

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва та транспорту
Кафедра “Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент”

“Допущено до захисту ”
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор
_____Петро ПЛЄШКОВ
“ ____ ” _____2022р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої
освіти
на тему
“Дослідження ефективності підвищення якості
електроенергії в розподільчих електричних
мережах
Research on the effectiveness of improving the
quality of electricity in distribution networks”

Виконав здобувач вищої освіти
2 курсу магістратури, групи ЕЕ-21М
ОПП «Електротехнічні системи
електроспоживання»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
_____Павло ВОЛКОРЕЗОВ
« ____ » _____2022 р.
Керівник роботи
к.т.н., професор
_____Петро ПЛЄШКОВ
« ____ » _____2022р.
Рецензент _____

Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва та транспорту

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Освітній ступінь магістр

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма Електротехнічні системи електроспоживання

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ Плешков П.Г.

«_____» _____ 2022 р.

ЗАВДАННЯ НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

_____ Волкорезова Павла Олександровича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) Дослідження ефективності підвищення якості електроенергії в розподільчих електричних мережах

2. Керівник роботи (проекту) Плешков Петро Григорович, к.т.н., професор

(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання студентом роботи до захисту 5.12.2022 р.

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту) _____
Нормування якості електричної енергії в системах електропостачання; Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення; Сучасні технології підвищення якості електроенергії при її передачі й розподілу; Провали напруги в системах електропостачання; Технічні засоби зниження несиметрії напруги; Прилади для вимірювання показників якості електроенергії; Причини появи вищих гармонік в системах електропостачання промислових підприємств; Розрахунки економічних збитків, що зумовлені зниженням якості електроенергії; Охорона праці

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Економічна частина</i>	<i>к.е.н., доц. Журило І.В.</i>		
<i>Охорона праці</i>	<i>к.т.н, доц. Савеленко І.В.</i>		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Нормування якості електричної енергії в системах електропостачання</i>	7.10.22	
2	<i>Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення</i>	15.10.22	
3	<i>Сучасні технології підвищення якості електроенергії при її передачі й розподілу</i>	22.10.22	
4	<i>Провали напруги в системах електропостачання</i>	4.11.22	
5	<i>Технічні засоби зниження несиметрії напруги</i>	7.11.22	
6	<i>Прилади для вимірювання показників якості електроенергії</i>	11.11.22	
7	<i>Причини появи вищих гармонік в системах електропостачання промислових підприємств</i>	14.11.22	
8	<i>Розрахунки економічних збитків, що зумовлені зниженням якості електроенергії</i>	19.11.22	
9	<i>Охорона праці</i>	26.11.22	
10	<i>Оформлення пояснювальної записки ВКР</i>	2.12.22	
11	<i>Оформлення презентаційної частини ВКР</i>	5.12.22	

Дата видачі завдання
Підпис керівника _____

« ____ » _____ 2022р.

Завдання прийнято до виконання
Підпис здобувача _____

« ____ » _____ 2022 р.

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота: 136 стор., 48 рис., 11 табл., 14 джерел

Метою даної роботи є дослідження сучасних технологій підвищення якості електроенергії для покращення енергетичних показників для передачі та розподілу електроенергії в електричних мережах.

У роботі був проведений аналіз існуючої системи оцінки показників якості перетворення енергії; розглянуті показники споживання енергії і їх особливості; визначено зниження працездатності мереж залежно від якості перетворення.

Детальну увагу приділено розрахунку та визначенню коефіцієнта несиметрії та розрахунку вищих гармонік в системах електропостачання.

У роботі представлено на розгляд та проаналізовано принцип дії приладів для вимірювання показників якості електроенергії, які мають практичне застосування у мережах та на підприємствах.

Проведено розрахунки економічних збитків, що зумовлені зниженням якості електроенергії та представлені шляхи їх зменшення.

Ключові слова: ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ, ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПЕРЕШКОДИ, ЕНЕРГОПАРАМЕТРИ, ПРИЛАДИ ВИМІРЮВАННЯ

ABSTRACT

Qualification work: 136 pages, 48 figures, 11 tables, 14 sources

The purpose of this work is to research modern technologies for improving the quality of electricity to improve energy indicators for the transmission and distribution of electricity in electrical networks.

The paper analyzed the existing system for evaluating energy conversion quality indicators; considered indicators of energy consumption and their features; a decrease in network performance depending on the quality of conversion is determined.

Detailed attention is paid to the calculation and determination of the asymmetry coefficient and the calculation of higher harmonics in power supply systems.

The work presents for consideration and analyzes the principle of operation of devices for measuring electricity quality indicators, which have practical application in networks and enterprises.

Calculations of economic losses caused by a decrease in the quality of electricity have been carried out and ways of reducing them have been presented.

Keywords: QUALITY OF ELECTRICAL ENERGY, ELECTROMAGNETIC INTERFERENCES, ENERGY PARAMETERS, MEASURING INSTRUMENTS

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1. НОРМУВАННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ.....	7
1.1 Показники якості електричної енергії.....	7
1.2 Енергетичні властивості електричної енергії, показники якості електричної енергії.....	8
1.2.1 Відхилення напруги.....	8
1.2.2 Коливання напруги.....	11
1.2.3 Несинусоїдальність напруги.....	15
1.2.4 Несиметрія трифазної системи напруг.....	18
1.2.5 Відхилення частоти.....	21
1.3 Електромагнітні перешкоди.....	22
1.3.1 Вплив електромагнітних перешкод на якість електричної енергії.....	23
2. СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ПРИ ЇЇ ПЕРЕДАЧІ Й РОЗПОДІЛУ	25
2.1 Основні види електромагнітних перешкоди в електричних мережах.....	25
2.1.1 Електромагнітні перешкоди при передачі електричної енергії.....	28
2.1.2 Перешкоди при розподілі електричної енергії	26
2.2 Забезпечення надійності передачі електричної енергії.....	27
2.2.1 Поздовжня компенсація.....	28
2.2.2 Поперечна компенсація.....	30
2.2.3 Поперечна компенсація – STATCOM.....	32
2.2.4 Поздовжня компенсація – SSSC.....	33
2.2.5 Універсальна компенсація – UPFC.....	34
2.2.6 Відновлення електропостачання навантаження (самозапуск).....	37
3. ПРОВАЛИ НАПРУГИ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ...	38
3.1 Оцінка провалів напруги в розподільчій мережі	38
3.2 Флуктуації напруги.....	40
3.3 Фліккер-Ефект	42
3.4 Компенсація провалів напруги.....	46
3.5 Шини постійного струму	47
3.6 Надпровідність.....	49
4. ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ ЗНИЖЕННЯ НЕСИМЕТРІЇ НАПРУГИ.....	50
4.1 Розрахунок та методика визначення коефіцієнтів несиметрії....	50
4.2 Експериментальне визначення несиметрії на діючих однофазних ЕТП.	53
4.3 Схеми симетруючих пристроїв.....	56
5. ПРИЛАДИ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ	

ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ.....	73
5.1 Вимірювач струму та відхилення напруги типу 43203.....	73
5.2 "РЕСУРС-UF", "РЕСУРС- UF 2".....	77
5.3 ЕРИС-КЕ.....	81
5.4 РМ 175.....	84
5.5 РМ 175-SC.....	85
6. ПРИЧИНИ ПОЯВИ ВИЩИХ ГАРМОНІК В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ.....	89
6.1 Джерела вищих гармонік в СЕПП.....	89
6.1.1. Розрахунок вищих гармонік в СЕПП.....	94
6.2 Застосування активних і гібридних фільтрів для зменшення рівнів вищих гармонік в СЕПП.....	99
6.2.1 Структура та принцип дії активного фільтру.....	99
ВИСНОВКИ.....	108
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	110
ДОДАТОК А. РОЗРАХУНКИ ЕКОНОМІЧНИХ ЗБИТКІВ, ЩО ЗУМОВЛЕНІ ЗНИЖЕННЯМ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ	112
А.1 Розрахунок економічного збитку від відхилення напруги на прикладі текстильної промисловості.....	113
А.2 Розрахунок додаткових витрат на освітлення, обумовлених коливанням напруги.....	116
А.3 Визначення збитку від несиметрії напруги для трьохфазного асинхронного двигуна	119
ДОДАТОК Б. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	121
Б.1 Аналіз небезпечних та шкідливих факторів при обслуговуванні електроустановок.....	121
Б.1.1 Види уражень електричним струмом.....	121
Б.2 Технічні заходи, що забезпечують безпеку робіт в електроустановках.....	128
Б.2.1 Захисне відключення.....	128
Б.2.2 Захисне заземлення.....	131
Б.2.3 Занулення.....	134

ВСТУП

На сучасному етапі розвитку електричних систем питанню підвищення якості електроенергії для промислових підприємств приділяють велику увагу, так як дані підприємства мають розвинену електричну мережу і велику кількість різних за потужністю, принципу дії і режиму роботи електроспоживачів. Якість їх роботи може змістовно впливати на втрати електроенергії, надійність системи електропостачання та технологічний процес підприємства в цілому.

Практичне рішення питань підвищення якості електричної енергії на підприємстві стикається з проблемами інформаційного та організаційного характеру. Першими являються проблеми, обумовлені відсутністю експериментальних даних про показники якості електроенергії; другі - необхідністю перевірки фактичних значень параметрів електричної енергії на межі розподілу балансової власності мереж значенням, установленими в договорі на використання електроенергією та вибором заходів по нормалізації якості.

Повинна вирішуватись комплексна задача регулювання напруги, так як режим напруги в електричних мережах промислових підприємств має велике значення, тому що від нього залежить величина рівня напруги, а відповідно, і її якість на затискачах споживачів; погіршення якості приводить до зменшення економії електроенергії та збільшення економічного збитку.

При рішенні задачі підвищення якості електроенергії виникають економічні, математичні і технічні питання. Економічні питання вирішуються методами розрахунку збитків від погіршення якості електроенергії в системах електрозабезпечення. Математичні аспекти являють собою узагальнення тих чи інших методів кількісного розрахунку критеріїв якості електроенергії. Технічні аспекти вирішують шляхом розробки технічних засобів і заходів, що поліпшують якість електроенергії, а також організацію контролю і управління якістю.

1. НОРМУВАННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Назва "якість електричної енергії" означає, що основні параметри енергосистеми відповідають встановленим нормам діючого виробництва, а також передачі та розподілу електричної енергії.

ДЕСТ 13109 – 97 встановлює показники та норми в електричних мережах систем постачання електроенергії загального призначення змінним трифазним та однофазним струмом з частотою 50 Гц у точках приєднання електричних мереж, які є власністю різноманітних споживачів електричної енергії, або у приймачів електроенергії (точки загального приєднання). Норми вживають при проектуванні та експлуатації електромереж, а також при визначенні рівнів перешкодостійкості електроприймачів і рівнів кондуктивних електромагнітних перешкод, внесених цими приймачами. Установлено два види норм: нормально припустимі й гранично припустимі. Оцінка відповідності нормам проводиться впродовж розрахункового періоду, який дорівнює 24 години.

1.1 Показники ЯЕ

Показниками ЯЕ є:

- відхилення напруги встановлене δU_y ;
- розмах зміни напруги δU_b ;
- доза флікера P_f ;
- коефіцієнт викривлення синусоїдальності кривої напруги K_U ;
- коефіцієнт n-ої гармонійної складової напруги $K_{U(n)}$;
- коефіцієнт несиметрії напруг по зворотній послідовності K_{2U} ;
- коефіцієнт несиметрії напруг по нульовій послідовності K_{0U} ;
- відхилення частоти Δf ;

- тривалість провалу напруги $\Delta t_{\text{п}}$;
- імпульсна напруга $U_{\text{імп}}$;
- коефіцієнт тимчасової перенапруги $K_{\text{пер} U}$.

1.2. Енергетичні властивості електричної енергії, показники якості електричної енергії.

Таблиця 1.1. Властивості електричної енергії, показники й найбільш імовірні причини погіршення якості електроенергії.

Властивості електричної енергії	Показник ЯЕ	Найбільш імовірні винуватці погіршення ЯЕ
Відхилення напруги	відхилення, що встановилося, напруги δU_y	Енергопостачальна організація
Коливання напруги	Розмах зміни напруги δU_t Доза флікера P_t	Споживач зі змінним навантаженням
Несинусоїдальність напруги	Коефіцієнт викривлення синусоїдальності кривої напруги K_U Коефіцієнт n-ої гармонійної складової напруги $K_{U(n)}$	Споживач із нелінійним навантаженням
Несиметрія трифазної системи напруг	Коефіцієнт несиметрії напруг по зворотній послідовності K_{2U} Коефіцієнт несиметрії напруг по нульовій послідовності K_{0U}	Споживач із несиметричним навантаженням
Відхилення частоти	Відхилення частоти Δf	Енергопостачальна організація
Провал напруги	Тривалість провалу напруги $\Delta t_{\text{п}}$	Енергопостачальна організація
Імпульс напруги	Імпульсна напруга $U_{\text{імп}}$	Енергопостачальна організація
Тимчасова перенапруга	Коефіцієнт тимчасової перенапруги $K_{\text{пер} U}$	Енергопостачальна організація

1.2.1. Відхилення напруги

Нормований показник:

- відхилення напруги, що встановилося.

