;0.71;0.75;0.78;0.79;0.80;0.84;...
0.87;0.89;0.91;0.93;0.95;0.97;0.98;0.98;0.98;...
0.85;0.71;0.70;0.68;0.67;0.66;0.64;0.61];
df=[0.81 0.48 0.28];
imax=[max(i_max1) max(i_max2) max(i_max3)];
imin=[min(i_max1) min(i_max2) min(i_max3)];

i_max1s=FunSS(i_max1,0.3); i_max1s=FunSS(i_max1s,0.3);
i_max1s=FunSS(i_max1s,0.3); i_max2s=FunSS(i_max2,0.3);
i_max2s=FunSS(i_max2,0.3); i_max2s=FunSS(i_max2s,0.3);
i_max3s=FunSS(i_max3,0.3);

hgs=plot(Fi,i_max1s,':',Fi,i_max2s,'-.',Fi,i_max3s,'-');
hold on;
hg=plot(Fi,i_max1,'x',Fi,i_max2,'x',Fi,i_max3,'x');
set(hgs(1),'LineWidth',3,'Color',[0 0.0 0.0]);
set(hgs(2),'LineWidth',3,'Color',[0 0.0 0.0]);
set(hgs(3),'LineWidth',3,'Color',[0 0.0 0.0]);

grid on;
ylabel('i max, o.e. ');
xlabel('Стартовый угол фазы, эл.град. ');
hl=legend('Pm=0,10 o.e.; df=0,81 Гц/с',...
'Pm=0,06 o.e.;df=0,48 Гц/с',...
```

					171.4321.КР.ПЗ.Додатки	Арк.
						89
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

```

    'Pm=0,04 o.e.; df=0,28  $\Gamma_H/c$ ');

figure
hg=plot(df,imax, df,imin);
set(hg(1),'LineWidth',3,'Color',[0 0.0 0.0]);
set(hg(2),'LineWidth',3,'Color',[0 0.0 0.0]);
ylabel('i, o.e. ');
xlabel('df,  $\Gamma_H/c$ '); grid on;
end

function YR=FunSS(Y,k) n=length(Y);
imax=find(Y==max(Y));
imin=find(Y==min(Y));
for i=1:
    n-1
    if i==1
        dY(1,1)=((Y(n-1)+Y(2))/2-Y(i))*k;
        dY(n,1)=dY(1,1);
    else
        dY(i,1)=((Y(i-1)+Y(i+1))/2-Y(i))*k;
    end
end
YR=Y+dY;
YR(imax)=Y(imax); YR(imin)=Y(imin);
end

```

					171.4321.КР.ПЗ.Додатки	Арк.
						90
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		