Відхилення напруги характеризується показником відхилення напруги, що встановилося, для якого встановлені наступні норми:

- нормально припустимі й гранично припустимі значення відхилення напруги δU_y , яке встановлене на виводах приймачів електроенергії дорівнюють відповідно ± 5 і ± 10 % номінальної напруги в електричній мережі за ДСТ 721 і ДЕСТ 21128 (номінальна напруга);

- нормально допустимі й гранично допустимі значення відхилення напруги, яке встановлюється в точках загального приєднання електроспоживачів до електричних мереж напругою 0,38 кВ і більше встановлюються в договорах на користування електроенергією між енергопостачальною організацією та споживачем з врахуванням необхідності виконання нормативів дійсного стандарту на виводах електроприймачів електроенергії. Знаходження зазначених нормально припустимих і гранично припустимих величин проводиться відповідно до нормативних документів, які затверджені у встановленому порядку.

Кожний приймач електричної енергії спроектований для роботи з номінальною напругою і повинен забезпечувати належне функціонування при відхиленні напруги від номінального значення на задану величину. При зміні напруги в рамках цього діапазону можуть змінюватися значення вихідного параметра приймача електроенергії, а саме - температура в електротермічній установці, освітленість освітлювальних приладів, величина корисної потужності на валу електродвигуна і т.д..

Найчастішими причинами відхилення напруги в системах електропостачання промислових підприємств бувають зміни режимів роботи електроприймачів, зміни в режимах живильної енергосистеми, значні величини індуктивних опорів ліній 6–10 кВ. Зміни значень напруги на затискачах електроприймача навіть у встановлених діапазонах викликають зміну його техніко-економічних показників. Відхилення напруги в значній мірі залежать від багатьох випадкових і тим більш часто мінливих факторів.

Наслідки відхилень напруги залежать як від величини, так і від тривалості відхилення, а також від відсотку споживачів зазнає більших відхилень. Так, наприклад, короточасні й рідкі, хоча навіть і значні величини відхилень напруги для деяких споживачів не можуть виправдати витрат, які пов'язані з подорожчанням елементів мережі, які будуть необхідні для зменшення або ліквідації цих відхилень. Для проведення характеристики якості напруг у цей час розроблена ймовірна оцінка, заснована на методі математичної статистики. Цей метод уперше був розроблений П. Аєре, який показав, що кількісна оцінка впливу повільної зміни напруги на економічну роботу електроприймачів найбільш зручно й точно проводиться по середньому квадрату відхилення напруги за визначений період часу T . Значення неоднаковості напруги визначається відсотком у квадраті. Одиниця неоднаковості $1\%^2$ або $1/10000$. Наприклад, якщо при неоднаковості $25\%^2$ квадрат відносних відхилень $25/10000$, то самі відхилення $5/100$ або 5% . При аналізі режимів напруги в електричних мережах застосовуються спеціальні статичні аналізатори напруги, які дозволяють вимірювати квадрат середньоквадратичного відхилення $U_{ск}^2$ і величини середнього значення відхилення напруги, %, за час T .

Вплив на роботу різних ЕП.

Відхилення напруги значно впливають на роботу електродвигунів. У випадку зниження напруги на затискачах двигуна зменшується реактивна потужність намагнічування, при однаковій споживаній потужності збільшується струм двигуна, який викликає перегрів ізоляції. Підвищене зношування ізоляції приводить до скорочення терміну служби двигуна. При значному зниженні напруги на затискачах асинхронного двигуна можливо його «перекидання» через зменшення обертаючого моменту й частоти обертання ротора. Зменшення напруги погіршує умови пуску двигуна, тому що при цьому знижується його пусковий момент. Підвищення напруги на

виводах двигуна призводить до збільшення споживаної ним реактивної потужності, яку необхідно якось компенсувати.

Вентильні перетворювачі зазвичай мають систему автоматичного регулювання постійного струму методом фазового керування. Кут регулювання автоматично змінюється прямо пропорційно зміні напруги живильної мережі. Підвищення напруги на 1 % приводить до збільшення споживання реактивної потужності перетворювачем на (1,0...1,5) %, що приводить до погіршення коефіцієнта потужності.

Електротермічне встаткування, електролізні й зварювальні установки також чутливі до відхилень напруги. Негативні відхилення напруги приводять до збільшення виробничого процесу в часі, а іноді й до пошкодження продукції.

Слід також зазначити одне просте, але дуже важливе правило, загальне для будь-яких ЕП: при підвищенні напруги понад номінальний відбувається перевитрата електроенергії в порівнянні з рівнем її споживання в номінальному режимі роботи електроустаткування.[4]

1.2.2 Коливання напруги

Нормовані показники:

- розмах зміни напруги;
- доза флікера.

Причини виходу показників за межі норм полягають у використанні ЕП з швидкозмінними режимами роботи, що супроводжуються різкими змінами потужності (головним чином реактивної) навантаження. Найпоширеніші ЕП що породжують коливання, напруги, це:

- тягові підстанції;
- приводи прокатних станів реверсних;
- дугові сталеплавильні печі;
- зварювальні апарати;

- електролізні установки.

При роботі електроприймачів з різкозмінним ударним навантаженням в електричній мережі створюються різкі поштовхи споживаної потужності. Це веде до змін напруги електромережі, розмахи яких можуть досягати значних величин. Ці явища виникають при роботі прокатних двигунів, дугових електропечей, зварювальних машин і т.д. Зазначені обставини дуже несприятливо відображаються на роботі всіх електроприймачів, підключених до даної мережі, у тому числі й електроприймачів, що визивають ці зміни. Так, наприклад, термін зварювання в контактних машинах у межах від 0,02 до 0,4 с, тобто коливання напруги навіть з малою тривалістю позначаються на якості зварювання.

При коливаннях значень напруги, у результаті яких напруга понижується більш ніж на 15% від номінальних, можливе вимикання магнітних пускачів.

електродвигунів, що працюють. На підприємствах з істотним синхронним навантаженням коливання напруги можуть приводити до випадіння приводу із синхронізму й розладу технологічних процесів. Фактори коливання напруги негативно позначаються на роботі освітлювальних приладів. Вони приводять до миготіння ламп, які при перевищенні порога дратівливості можуть відбиватися на тривалім сприйнятті людей.

Вагомим джерелом коливань напруги являються дугові сталеплавильні печі (ДСП). При функціонуванні ДСП мають місце часті вимикання, кількість яких досягає 10 і більше протягом однієї плавки. Найважчі умови у період розплавлювання металу й на початку окиснення. При цьому створюються експлуатаційні поштовхи струму. Величина струму при поштовху прямо залежить від місткості печі, параметрів грубого трансформатора, повного опору короткої мережі.

Гранично припустимі значення розмаху зміни напруги δU_t у точках загального приєднання до електромереж при коливаннях напруги, який має

форму меандру (рис. 1.4), в залежності від частоти повторів змін напруги $F \delta U_t$ або інтервалу між змінами напруги $\Delta t_{i, i+1}$ дорівнюють значенням, обумовленим по кривій 1 рисунка 1.1, а для споживачів електричної енергії, що розташовують лампами розжарювання, у приміщеннях, де потрібно значна зорова напруга, - дорівнюють значенням, обумовленим по кривій 2 рисунка 1.4. Перелік приміщень із розрядами робіт, що вимагають значної зорової напруги, установлюють у нормативних документах, що затверджуються у встановленому порядку. [7, 8]

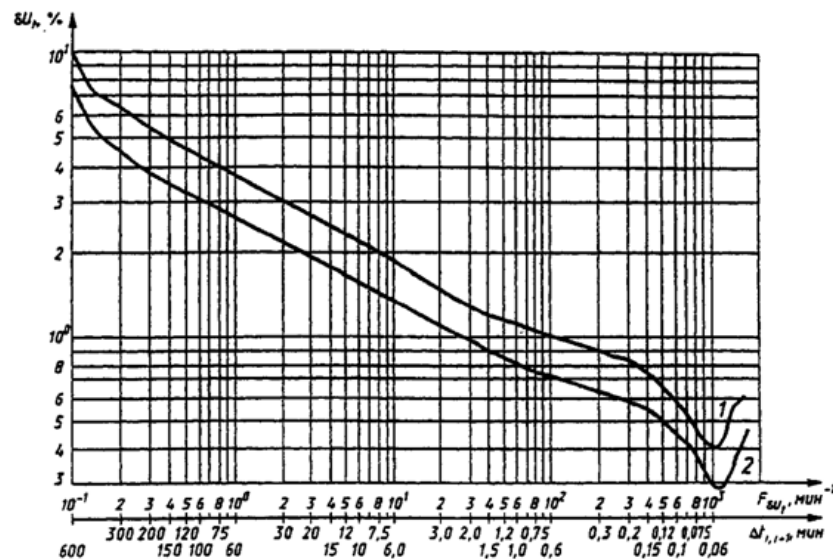


Рисунок 1.1. Розмахи змін напруги, що гранично допускаються залежно від частоти повторів змін напруги протягом хвилини для коливань напруги, які мають форму меандру

Гранично припустиме значення суми відхилення, що встановилося, напруги δU_y і розмаху змін напруги δU_t у точках приєднання до електричних мереж з напругою 0,38 кВ рівна $\pm 10\%$ від номінальної напруги.

Гранично припустиме значення для короточасної дози флікера P_{st} з коливаннями напруги, які відрізняються по формі від меандру, дорівнює 1,38, а для тривалої дози флікера P_{lt} з тимиж коливаннями напруги дорівнює 1,0.

Короткочасну дозу флікера знаходять на інтервалі часу спостереження, який дорівнює 10 хв. Тривалу дозу флікера знаходять на інтервалі часу спостереження, який дорівнює 2 год.

Гранично припустиму величину для короткочасної дози флікера P_{st} визначають у точках загального приєднання споживачів електроенергії, де розташовують лампами освітлення в приміщеннях, в яких потрібно значна зорова напруга, з коливаннями напруги у вигляді форми, що відрізняється від меандру, дорівнює 1,0, а для тривалої дози флікера P_{lt} у ці ж точках рівно 0,74.

Вплив на роботу різних ЕП.

При різких змінах струмового навантаження відбувається настільки ж різка зміна еквівалентних параметрів ЕП, у результаті чого має місце модуляція в часі амплітуд і фаз змушених складових миттєвого струму як основний, так і кратних їй вищих несучих частот. У деяких випадках можливо також поява вільних складових. Усе це природно приводить до збільшення сумарних активних втрат у мережі.

До числа ЕП, дуже чутливих до коливань напруги, належать електронна техніка та освітлювальні прилади, особливо лампи розжарювання.

Коливання напруги викликають миготіння ламп розжарювання (флікер-ефект), що породжує неприємний психологічний ефект у людини, погіршення зору та стомлення організму в цілому. Це призводить не лише до зниження продуктивності праці, а й до травматизму.

Коливання напруг порушує нормальну роботу й зменшує термін служби електронної апаратури, пристрої телефонно-телеграфного зв'язку, теле-, радіо- апаратури, офісної і побутової техніки.

При значних коливаннях напруги можуть бути погіршені умови якісної роботи електродвигунів, трапляється відпадиння контактів магнітних пускачів з послідуочим відключенням працюючих двигунів.

Коливання напруги розмахом (10...15) % призводять до виходу з ладу конденсаторних батарей, а також вентильних перетворювачів. На металургійних заводах можливе руйнування сердечників індукційних плавильних печей. Знижується продуктивність електролізних установок, скорочується строк їх служби внаслідок підвищеного зношування анодів. Коливання амплітуди й фази напруги викликають коливання електромагнітного моменту, активної й реактивної потужностей синхронних генераторів блок-станцій підприємств, а це позначається на економічності роботи станції. Відомі випадки виникнення нестійкої роботи систем автоматичного регулювання збудження й реактивної потужності синхронних генераторів і двигунів і навіть неправильна робота форсування збудження.

Коливання фази напруги викликають вібрації електродвигунів, механічних конструкцій і трубопровідної арматур. В останньому випадку знижується міцність металу, скорочується строк його служби. [4]

1.2.3 Несинусоїдальність напруги

Нормовані показники:

- коефіцієнт викривлення синусоїдальності кривої напруги;
- коефіцієнт n-ої гармонійної складової напруги.

Норми вищенаведених показників:

Нормально припустимі й гранично припустимі значення коефіцієнта викривлення для синусоїдальної кривої напруги в точках загального приєднання до електромереж з різною номінальною напругою наведено в таблиці 1.2.

Нормально припустимі значення коефіцієнта n-ої гармонійної складової напруги в точках загального приєднання до електричних мереж з різною номінальною напругою $U_{\text{ном}}$ наведено в таблиці 1.3.

Таблиця 1.2. Значення коефіцієнта зкривлення синусоїдальності кривої напруги

Нормально допустиме значення при $U_{\text{ном}}$, кВ				Гранично допустиме значення при $U_{\text{ном}}$, кВ			
0,38	6-20	35	110-330	0,38	6-20	35	110-330
8,0	5,0	4,0	2,0	12,0	8,0	6,0	3,0

Таблиця 1.3. Значення у відсотках коефіцієнта n-ої гармонійної складової напруги

Непарні гармоніки, не кратні 3, при $U_{\text{ном}}$, кВ					Непарні гармоніки, кратні 3**, при $U_{\text{ном}}$, кВ					Парні гармоніки при $U_{\text{ном}}$, кВ				
n*	0,38	6-20	35	110-330	n*	0,38	6-20	35	110-330	n*	0,38	6-20	35	110-330
5	6,0	4,0	3,0	1,5	3 9 15 21 >21	5,0	3,0	3,0	1,5	2	2,0	1,5	1,0	0,5
7	5,0	3,0	2,5	1,0						4	1,0	0,7	0,5	0,3
11	3,5	2,0	2,0	1,0						6	0,5	0,3	0,3	0,2
13	3,0	2,0	1,5	0,7						8	0,5	0,3	0,3	0,2
17	2,0	1,5	1,0	0,5						10	0,5	0,3	0,3	0,2
19	1,5	1,0	1,0	0,4						12	0,2	0,2	0,2	0,2
23	1,5	1,0	1,0	0,4						>12	0,2	0,2	0,2	0,2
25	0,2+	0,2+	0,2+	0,2+										
>25	0,2	0,2	0,2	0,2										
	1,3	0,8	0,6	0,2										
	x	x	x	x										
	x25/ n	x25/ n	x25/ n	x25/ n										

* n - номер гармонійної складової напруги.

** Нормально припустимі значення, наведені для й, рівних 3 і 9, ставляться до однофазних електричних мереж. У трифазних трьох-провідних електричних мережах ці значення ухвалюють удвічі меншими наведених у таблиці.

Гранично припустиме значення коефіцієнта n-ої гармонійної складової напруги обраховують по формулі:

$$K_{U(n)} = 1,5 K_{U(n)_{\text{норм}}} \quad (1.1)$$

де $K_{U(n)_{\text{норм}}}$ - нормально допустиме згідно таблиці 1.3. значення коефіцієнта n -ї гармонійної складової напруги.

Причини виходу показників за межі норм полягають у використанні різних нелінійних ЕП, таких як:

- вентильні перетворювачі;
- силові устаткування з тиристорним керуванням;
- дугові й індукційні електропечі;
- люмінесцентні лампи;
- установки дугового й контактного зварювання;
- перетворювачі частоти;
- побутова техніка (комп'ютери, телевізори та ін.).

Протягом роботи ці пристрої споживають енергію основної частоти, яка перетворюється не тільки на здійснення корисної роботи та покриття втрат, але ще на створення потоку вищих гармонійних, яка «викидається» у зовнішню мережу.

Вплив на роботу різних ЕП.

В обертових машинах гармоніки напруги й струму призводять до виникнення додаткових втрат в обмотках ротора, в колах статора, а також у сталі статора та ротора. В провідниках статора й ротора втрати при цьому більше, ніж обумовлені омичним опором, через вихрові струми й поверхневого ефекту. Струми витоку, викликані гармоніками в торцевих частинах статора й ротора, теж призводять до додаткових втрат. Всі ці фактори призводять до збільшення загальної температури електромашини й до місцевих перегрівань, найбільш імовірних у роторі, що може привести до дуже серйозних наслідків. Також слід зазначити, що за певних умов накладення гармонік можливе виникнення механічної вібрації ротора.

В трансформаторах гармоніки напруги утворюють збільшення втрат на гістерезис, втрат від вихрових струмів в сталі, і втрат в обмотках. Окрім

того, зменшується термін служби ізоляції. Зростання втрат в обмотках найбільше важливе у випадку перетворювального трансформатора, тому що наявність фільтра, приєднаного зазвичай до сторони змінного струму, не анулює гармонік струму в трансформаторі. Разом з цим, можуть спостерігатися локальні перегрівання трансформаторного бака.

В конденсаторних батареях гармоніки струму призводять до додаткових втрат електроенергії. З цієї причини відбувається додаткове нагрівання конденсатора, яке може привести до виходу останнього з ладу. Також можливе ушкодження конденсатора при виникненні гармонійних резонансів у електричній мережі.

В мережі гармоніки можуть погіршувати роботу пристроїв захисту або їхні характеристики. Характер порушення залежить від технологічного принципу роботи пристрою. Найпоширенішими є неправильні спрацьовування, які найбільш імовірні в роботі систем захисту, заснованих на вимірі опорів.

Вплив гармонік на індукційні прилади виміру потужності та обліку електроенергії призводить до підвищення погрішності результатів їх вимірів.

Також слід зазначити вплив гармонік, що виникають у силових колах, на сигнальні лінії зв'язку (зокрема, телефонні лінії). Низький рівень шуму призводить до явного дискомфорту, при його зростанні частина переданої інформації зникає, в окремих випадках зв'язок стає взагалі неможливим. [2]

1.2.4 Несиметрія трифазної системи напруг

Нормовані показники:

- коефіцієнт несиметрії напруги зворотньої послідовності;
- коефіцієнт несиметрії напруги нульової послідовності.

Норми вищезгаданих показників.

Нормально припустиме й гранично припустиме значення коефіцієнта несиметрії напруг зворотної послідовності в точках загального приєднання до електромереж дорівнюють 2,0 і 4,0 % відповідно.

Нормально припустиме й гранично припустиме значення коефіцієнта несиметрії напруг по нульовій послідовності в точках загального приєднання до чотирьох-провідних електричних мереж номінальною напругою 0,38 кВ дорівнюють 2,0 і 4,0 % відповідно.

Причини виходу показників за межі норм полягають у використанні різних несиметричних або однофазних ЕП, таких, як:

- дугові сталеплавильні печі;
- тягові навантаження залізниць на змінному струмі;
- електрозварювальне устаткування;
- освітлювальні прилади;
- однофазні комунально-побутові споживачі.

Вплив на роботу різних ЕП.

Несиметричні струми навантаження, які протікають елементами системи електропостачання, створюють у них несиметричні спади напруги. З цієї причини на виводах ЕП утворюється несиметрична система напруг. Відхилення напруги в електроприймачах перевантаженої фази можуть перевищити припустимі значення. Крім погіршення режиму напруги в електроприймачах, при несиметричному режимі істотно погіршуються етапи роботи як самих ЕП, так і усіх елементів мережі, що веде до зниження надійності функціонування електричного устаткування й системи електропостачання в цілому.

Вплив несиметричного режиму від симетричного в таких розповсюджених трифазних електроприймачах, як асинхронні двигуни, якісно відрізняється (АД). Опір зворотної послідовності АД приблизно в 5 раз менше опору прямої послідовності. Враховуючи це, навіть невелика

несиметрія напруг створює значні струми зворотної послідовності, що веде до додаткового нагрівання статора й ротора. Це все призводить до прискореного старіння ізоляції та зниження потужності двигуна.

При несиметрії напруг електромережі в синхронних машинах разом з утворенням додаткових втрат активної потужності та значним нагріванням статора і ротора можливі виникнення небезпечних вібрацій. Це є результатом утворення знакозмінних обертаючих моментів та появи тангенціальних сил, які пульсують із подвійною частотою мережі.

Якщо з'являються струми зворотної та нульової послідовності, то підвищуються сумарні струми в деяких елементах мережі, а це призводить до підвищення сумарних втрат потужності (енергії) та може викликати негативні явища з погляду нагрівання.

Відзначимо, що значні струми нульової послідовності, що протікають через нульовий провідник недостатнього перетину, можуть викликати його сильне нагрівання. Зафіксований ряд випадків виникнення пожеж у будинках через перегрів нульових провідників, перетин яких становив 25 або 50 % фазного проведу.

При постійнім протіканні струмів нульової послідовності через заземлювачі останні висихають, а їх опір збільшується. Це негативно впливає на роботу систем релейного захисту й залізничного блокування, що може привести до дуже важких наслідків. Несиметрія напруг значно ускладнює режими роботи багатofазних вентильних випрямлювачів через значне збільшення пульсації випрямленої напруги, погіршуються умови роботи систем імпульсно-фазного керування тиристорних перетворювачів.

При несиметрії напруг конденсаторні установки навантажуються реактивною потужністю по фазах нерівномірно, що сприяє неповному використанню їх установленної потужності. Крім того, конденсаторні установки в цьому випадку підсилюють уже існуючу несиметрію, в зв'язку з

тим, що генерація реактивної потужності в мережу у фазі з меншою напругою буде менше, чим в інших фазах.

1.2.5 Відхилення частоти

Нормований показник:

- відхилення частоти.

Відхилення частоти напруги змінного струму в електричних мережах характеризується показником відхилення частоти, для якого встановлені наступні норми:

- нормально припустиме й гранично припустиме значення відхилення частоти рівні $\pm 0,2$ і $\pm 0,4$ Гц відповідно.

Причина виходу показника за межі норм полягає в зміні величин генеруємої і (або) споживаної потужності в енергосистемі.

Вплив на роботу різних ЕП.

Як відомо, більшість основних технологічних ліній на промислових підприємствах з безперервним циклом виробництва обладнане механізмами з постійним і вентиляторним моментами опорів. Приводами цих механізмів служать асинхронні двигуни. В двигунах частота обертання роторів пропорційна зміні частоти електромережі, в той час продуктивність технологічних ліній прямо залежить від частоти обертів двигуна.

Найвразливіші до зниження частоти є двигуни власних потреб електричних станцій. Зниження частоти приводить до зниження їх продуктивності, що супроводжується зниженням розташовуваної потужності генераторів, та подальшою нестачею активної потужності та зниженням частоти. У підсумку, як показує практика, може виникнути так звана лавина частоти, наслідком якої може стати відключення електропостачання цілих районів.

Крім цього, знижена частота в електричній мережі негативно впливає на термін служби встаткування, що містить елементи зі сталлю (електричні машини, трансформатори, реактори), внаслідок збільшення струму намагнічування й додаткового нагрівання сталевих сердечників.

1.3. Електромагнітні перешкоди

Нормовані показники:

- тривалість провалу напруги;
- імпульсна напруга;
- коефіцієнт тимчасової перенапруги.

Причини погіршення показників.

Три перераховані показники відносяться до характеристик різних електромагнітних перехідних перешкод, які утворюються при електромагнітних перехідних процесах. Перехідні процесм мають місце в електричних мережах в результаті виникнення різноманітних видів коротких замикань, а також ударів блискавок в окремі елементи мережі, спрацювання систем релейного захисту та автоматики, дій комутацій будь-якого електроустаткування, аварійних обривів нульового проводу в мережах 0,4 кВ. Окрім цього, провали напруги можуть бути обумовлені помилковими діями персоналу й неправильними спрацюваннями засобів захисту й автоматики.

Вплив на роботу різних ЕП.

Очевидно, що провали напруги негативно позначаються на будь-яких ЕП. Тому що за ДСТ провалом напруги вважається його зниження більш ніж на 10 %, те неважко догадатися, що більша частина сучасного електроустаткування й приладів при виникненні провалу відключається. А ті ЕП, які не відключаються - продовжують працювати в умовах, що погіршуються, і виходять із ладу. Перенапруги й імпульсна напруги

позначаються в першу чергу на ізоляції будь-яких ЕП. В особливо тяжких умовах ізоляція пробивається й устаткування виходить із ладу. [4]

1.3.1 Вплив електромагнітних перешкод на якість електричної енергії

Збурювання, що погіршують якість напруги, виникають як при передачі, так і при розподілі електричної енергії.

Збурювання при передачі. Через значну довжину повітряні лінії електропередачі піддаються впливу атмосферних явищ. Різноманітні явища розрядів атмосферної електрики (блискавок) ситають причинами різних типів збурювань, кидків, посадок сіткової напруги, повної зупинки подачі електроенергії. Час та ступінь збурювань залежать від структури мережі й терміну, необхідного на її реконфігурацію. Виникнення перенапруг через удари блискавок звичайно розглядаються як зовнішні причини стосовно мережі.

Інші види збурювань виникають у процесі керування мережею, при скиданнях або несподіваних наростаннях навантаження. Хоча останній вид збурювань досить рідкий, тому що звичайно значні навантаження вмикаються до мережі поступово. Цей факт не відноситься до раптових скидань навантаження, які найчастіше є наслідком аварій.

Внутрішньо мережні джерела збурювань:

1) Резонанс. До резонансу відносять характерні для даної електромережі коливання та коливання, які виникають між різними елементами мережі, а саме, фільтрами. Для запобігання цих коливань ухвалюються всі можливі заходи, та все ж вони можуть виникати при змінах конфігурації мережі тимчасово.

2) Нестійкість при передачі. Найбільше часто вона пов'язана з внутрішнім або транспортним кутом передачі d . Вірогідно також

виникнення під синхронних коливань, що може виявити катастрофічний вплив на силові генератори електричних станцій.

3) Ферорезонанс. Це явище нелінійних коливань, які виникають при факті насичення силових або вимірювальних трансформаторів.

4) Комутації. Це явище являє собою перенапруги внаслідок підключення або відключення елементів мережі, фільтрів, конденсаторних батарей або трансформаторів.

5) Ушкодження «фаза/земля».

Збурювання при розподілі. Зараз ми маємо справу із значним зростанням кількості електричних навантажень. Це погіршує якість електроенергії в мережі і в побутовому, і на промисловому рівні. Також це пов'язано з активною діяльністю по стандартизації якості енергії. Дана тенденція досить неоднозначна, по причині того, що на початковому етапі вона приводить до штрафних санкцій стосовно виробників і навіть до споживачів, у той час як установи, зайняті розподілом енергії, майже не несуть будь-якої відповідальності відносно потужності короткого замикання або технологічної структури повного опору мережі.

2. СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ПРИ ЇЇ ПЕРЕДАЧІ Й РОЗПОДІЛУ

Технологічні процеси будь-якого виробництва значною мірою залежать від якості електроенергії. Взагалі низька якість електроенергії може бути охарактеризована як будь-які зміни в енергопостачанні, що приводять до порушень нормального ходу виробничого процесу або до ушкодження устаткування, трансформаторів, електродвигунів.

Основою досягнення високої якості електроенергії, з метою поліпшення умов життя населення й підвищення ефективності виробництва є три складові: виробництво електроенергії високої якості, безперебійна передача й розподіл по надійних мережах. [5]

2.1 Основні види електромагнітних перешкод в електричних мережах

Перешкоди, що погіршують якість напруги, однаково можуть виникати як при передачі, так і при розподілі електричної енергії.

2.1.1 Електромагнітні перешкоди при передачі електричної енергії

Через значну довжину повітряні лінії електропередачі піддаються впливу атмосферних явищ. Різноманітні явища розрядів атмосферної електрики (блискавок) стають причинами різних типів перешкод, кидків, посадок сіткової напруги, повного знеструмлення та припинення подачі електроенергії. Тривалість і обсяг перешкод залежать від структури електричної мережі та часу, який потрібен на її реконфігурацію. Через природні явища, такі як удари блискавок, причини виникнення перенапруг зазвичай розглядаються як зовнішні стосовно мережі.

Інші види перешкод виникають у процесі керування мережею, при скиданнях або несподіваних наростаннях навантаження. Хоча останній вид перешкод досить рідкий, тому що зазвичай великі навантаження підключаються до мережі поступово. Це не ставиться до раптових скидань навантаження, які найчастіше є наслідком аварій.

Внутрішньомережні джерела перешкод:

- Резонанс. Сюди ставляться коливання, що характерні для даної мережі або коливання, що утворюються між різними елементами мережі, наприклад, фільтрами. Звісно, для їхнього запобігання ухвалюються усі можливі заходи, але вони все ж можуть виникати при змінах конфігурації мережі тимчасово.
- Нестійкість при передачі. Найчастіше вона пов'язана з кутом передачі d (внутрішнім або транспортним кутом). Ймовірно також утворення підсинхронних коливань, які можуть створити катастрофічний вплив на силові генератори електричних станцій.
- Ферорезонанс. Це - нелінійні коливання, що утворюються при насиченні силових або вимірювальних трансформаторів системи.
- Комутації. Це – перенапруги, які виникають внаслідок підключення або відключення окремих елементів мережі, фільтрів, конденсаторних батарей чи трансформаторів.
- Ушкодження «фаза/земля».

2.1.2 Перешкоди при розподілі електричної енергії

Зараз ми маємо справу із зростанням кількості електричних навантажень, які погіршують якість енергії в електромережі як на побутовому рівні, так і на промисловому, і з активною діяльністю по стандартизації якості електроенергії. Стандартизація якості електроенергії - тенденція досить не однозначна, тому що на початковому етапі вона

приводить до штрафних санкцій стосовно виробників електроенергії і навіть до споживачів, в той час як організації, що проводять розподіл енергії зазвичай не несуть ніякої відповідальності щодо потужності короткого замикання або технічної структури повного опору мережі.

Протягом десятків років пасивні фільтри застосовувалися у поєднанні з потужними тиристорними або діодними перетворювачами.

Зараз на ринку з'явилися електронні елементи, що заціпаються, – IGBT (біполярний транзистор з ізольованим затвором), GTO (тиристор, що заціпається) або IGCT, що заціпається тиристор з інтегрованим блоком керування), які уможливили застосування перетворювачів, які здатні підвищувати якість енергії. Зараз застосовуються активні фільтри для низьких напруг, та доведена можливість застосування активних фільтрів на середніх напругах, і ця технологія в найближчі роки буде активно розвиватися.

Перешкоди, пов'язані з коливаннями напруги, названі «мерехтінням» або « фліккер-ефектом», із частотою від 1 до 30 Гц і максимумом перешкод при частоті 9 Гц. Електроніка більших потужностей у стані запропонувати розв'язку по боротьбі з останніми трьома видами перешкод.

2.2 Забезпечення надійності передачі електричної енергії

При передачі енергії виникають три основні проблеми:

- контроль напруги й ріст напруги при відсутності навантаження;
- підсинхронний резонанс, що може привести до виходу з роботи генераторних установок електричних станцій.

Будівництво нових ліній електропередачі зв'язане зі значними витратами й часто попросту неможливо із причин екологічного характеру. Тому доводиться збільшувати потужність енергії, переданої по існуючих

лініях, в основному за рахунок збільшення сили струму. Це досягне тільки при наступних умовах:

- відсутність теплових обмежень;
- наявність надійного керування розподілом потоків електроенергії в мережі між лініями, які живлять певну місцевість.

При виконанні цих умов можна підвищувати передану потужність в режимі максимальної надійності, знаходячись у межах припустимої стійкості, тобто дотримуючись значення транспортного кута, який не перевищує 40° . Для регулювання величини транспортного кута застосовуються різні пристрої, наприклад, поперечні (шунтувальні) компенсатори й поздовжні компенсатори.

2.2.1 Поздовжня компенсація

Електричні лінії високої напруги мають індуктивний опір, тому чим вище спадання напруги на опорі, тим вище транспортний кут. Зміст збільшення переданої потужності простий. Значення індуктивного опору повинне компенсуватися послідовно включеною ємністю. У цей час використовується кілька конструктивних розв'язків.



Рис. 2.1. Конденсатор постійної ємності

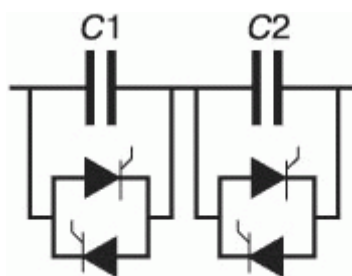


Рис. 2.2. Конденсаторна батарея з тиристорним перемиканням

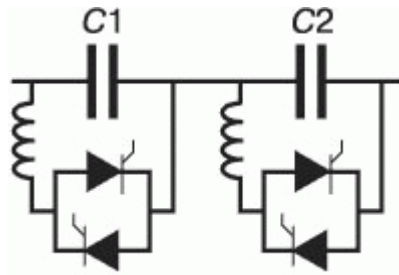


Рис. 2.3. Конденсаторна батарея з тиристорним керуванням

Ступінь компенсації постійний. Цей принцип дозволяє підвищувати передану потужність по лінії доти, доки не будуть досягнуті обмеження по тепловиділенню. Подібні системи не здатні пригнічувати виникнення підсинхронних коливань генераторів електричних станцій, а навпаки, при такому методі компенсації можуть утворюватися умови, які є сприятливими для їхнього виникнення.

На рис. 2.2 представлена конденсаторна батарея з тиристорним перемиканням. Міра компенсації змінюється ступінчато. [7, 8]

На рис. 2.3 зображена конденсаторна батарея з тиристорним керуванням. Міра компенсації регулюється майже в будь-яких межах. Цей розв'язок також дозволяє керувати стабільністю передачі енергії та пригнічувати виникнення підсинхронних коливань. Тиристори функціонують у режимі підстроювання фази. Модуль TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor – це конденсаторна батарея з тиристорним керуванням) протягом роботи представляє собою конденсатор змінної ємності, або дросель змінної індуктивності. Проте перемикання з режиму ємності в режим індуктивності й зворотно неможливе без проміжного вимикання через резонансні явища.

Модулі TCSC зазвичай мають достатню динаміку для пригнічення підсинхронних коливань.

2.2.2 Поперечна компенсація

Пристрій, включений в середню точку лінії електропередач і здатний поглинати та вертати реактивну потужність, забезпечує сталість напруги в даній точці. Таким чином транспортний кут знижується вдвічі і відповідно збільшується передана потужність.

Такі пристрої були розроблені більш 40 років тому. Розв'язок полягає в тому, що підключення здійснюється до лінії ємності, а паралельно їй – регульованого пристрою, який здатний компенсувати надлишкову реактивну потужність для того, щоб підтримувати постійне значення напруги в точці підключення (рис. 2.4).

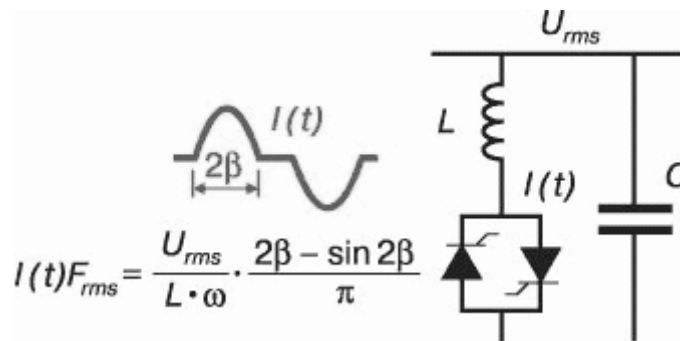


Рис. 2.4. Схема поперечної компенсації в лінії.

Де $I(t)F_{rms}$ – діюча величина струму;

U_{rms} – діюча величина напруги;

L – індуктивність реактора;

C – ємність батарей конденсаторів;

ω – кутова частота;

β – кут пропускання струму;

QC – потужність конденсаторної батареї;

QL – потужність реактора;

$QSVC$ – потужність статичного тиристорного компенсатора

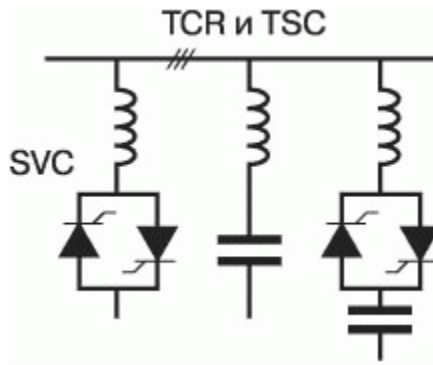


Рис. 2.5. Схема установки SVC

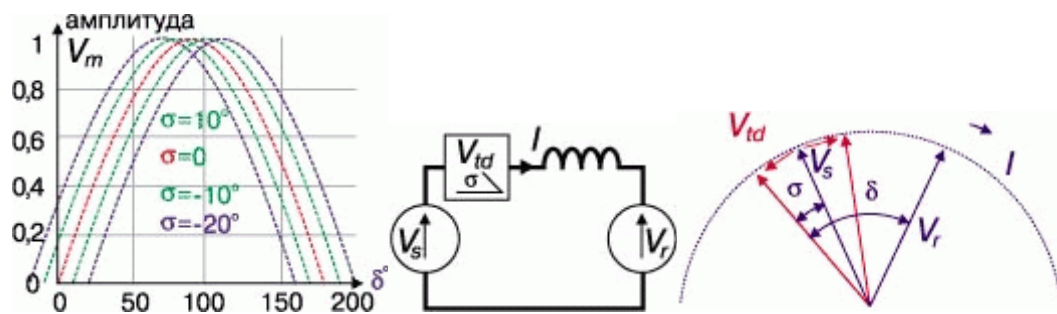


Рис. 2.6. Залежність потужності від кута φ

Де V_s – напруга джерела;

V_r – напруга приймача;

X – реактор, який має чисто індуктивний опір.

Індуктивність в пристрої змінюється за рахунок застосування тиристорів. Подібні системи називаються SVC (Static VAR Compensator) – ССКРП (система статичної компенсації реактивної потужності).

Статичний контактор, який керує силою струму в реакторі, генерує в мережу гармоніки. Це послужило першою і основною причиною для організації ємностей у систему фільтрів. Є і інші причини, пов'язані зі структурою мережі, а саме з виникненням паралельного резонансу через існування ємностей в установці SVC.

В загальному вигляді схема установки SVC зображена на рис. 3.5. У неї входять коло керування реактором TCR (Thyristor Controlled Reactor –

реактор з тиристорним керуванням) та коло ступінчатого підключення елементів конденсаторної батареї TSC (Thyristor Switched Capacitor – конденсаторна батарея з тиристорним перемиканням).

Через економічний характер причин буває важко встановити фіксовану значну ємність. Це вимагає також встановлення модуля TCR великої потужності. З цієї причини використовують кілька конденсаторних батарей. TSC можуть вмикатися або вимикатися окремо, а TCR істотно меншої потужності носить функцію «верн'єра» для забезпечення і утримання постійного керування реактивною потужністю.

Необхідно відзначити, що мережні SVC звичайно мають достатню динаміку для того, щоб пригнічувати виникнення підсинхронних коливань. Якщо в мережі відсутнє електричне навантаження, через розподілену ємність лінії виникає зростання напруги. Для обмеження зростання напруги необхідно проводити поглинання реактивної потужності. Тому установки SVC часто проектують із урахуванням необхідності служити як поглинальні пристрої.

2.2.3 Поперечна компенсація – STATCOM

Статичний синхронний компенсатор - Static synchronous Compensator.

Компенсатори STATCOM (рис. 2.9) здатні поглинати й повертати реактивну потужність Q , але їхнє застосування звичайно обмежується статичною компенсацією по причинах економічного характеру.

Зазвичай $Q_{\max} = Q_F + Q_{\text{STATCOM}}$ і $Q_{\min} = Q_F - Q_{\text{STATCOM}}$, при цьому Q_{STATCOM} трохи вище значення величини Q_F для того, щоб забезпечити можливість поглинати реактивну потужність при відсутності навантаження в мережі.

Якщо напруга в точці підключення залишається постійною, то компенсатор STATCOM працює як компенсатор SVC. Але в режимі обмеження

потужності компенсатор STATCOM перетворюється в джерело струму, тоді як компенсатор SVC набуває властивостей конденсатора. Компенсатори STATCOM можуть також функціонувати як активні фільтри. Звичайно, за додаткову функціональність компенсаторів STATCOM має проводитися додаткова оплата.

Найпоширенішими функціями компенсаторів є наступні класичні властивості:

- регулювання напруги методом поглинання або повернення реактивної потужності;
- пригнічення підсинхронних коливань.

При зменшенні напруги SVC працює як конденсатор, і реактивна потужність спадає пропорційно квадрату напруги. У такій же ситуації система STATCOM працює у режимі постійного джерела струму. Напруга на виводах конденсатора підтримується постійною.

2.2.4 Поздовжня компенсація – SSSC

Статичний синхронний поздовжній компенсатор. Static Synchronous Series Compensator.

В даних системах вдається усунути недолік систем TCSC (конденсаторні батареї з тиристорним керуванням), який полягає в неспроможності плавного переходу від ємнісного режиму до індуктивного.

SSSC (на рис. 2.10) може вертати тільки реактивну потужність, виключно за винятком випадків, коли контур постійного струму одержує підживлення від накопичувача енергії.

При розподілі енергії застосовується цей же принцип, він одержав назву DVR (Dynamic Voltage Restorer – система динамічного відновлення напруги), хоча по функціональності вони трохи відрізняються. Тут метою є підтримка мережі у відношенні її найбільш вразливих споживачів при

короткочасних перешкодах. Потужність наявних на ринку установок DVR не перевищує 1 МВА.

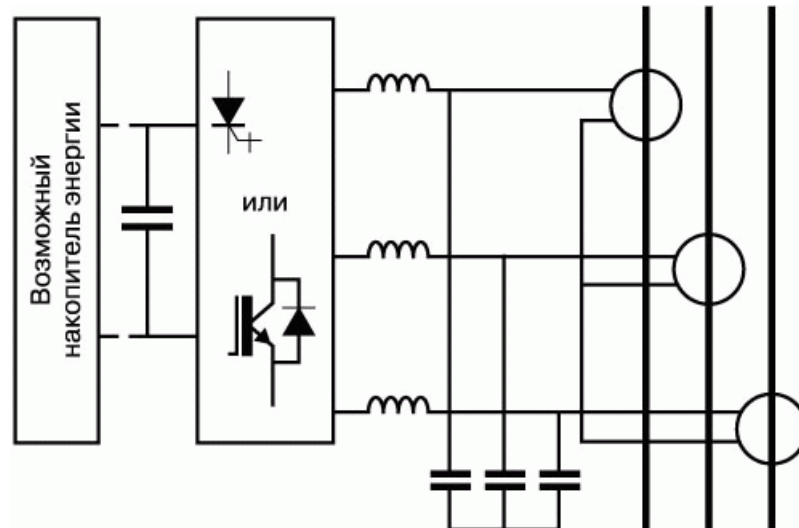


Рис. 2.10. Схема SSSC

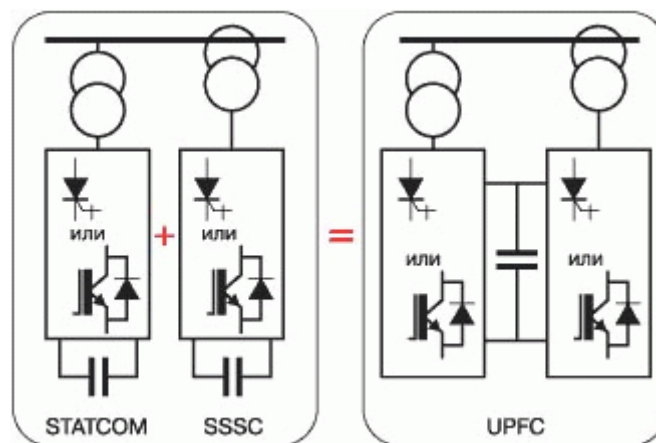


Рис. 2.11. Схема UPFC

2.2.5 Універсальна компенсація – UPFC

Уніфікована система керування енергопотоками. Unified Power Flow Controller.

Потужності систем STATCOM та подібних типів SSSC настільки великі, що використання їх без використання накопичувачів енергії достатньої ємності проблематичне. Якщо така можливість відсутня, то

повинне застосовуватися управління величиною транспортного кута, як у випадку з використанням фазозсуваючого трансформатора, але з найбільш високою швидкістю. Система UPFC втілює цю ідею в реальність без застосування будь-якого накопичувача енергії. Таким чином, система UPFC являє собою не що інше, як об'єднання систем STATCOM і SSSC (рис. 3.11).

Це найбільш складна із систем FACTS. Вона дозволяє здійснювати наступні функції:

- безпосереднє управління напругою. Додавання або віднімання напруг фазованим вузлом поперечної компенсації. Подібні дії проводяться над реактивною потужністю;
- поперечний компенсатор – шляхом керування поперечним перетворювачем з переходом останнього в режим поглинання або повернення реактивної потужності. Повинна підтримуватися постійною напруга;
- поздовжній компенсатор: шляхом додавання послідовної напруги, при зрушенні на 90° відносно струму зв'язку. При цьому на виході необхідно керувати вихідною напругою та реактивною потужністю;
- фазозсуваючий пристрій: якщо значення й фаза поздовжньої напруги такі, що при втриманні такої ж напруги на виході модуля вона зменшує величину зрушення фаз стосовно входу. Цей фактор має важливе значення при керуванні переданою активною потужністю.

Нарешті, одночасне використання всіх функцій – число ступенів свободи системи дозволяє це робити, – якщо необхідно управляти і реактивною, і активною потужністю.

Щодо переваг системи UPFC, то вони очевидні. Навіть якщо в цей час система не дуже поширена, то в найближчі роки ця технологія буде активно втілюватися, в основному в місцях, де особливо складно здійснити будівництво додаткових ліній. Число систем UPFC, які перебувають в експлуатації на теперішній час, не велика кількість. Одна система UPFC потужністю 2x160 МВА перебуває в експлуатації в системі посилення, що

складається з подвійної ЛЕП 135 кВ від АЕС у США. Вона надає можливість підвищити передану потужність на 100 МВт.

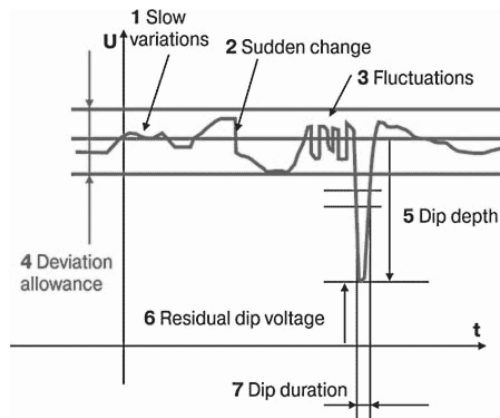


Рис. 2.12. Види змін напруги в мережі

1. Повільні зміни.
2. Різка зміна (стрибок).
3. Флуктуації.
4. Припустимі зміни.
5. Глибина посадки.
6. Залишкова напруга при посадці.
7. Тривалість посадки.

Звісно, що прийнятий розв'язок має залежність від типу мережі й виду підключених електроспоживачів. Якщо значення флуктуацій напруги не виходить за припустимі межі, то ясно, що ніякої корекції проводити не треба. Можливі повільні зміни напруги, які виходять за ці межі – це, скоріше, питання енергопостачальної компанії, чим споживача, пов'язане з довжиною лінії та недостатньою потужністю короткого замикання (потужністю джерела). Посадки напруги також відносяться до проблем енергопостачальної компанії та пов'язані із затримками у вимиканні коротких замикань і відмовами устаткування. Флуктуації напруги, з іншого боку, відбуваються в основному через погане узгодження потужності джерела зі швидко мінливої в ході виробничих процесів навантаженням у споживачів.

2.2.6 Відновлення електропостачання навантаження (самозапуск)

Відновлення електропостачання (наприклад, після АВР), більш відоме як самозапуск, утворює значні струми. Напруга при цьому зменшується, що може мати вплив на стійкість роботи всієї мережі.

Із зниженням напруги деякі споживачі утримують рівень споживаної потужності, що призводить до збільшення споживаного струму. Типовим прикладом є асинхронні електричні машини (рис. 2.13). При зниженні напруги їх швидкість зберігається постійною, це призводить до зростання споживаного струму. При встановленні напруги до нормального значення спостерігається зростання споживаного струму в зв'язку з протіканнями перехідних процесів.

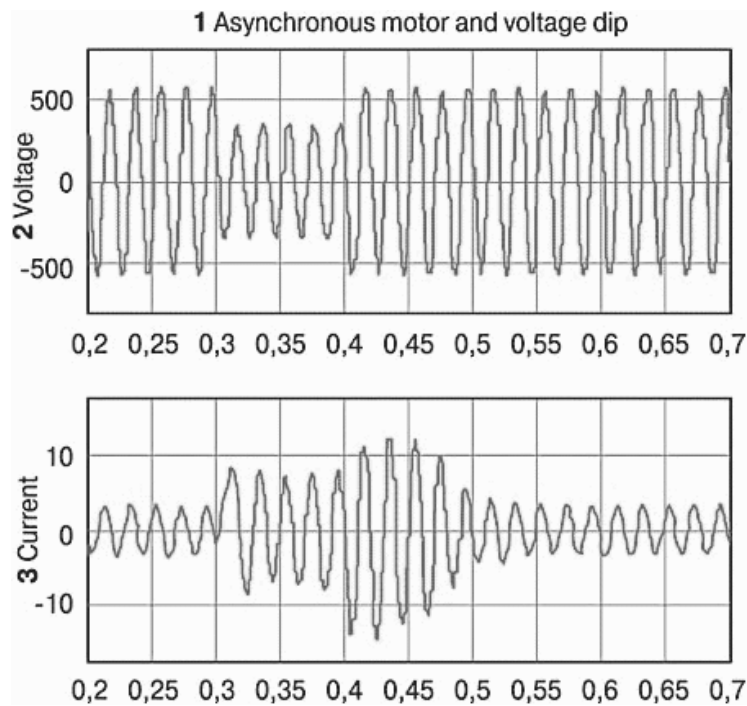


Рис. 2.13. Асинхронний двигун і посадка напруги

1. Асинхронний двигун і зниження напруги
2. Напруга
3. Струм

3. ПРОВАЛИ НАПРУГИ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

3.1 Оцінка провалів напруги в розподільчій мережі.

Різні зміни напруги в мережі відбуваються через зміни не стільки активної, скільки реактивної потужності.

Зобразимо майже точну формулу відносної зміни напруги (стосовно напруги холостого ходу розподільної мережі) згідно рис. 3.1.

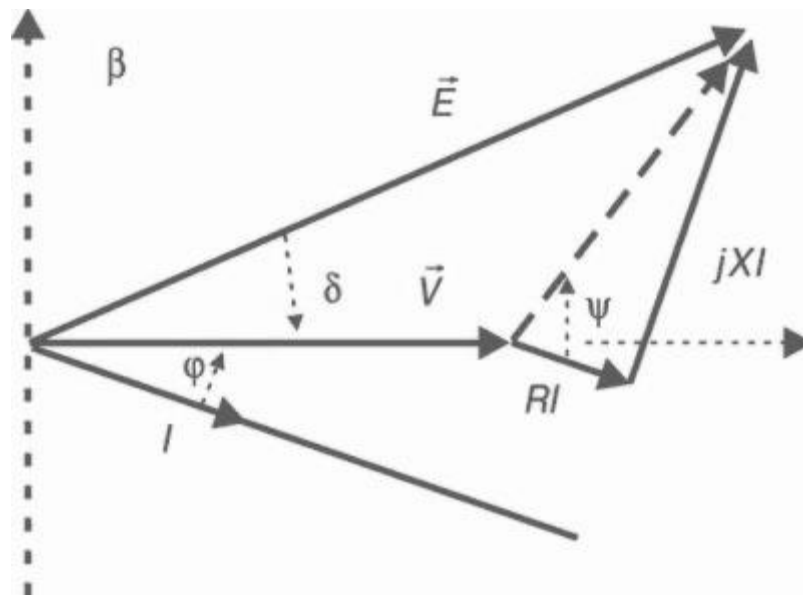


Рис. 3.1. «Майже точна» формула розрахунків провалів напруги

де E – напруга джерела;

V – напруга;

DV – відхилення напруги;

P – активна потужність;

Q – реактивна потужність;

S_{cc} – потужність короткого замикання;

$\tan \phi$ – кут між струмом і напругою;

R – активний опір;

X – індуктивний опір.

$$\left| \frac{E - V}{E} \right| = \Delta v = \frac{1}{SCC} \cdot \left(Q + \frac{P}{\operatorname{tg} \psi} \right) + \frac{1}{2SCC^2} \cdot \left(P + \frac{Q}{\operatorname{tg} \psi} \right)^2 \quad (3.1)$$

де

$$SCC = \frac{3 \cdot E^2}{X} \quad (3.2)$$

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{X}{R} \quad (3.3)$$

SCC являє собою потужність короткого замикання, а $\operatorname{tg} \psi$ зазвичай має значення в межах від 7 до 10. На рівні розподілу це означає в основному зміну напруги, викликану зміною навантаження. Його можна оцінити, використовуючи формули:

$$\Delta v_1 = \frac{1}{SCC} \cdot \left(Q_1 + \frac{P_1}{\operatorname{tg} \psi} \right) + \frac{1}{2SCC^2} \cdot \left(P_1 + \frac{Q_1}{\operatorname{tg} \psi} \right)^2 \quad (3.4)$$

$$\Delta v_2 = \frac{1}{SCC} \cdot \left(Q_2 + \frac{P_2}{\operatorname{tg} \psi} \right) + \frac{1}{2SCC^2} \cdot \left(P_2 + \frac{Q_2}{\operatorname{tg} \psi} \right)^2 \quad (3.5)$$

$$\frac{V_2 - V_1}{V_1} = \frac{\Delta v_1 - \Delta v_2}{1 - \Delta v_1} \quad (3.6)$$

Якщо SCC перевищує значення вираження $Q_1 - P_1 / \operatorname{tg} \psi$, можна записати:

$$\frac{V_2 - V_1}{V_1} \approx \frac{1}{SCC} \cdot \left(\Delta Q - \frac{\Delta P}{\operatorname{tg} \psi} \right) \approx \frac{\Delta Q}{SCC} \quad (3.7)$$

На першому етапі точність, забезпечувана цієї формулою, майже завжди вважається задовільною. Щоб уникнути перевантаження електромереж (а саме ліній, трансформаторів, іншого встаткування), які випробовують основні навантаження, завжди спонукали користувачів

компенсувати використання реактивної потужності. В таких випадках слід установлювати пасивне встаткування, що компенсує, полягає в основному з конденсаторних батарей з підстроєчними дроселями, іноді з, що демпфірують резисторами для гасіння паралельного резонансу. З деяких часів, наприклад, споживання реактивної потужності, дозволене EDF (Electricite de France – французькою мережною компанією), обмежене величиною

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P} \leq 0,4 \quad (3.8)$$

Більше того, EDF виставляє рахунки за надлишкове використання реактивної потужності. В інших країнах, наприклад, у Бельгії це обмеження становить

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P} \leq 0,33 \quad (3.9)$$

Необхідно відзначити, що фіксована компенсація не виявляє впливи на зміни напруги, які викликані флуктуаціями реактивної потужності. При занадто високому рівні фіксованої компенсації щодо мінімальної витрати реактивної потужності, виникає ризик надлишкової компенсації, що може призвести до підвищення напруги в споживачів.

При мало змінних навантаженнях у минулому часто застосовувалися синхронні компенсатори, синхронні електричні машини з перепорушенням, які можуть генерувати реактивну потужність. Протягом років, зі зростанням динаміки процесів і жорсткістю вимог до стабільності електромереж, набули поширення засоби статичної компенсації – системи SVC і STATCOM, які ми оглянули в першій частині матеріалу.

3.2 Флуктуації напруги

З метою стабілізації напруги розподільних мереж застосовуються ті ж самі засоби, що й у мережах передачі, хоча мети їх застосування трохи

різняться. Встає питання про керування напругою й підвищенні коефіцієнта потужності. Складності в основному виникають через швидко змінні навантаження, такі, як прокатні стани, установки зі зварювальними агрегатами та найбільше дугові печі. На рис. 3.2 наведений характерний приклад узагальненої розподільної мережі зі перешкодами, які анулюються за допомогою установки SVC. На рисунку представлені конденсатори, встановлені в поєднанні з фільтрами для пригнічення гармонік; ємність конденсаторів обрана таким чином, щоб поверталась реактивна потужність, необхідна для підтримки певного значення $\tan \psi$; зображений також поглинач Tcr-Дросель із тиристорним керуванням), який призначений для компенсації надлишкової ємності в потрібних ситуаціях. Зрозуміло, що для утримання постійного значення напруги в мережі або хоча б для виключення змін, вступ реактивної потужності в розподільну мережу повинне бути нульовим або постійним.

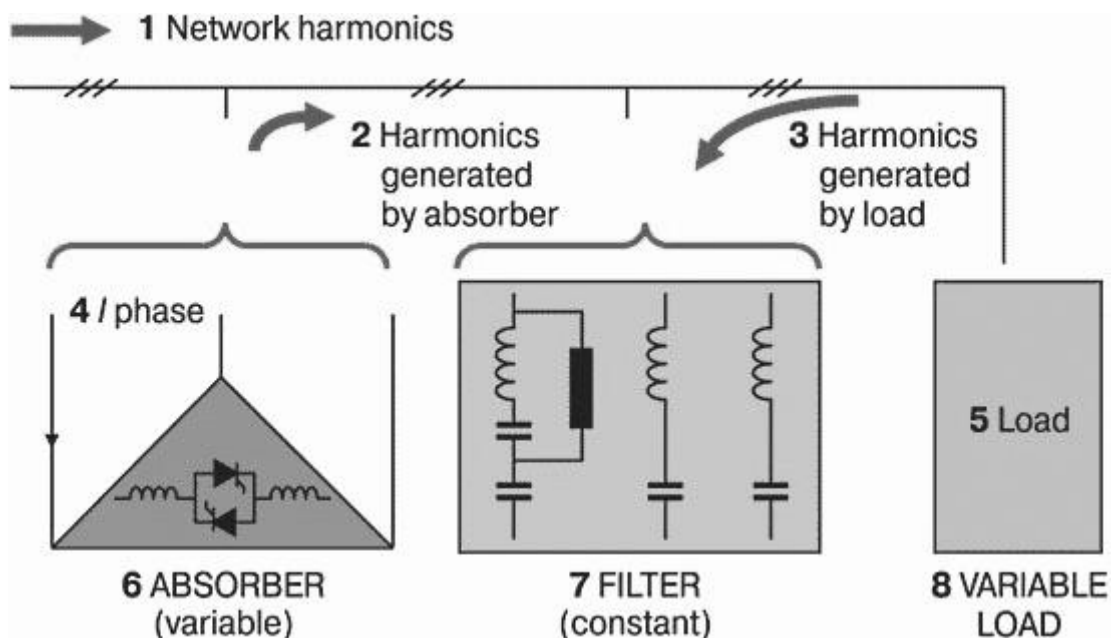


Рис. 3.2. Приклад узагальненої розподільної мережі зі перешкодами, які усуваються за допомогою установки SVC

1. Мережні гармоніки.
2. Гармоніки, що утворюються поглиначем.
3. Гармоніки, що утворені навантаженням.
4. Струм фази.
5. Навантаження.
6. Змінний поглинач.
7. Постійний фільтр.
8. Змінне навантаження.

3.3 Фліккер-Ефект

Проблеми, викликувані змінами напруги, відомі за назвою фліккер-ефекту (мерехтіння). Ефект мерехтіння визначається P_t (дозою фліккера). Маємо на увазі, що P_t не є ні миттєвою, ні середньою величиною. Цей фактор - оцінка серйозності проблем, викликаних фліккер-ефектом, а не самого фліккер-ефекту. Потрібно відзначити, що ніяка з існуючих нині рекомендацій з попередньої оцінки фліккер-ефекту не є повністю задовільною.

UIE розробила міжнародний вимірник фліккер-ефекту, який використовує два критерії для оцінки його серйозності: P_{st} – короткочасну дозу фліккера й P_{lt} – тривалу дозу фліккера. Цей прилад, таким чином, заснований на моделюванні, що використовувався протягом досліджень, та на контрольних вимірах.

Достатній рівень фліккер-ефекту був стандартизований включенням у специфікацію рекомендацій ІЕС 868 (таблиці 1 і 2). Це миттєве вимірювання флуктуацій напруги в діапазоні частот 0,5-35 Гц зі зважуванням за методикою «lamp-eye».

Після цих дій отримане в такий спосіб значення рівня фліккер-ефекту зазнає аналізу (розрахунки P_{st} і P_{lt}) для здійснення статистичної обробки, яка дозволяє оцінити важливість впливу фліккер-ефекта. На цьому кроці

статистичний підхід дає можливість вивести функцію, що відбиває кореляцію між видимим рівнем фліккер-ефекту та відповідними частками тривалості його перебігу. Серйозність впливу фліккер-ефекту вираховується для стандартних проміжків часу (а саме, 10 хв для коротких перешкод і 2 години для тривалих перешкод).

Проведені в ряді країн дослідження промислових установок, в тому числі і дугові печі, показали, що використання систем SVC дозволяє зменшити P_{st} до 1,5-2,6. Даний діапазон ефективності в значній мірі залежить від потужності печі, а також від потужності короткого замикання і проведеної оптимізації й від якості керування.

Звичайно використовують кілька формул. Усі вони, звісно, мають потужність короткого замикання печі (SCCF) та мережі (SCCR) в загальній точці підключення. Ці формули мають подвійне походження, а саме - теоретичне й емпіричне. Вони містять емпіричні коефіцієнти, значення яких вираховується на основі досвіду користувача.

Одна з перших серйозних спроб оцінити проблеми, викликувані фліккер-ефектом, була почата в Японії із застосуванням критерію, який використовується іноді й тепер: $v10$.

Існує можливість встановити залежності даного критерію зі змінами напруги в мережі $v10 = v_{max}/3,6$ і з максимальної P_{st} :

$P_{st} = 3 \cdot v10$, $v10$ виражається в %; тому максимальну P_{st} можна виразити в такий спосіб:

$$P_{St_{max}} \approx 3 \cdot \frac{\Delta Q_{max} \cdot d \cdot 100}{3,6 SCCR} \quad (3.10)$$

де d – емпіричний коефіцієнт, який знаходиться в інтервалі 1-1,3.

Для $P_{st} 99\%$ теж можна вивести формулу для оцінки фліккер-ефекту від дугової печі в загальній точці підключення P_{ss} :

$$P_{St} 99\% = K_{St} \cdot \frac{SCCF}{SCCR} \quad (3.11)$$

де K_{St} – типове значення (50-85) коефіцієнта передачі для розрахунків P_{St} .

Якщо максимальна зміна реактивної потужності не більша, чим потужності короткого замикання електропечі, то ці обидві формули стають практично ідентичними.

Розрахування P_{St} по цих формулах показують, що значення параметрів SVC тісно зв'язані з потужністю короткого замикання електромережі в точці загального підключення. Застосовуючи TCR (реактор з тиристорним керуванням), ми можемо керувати реактором та проводити побічне керування конденсатором.

Відновлення балансу електромережі в даному випадку можливе, незалежно від значень величин P і Q однієї фази, лише за рахунок впливу на активну й реактивну потужність.

На рис. 3.3 показане зниження величини P_{St} промислової електроустановки при присутності SVC (унизу) в порівнянні з роботою без SVC (угорі). З рисунку добре видно покращення ситуації в електричній мережі, разом з цим виникає й зростання продуктивності дугової печі. Досягається зниження рівня фліккер-ефекту майже в 2 рази.

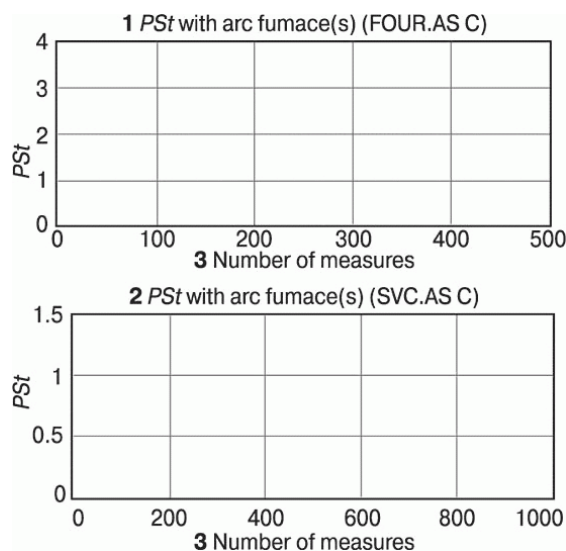


Рис. 3.3. Зниження значення величини P_{St} промислової електроустановки

1. Значення величини P_{st} для дугових печей
2. Значення величини P_{st} для дугових печей з SVC
3. Кількість вимірів

Навряд можна досягнути більшого при використанні класичної тиристорної SVC. Це в основному пов'язане з тим, що при визначенні P_{st} для оцінки фліккер-ефекту використовували тільки досить високі частоти (20-35 Гц). Проте часто виникає потреба добитися зниження фліккер-ефекту в 4 рази. У цих умовах найбільш простим розв'язком є збільшення потужності короткого замикання. Проте підвищити SCC не завжди вдається легко. Якщо необхідне будівництво нових ліній, цей розв'язок може виявитися досить дорогим.

Звідси виникає пропозиція по використанню систем STATCOM. Володіючи більш високою порівняно з SVC швидкістю, ці системи здатні компенсувати різкі зміни навантаження. Поскілки вартість систем STATCOM суттєво вище, чим систем SVC, були запропоновані гібридні розв'язки (рис.3.4):

- потужність від 70 до 80% має забезпечуватися класичним SVC;
- потужність від 20 до 30% – має забезпечуватися STATCOM.

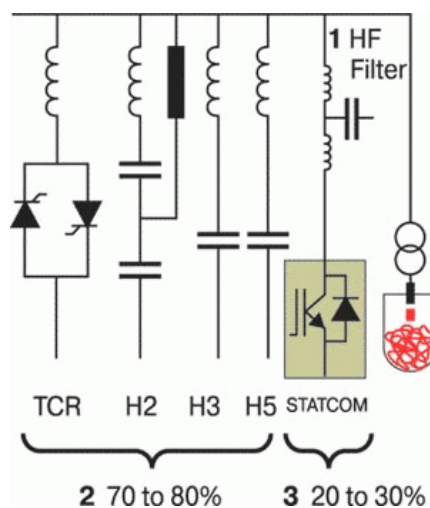


Рис. 3.4. Схема промислової установки із системами SVC і STATCOM.

1. Високочастотний фільтр.
2. Від 70 до 80% заданої потужності.
3. Від 20 до 30% заданої потужності.

Цей розв'язок розроблений недавно, для зручної оцінки його експлуатаційних характеристик, однак він явно має великі перспективи. Для дугової печі потужністю 100 МВА потрібне джерело регульованої напруги потужністю 20-30 МВА, засноване на IGBT або GTO. Потужність суднових силових електроустановок становить близько 20 Мвт. В нафтохімічній промисловості застосовуються установки парового крекінгу з потужністю 30 Мвт. Приведені значення характеризують ймовірні напрямки промислового використання такого розв'язку.

3.4 Компенсація провалів напруги

З метою захисту малопотужних електроспоживачів відповідального призначення завжди можливе використання автономних перетворювачів. Ця проблема ускладнюється при більших значеннях споживаних потужностей, що досягають сотень кіловатів і навіть десятків мегават (наприклад, в нафтохімічній промисловості варіатори швидкості).

Для забезпечення безперебійного протікання технологічного процесу при зупинці електропостачання завжди необхідні накопичувачі енергії, було б нелогічно міркувати, що застосовані в цей час зворотні перетворювачі можуть зберігати кількість енергії, достатньої для компенсації посадок напруги, тривалість яких перевищує трохи більше мілісекунди.

Для того щоб забезпечити 1 МВт протягом однієї секунди при спаданні напруги на 100 В з використанням перетворювача напруги потужністю 1 МВт із проміжною напругою 800 В постійного струму, перетворювач повинен містити батарею конденсаторів ємністю 10 фарад, а це абсолютно нереально.

Потрібно шукати інші розв'язки. Деякі з них відносно універсальні, оскільки діють на рівні мережі, інші обумовлені типом технологічного процесу споживача.

3.5 Шини постійного струму

Шини постійного струму використовуються з двох причин: вдосконалення перетворювачів напруги та необхідність уникання забруднення внутрішньої електромережі підприємства гармоніками. Дана технологія одержала найбільше розповсюдження в металургії та паперовій промисловості. При виникненні необхідності перерозподіляти енергію між різними приводами, які приймають участь у виробничому процесі, розумно знайти такий розв'язок, який дозволить робити перерозподіл без переміщення в мережу змінного струму, щоб виключити забруднення останньої.

Рис. 3.5 показує принцип дії шин постійного струму. Окремі установки містять у собі до 20 приводів, об'єднаних тільки загальним кінцевим продуктом, наприклад, листовим металом. Наслідки збою електропостачання в такому випадку досить серйозні. Тільки на видалення зіпсованого продукту при вимиканні з установки може знадобитися значна кількість часу. Отже, повинен бути хоча б мінімальний запас енергії, що буде доступна в інерційній формі усередині самого технологічного процесу. Якщо процес не має достатніх ресурсів енергії, їх необхідно надати. Можна розглянути кілька розв'язків.

На рис. 3.5 показано два варіанти накопичення енергії: перший – класичний, із застосуванням акумуляторної батареї, другий – інерційний. В другому випадку потрібно використовувати кілька систем керування, які будуть живити двигун з високою швидкістю обертання, наприклад, 6000 об/хв, для того, щоб мати потрібний запас інерції для постачання енергією при переривах в електропостачанні.

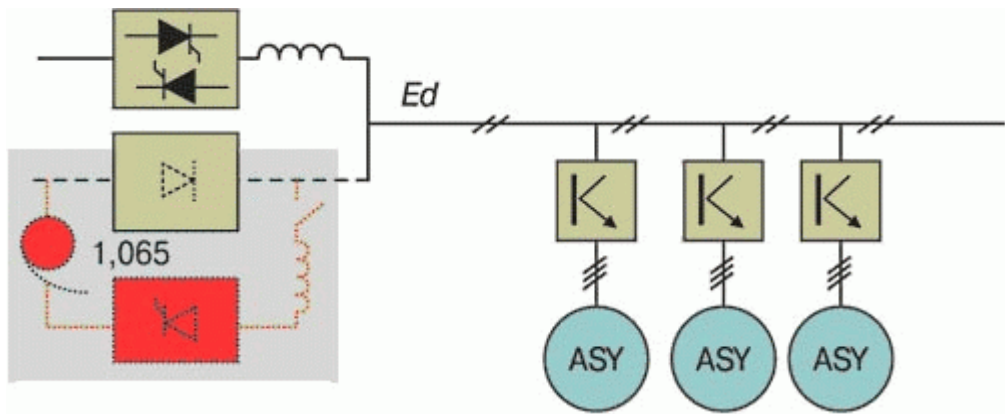


Рис. 3.5 - Принцип дії шин постійного струму

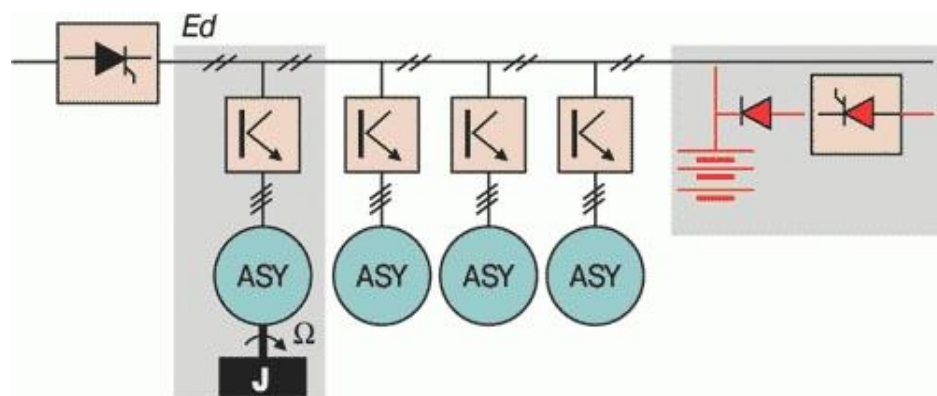


Рис. 3.6 - Варіанти нагромадження енергії

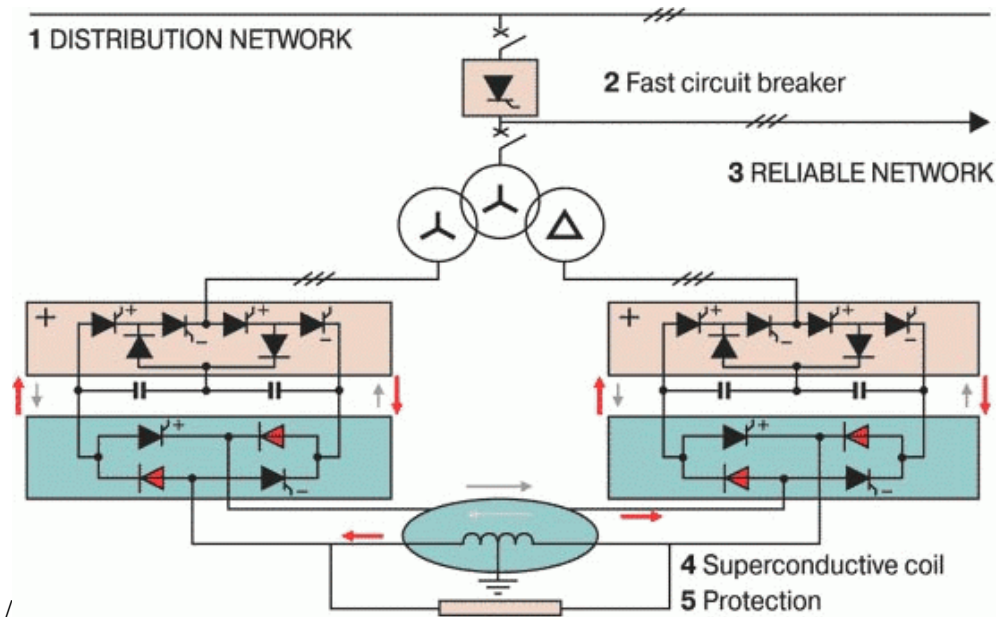


Рис. 3.7 - Класичне компонування системи зі зберіганням енергії в надпровідній обмотці

1. Розподільча мережа
2. Швидкодіючий роз'єднувач
3. Надійна мережа
4. Надпровідна обмотка
5. Захист

Перетворювач і електродвигун повинні бути оптимізовані в плані потужності, що повертається, і інерційного запасу енергії. Треба зазначити, що інерційний принцип має сприяти вирівнюванню величини потужності, що споживається з розподільних мереж протягом циклічних технологічних процесів.

3.6 Надпровідність

Накопичувачі енергії встановлюються для компенсації посадок напруги. Одним з найбільш багатообіцяючих способів зберігання електроенергії є надпровідність, хоча в даний час в Європі практично не використовується. На протязі останніх декількох років широко використовується явище високотемпературної надпровідності. Воно набуло практичного застосування в деяких установках в Канаді та США – або для зміцнення надійності функціонування відповідальних споживачів, або для проведення стабілізації мереж.

На рис. 3.7 показане класичне компонування системи зі зберіганням енергії в надпровідній обмотці. Принцип дії простий: струм циркулює в надпровідній обмотці, енергія з мережі споживається тільки для відшкодування втрат. Якщо в розподільній мережі відбуваються збої (посадці напруги), то електромагнітна енергія, яка зберігається в обмотці, вивільнюється для підживлення «рестабілізованої» мережі. Є також установки, які здатні видавати 10 МВт на протязі декількох секунд, однак типовим є 1 МВт протягом 1-2 с.

4. ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ ЗНИЖЕННЯ НЕСИМЕТРІЇ НАПРУГИ.

4.1. Розрахунок та методика визначення коефіцієнтів несиметрії

Для міжфазних напруг розраховують коефіцієнт несиметрії напруг зворотної послідовності K_{2U} наступним чином.

Для кожного i -го інтервалу за період часу, який дорівнює 24 год, одночасно замірюють діюче значення міжфазних напруг по основній частоті $U_{AB(1)i}$, $U_{BC(1)i}$, $U_{AC(1)i}$ у вольтах, кіловольтах.

Обраховують діюче значення напруги зворотної послідовності по основній частоті $U_{2(1)i}$ за формулою:

$$U_{2(1)i} = \sqrt{\frac{1}{12} \left[\left(\sqrt{3} U_{AB(1)i} - \sqrt{4U_{BC(1)i}^2 - \left(\frac{U_{BC(1)i}^2 - U_{CA(1)i}^2}{U_{AB(1)i}^2} + U_{AB(1)i} \right)^2} \right)^2 + \left(\frac{U_{BC(1)i}^2 - U_{CA(1)i}^2}{U_{AB(1)i}^2} \right)^2 \right]}.$$

(4.1)

Вираховують у відсотках коефіцієнт несиметрії напруг за зворотною послідовністю K_{2U} як результат i -го спостереження за формулою:

$$K_{2Ui} = \frac{U_{2(1)i}}{U_{1(1)i}} \cdot 100, \quad (4.2)$$

Де $U_{2(1)i}$ - діюче значення напруг зворотної послідовності основної частоти для трифазної системи напруг у i -му спостереженні, В, кВ; $U_{1(1)i}$ - діюче значення напруг прямої послідовності основної у i -му спостереженні, В, кВ. При визначенні K_{2U} дозволяється:

- 1) обчислювати $U_{2(1)i}$ методом симетричних складових;
- 2) визначати $U_{2(1)i}$ і за наближеною формулою:

$$U_{2(1)i} = 0,62(U_{нб(1)i} - U_{нм(1)i}), \quad (4.3)$$

де $U_{нб(1)i}, U_{нм(1)i}$ - саме більше і саме менше діюче значення з трьох міжфазних напруг по основній частоті i -го спостереженні, В, кВ.

В цьому випадку відносна похибка обчислення K_{2U} з використанням формули (4.3) замість формули (4.1) не перевищує 8%.

3) застосувати при визначенні $U_{2(1)i}$ діючі значення відповідних напруг з врахуванням гармонічних складових даних напруг натомість діючих значень міжфазних напруг по основній частоті при коефіцієнті спотворення синусоїдальності напруги не перевищуючому 5%;

4) визначати K_{2U} за формулою:

$$K_{2Ui} = \frac{U_{2(1)i}}{U_{ном.мф}} \cdot 100, \quad (4.4)$$

де $U_{ном.мф}$ - номінальне значення міжфазної напруги, В, кВ.

В даному випадку відносна похибка визначення K_{2U} з використанням формули (4.4) замість формули (4.2) чисельно рівна відхиленню напруги $U_{2(1)i}$ від

$$U_{ном.мф}.$$

Значення коефіцієнта несиметрії напруг обчислюють за зворотною послідовністю K_{2U} в відсотках в результаті усереднення N спостережень K_{2U} на інтервалі часу T_{vs} , рівному $3s$, за формулою:

$$K_{2U} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N K_{2Ui}^2}{N}}. \quad (4.5)$$

Кількість спостережень N повинна бути більше 9.

Виміри коефіцієнта несиметрії напруг за нульовою послідовністю K_{0U} проводять у чотирьохпровідних мережах наступним чином.

Визначають значення напруги (діюче) нульової послідовності основної частоти $U_{0(1)i}$ у і-му спостереженні за формулою:

$$U_{0(1)i} = \frac{1}{6} \sqrt{\left[\frac{U_{BC(1)i}^2 - U_{CA(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} - 3 \frac{U_{B(1)i}^2 - U_{A(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} \right]^2 + \left[\sqrt{4U_{BC(1)i}^2 - \left[U_{AB(1)i} - \frac{U_{BC(1)i}^2 - U_{CA(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} \right]^2} - \sqrt{4U_{B(1)i}^2 - \left[U_{AB(1)i} - \frac{U_{B(1)i}^2 - U_{A(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} \right]^2} \right]^2}.$$

Обчислюють коефіцієнт несиметрії напруги нульової послідовності K_{0U} у відсотках шляхом отримання результату і-го спостереження за формулою:

$$K_{0U} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{0(1)i}}{U_{1(1)i}} \cdot 100,$$

де $U_{0(1)i}$ - значення напруги (діюче) нульової послідовності по основній частоті для трифазної системи напруг у і-му спостереженні, В, кВ; $U_{1(1)i}$ - діюче значення міжфазної напруги прямої послідовності основної частоти, В, кВ.

При визначенні K_{2U} дозволяється:

- 1) обраховувати $U_{0(1)i}$ методом симетричних складових;
- 2) визначати $U_{0(1)i}$ при симетрії міжфазних напруг за наступною наближеною формулою:

$$U_{0(1)i} = 0,62(U_{нб.ф(1)i} - U_{нм.ф(1)i}),$$

- 3) застосувати при обчисленні $U_{0(1)i}$ на місці діючих величин міжфазних і фазних напруг основної частоти діючі значення відповідних напруг з урахуванням гармонічних складових цих напруг при коефіцієнті спотворення синусоїдальності напруги не перевищуючому 5%;

- 4) визначати K_{0U} за формулою:

$$K_{0U\bar{i}} = \frac{U_{0(1)\bar{i}}}{U_{ном.ф}} \cdot 100 ,$$

$U_{ном.ф}$ - номінальне значення фазної напруги, В, кВ.

Відносна похибка обчислення K_{0U} з використанням формули (4.9) замість формули (4.7) чисельно рівна відхиленню напруги $U_{1(1)\bar{i}}$ від $U_{ном}$.

Вираховують значення коефіцієнта несиметрії напруг по нульовій послідовності K_{0U} у відсотках як результат усереднення N спостережень K_{0U} на інтервалі часу T_{vs} , рівному $3s$, за формулою:

$$K_{0U} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N K_{0U\bar{i}}^2}{N}} .$$

Число спостережень N повинно бути не менше 9.

4.2. Експериментальне визначення несиметрії напруги на діючих однофазних ЕТП.

Розрахунковий шлях визначення несиметрії потребує знання даних споживної енергосистеми, що може бути зв'язано з відомими труднощами. Крім того, не завжди можливо урахувати компенсацію несиметрії перерозподілу інших навантажень. Несиметрія напружень, викликаєма підключенням однофазних ЕТП, може бути визначена експериментальним шляхом з допомогою спеціального приладу. Ввиду відсутності подібних серійних пристроїв в ВВПЕТО був розроблений та виготовлений такий пристрій, який складається з складеного з активно-ємнісного фільтру, випрямляча та мікроамперметра (рис. 4.1).

При виборі та розрахунку фільтра була використана методика наведена в [11]. Фільтр складається з двох активно-ємнісних контурів, включених на два лінійних навантаження. Ємність C_1 та C_2 та опори R_1 R_2 вибрані таким

чином, що забезпечує наступне співвідношення:

Фільтр включається у вторинні ланцюги трансформаторів напруги. При розрахунку елементів виходили з обчислення достатньої щільності показників, мінімального споживання та мінімальних втрат активної енергії. Якщо на вхід фільтра подати несиметричну трьохфазну напругу, то на виході з'явиться сигнал, пропорційний тільки складовій зворотної послідовності. Значення напруги зворотної послідовності 1 В (1% номінальної) відповідає відхиленню стрілки приладу - 20 мкА. Уся шкала складає 200 мкА, що відповідає 10 В (або 10%).

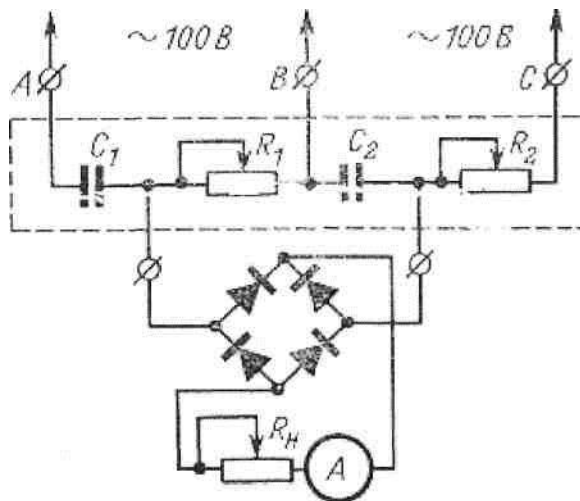


Рисунок 4.1 Схема приладу для виміру α_U

Подальше збільшення приводить до підвищення споживання та втрат активної енергії. Збільшення споживання обмежується потужністю вимірювальних трансформаторів навантаження та збільшенням їх похибок, а зріст втрат може привести до перегріву елементів фільтра та появленню значної напруги небалансу, виявленої зміною температури опору та ємностей.

За допомогою описаного приладу на деяких підприємствах було проведено виміри несиметрії напруг на шинах 6 або 10 кВ, споживаючих однофазні навантаження (електрошлакові та індукційні плавильні печі).

Висновки замірів приведені в табл. 4.1

З п'яти обстежуваних заводів найбільша несиметрія напружень має місце при споживанні однієї або двох печей від підстанції відносно малої потужності. Наприклад, на заводі № 2 споживана та кабельній мережі довжиною 0,5 км від трансформатора потужністю 10 МВА індукційна піч з максимальною потужністю 1000 кВт викликала несиметрію напруги у 2,2 - 2,3 %, яка держалася більш-менш стабільно. При підключенні такої ж другої печі несиметрія декілька знижується. Аналогічні результати отримані на заводі № 5. Печі були підключені до розподільного пункту, одержане споживання по кабелю довжиною 4 км від трансформатора 15 МВА. Найбільша несиметрія напруг була визначена при роботі однієї печі типу ІЧТ-10 потужністю 1000 кВт. При роботі другої печі потужністю 500 кВт несиметрія напруг становила 1,25 - 1,5 %. Включення одночасно двох печей, розфазованих на різні напруги викликало несиметрію у 1,5 - 1,7 %.

Таблиця 4.1. Виміри несиметрії напруг на шинах 6 або 10 кВ при однофазному навантаженні

Завод №	Тип печі	Потужність печі кВт	КІЛЬКІСТЬ печей	Потужність споживної підстанції МВ-А	Несиметрія напружень %
1	ОКБ-905	1000	14	2Х31,5	0,5
2	ІЧТ-6	1000	2	10	2,2-2,3
3	ІЧТ-6, ІЧТ-10	500-1000	2	15	1,25-2,25
4	ІАТ-6	1000	4	2Х40	1,0-1,5
5	Пристрій електрошлакового переплаву	3000	1	2Х30(ТЕЦ)	0,8

Практично симетричний режим має місце при живленні значної кількості печей електрошлакового переплаву на заводі № 5. До кожної секції збірних шин під'єднано по сім пристроїв. Несиметрія (0,5%) виникає за

рахунок незбіжності максимуму навантаження при кількості печей не кратній трьом.

Самим потужним з розглядаємих є пристрій електрошлакового переплаву типа ЕШП-10 потужністю 3000 кВт. Але і в цьому випадку несиметрія напруг незначна, що обумовлюється живленням пристрою безпосередньо від шин ТЕЦ.

Проведені виміри підтверджують отримані вище залежності несиметрії від кількості живлячих пристроїв.

4.3 Схеми симетрируючих пристроїв

Симетрування однофазних навантажень здійснюється при допомозі статичних симетруючих пристроїв. Пристрої можуть бути виконані як з електричними, так і з електромагнітними зв'язками. Пристрої з електричними зв'язками складаються звичайно з ємності та індуктивності, а в пристроях з електромагнітними зв'язками, крім традиційних реактивних елементів, пристосовуються спеціальні трансформатори, автотрансформатори. Є багато схем симетрування, які відрізняються кількістю елементів, способом їх ввімкнення, характером зв'язку між ними.

Вибір та розробка симетруючих пристроїв для ЕТП повинні виконуватись на основі слідуючих вимог до них: 1) мінімально можлива встановлена потужність симетруючих елементів; 2) забезпечення високого коефіцієнта потужності трьохфазної мережі при високому к.к.д. пристрою; 3) можливість застосування стандартного обладнання (пічні трансформатори, конденсатори, дроселі); 4) універсальність схеми пристрою, тобто здатність симетрувати пристрої різних видів нагріву; 5) простота та надійність конструкції. Виходячи з вказаних вимог, розглянемо коротко деякі типи симетруючих пристроїв.

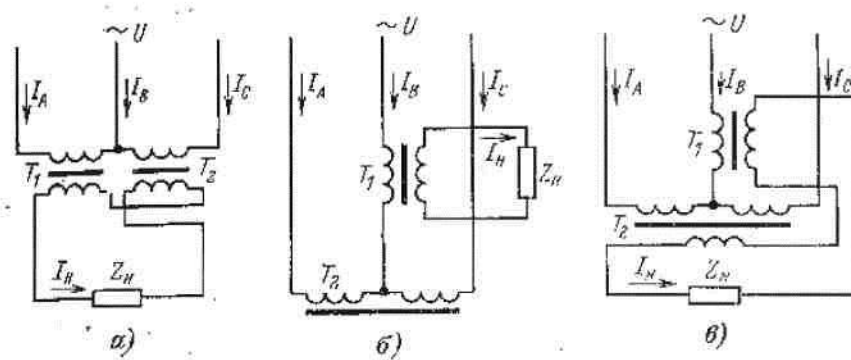


Рисунок 4.2. Трансформаторні схеми живлення однофазного навантаження

а) V-подібна схема; б) Т-подібна схема Скотта; в) L-подібна схема Скотта

Трансформаторні схеми живлення однофазних навантажень від трьохфазної мережі (рис. 4.1) дозволяють одержати необхідну напругу на навантаженні та добитися більш рівномірного завантаження по струму фаз живлячої трьохфазної системи. Простішим подібним пристроєм є схема двох однакових однофазних трансформаторів T_1 та T_2 . Первинні обмотки трансформаторів ввімкнені по схемі відкритого трикутника на лінійну напругу мережі, а вторинні обмотки з'єднані послідовно та зустрічно. Лінійні струми I_A, I_B, I_C відносяться як 1:2:5. Струм навантаження:

$$I_n = \frac{\sqrt{3} \cdot k \cdot U}{z_n},$$

де k - коефіцієнт трансформації трансформаторів T_1 та T_2 .

Якщо однофазне навантаження підключити до трьохфазної мережі з допомогою двох однофазних трансформаторів T_1 та T_2 у відповідності з рис. 5.1(б), то одержимо Т-образну схему Скотта. Частіше трансформатори конструктивно з'єднують в один трансформаторних агрегат, відомий під назвою трансформатор Скотта. Відношення між лінійними струмами аналогічні відношенням в схемі рис. 5.1 (а), а струм навантаження

визначається за виразом:

$$I_n = \frac{\sqrt{3} \cdot k_1 \cdot U}{2 z_n},$$

де k_1 - коефіцієнт трансформації трансформатора T_1 ; коефіцієнт трансформації T_2 дорівнює 5.

Трансформатор T_2 служить в цій схемі лише для створення співвідношення струмів, а активна потужність передається тільки через трансформатор T_5 .

Другим варіантом схеми Скотта є L-образне ввімкнення трансформаторів (рис. 5.1, в). В цій схемі кінець первинної обмотки однофазного трансформатора T_1 приєднується до середини первинної обмотки однофазного трансформатора T_2 . Співвідношення витків трансформаторів обираються таким чином, що вторинні напруги трансформаторів рівні, тобто струм навантаження в цьому випадку дорівнює:

$$k_1 = \frac{2}{\sqrt{3}} k_2.$$

$$I_n = \frac{\sqrt{6} \cdot k_1 \cdot U}{2 z_n},$$

а співвідношення лінійних струмів $I_A : I_B : I_C = 1,37 : 1,0 : 0,37$.

По даній схемі англійська фірма EFCO здійснювала живлення однофазних соляних ванн для нагріву під закалювання інструменту з швидкоріжучої сталі. Однак подібні схеми не компенсують струмів зворотної послідовності, що викликається однофазним навантаженням, та отже, не звільняють живлячі мережі від несиметрії напруг та додаткових втрат.

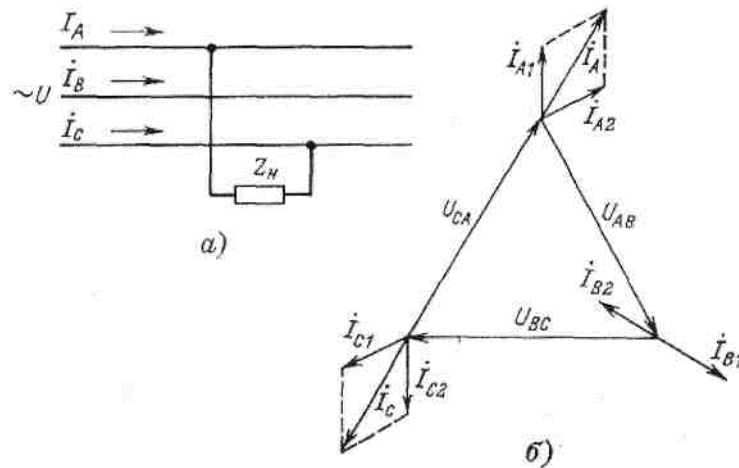


Рисунок 4.3. Підключення однофазного навантаження до трьохфазної мережі (а) та розклад струмів на симетричні складові (б).

Покажемо принципову неможливість компенсації струмів зворотної послідовності при допомозі трансформаторних схем. Якщо миттєві значення струму та напруги виразити крізь діючі значення тоді миттєва потужність

$$u = \sqrt{2}U \sin \omega t$$

$$i = \sqrt{2}I \sin(\omega t - \varphi) ,$$

дорівнює:

$$p = UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t - \varphi) ,$$

Або

$$p = p' + p'' ,$$

де p' - постійна складова потужності; p'' - змінюється з подвійною частотою.

Середнє значення активної потужності:

$$P = UI \cos \varphi ,$$

а середнє значення складової p'' , яке змінюється по синусоїді, дорівнює нулю. У загальному випадку при нерівномірному навантаженні трьох фаз

миттєве значення загальної потужності можна отримати, складаючи миттєві значення потужностей окремих фаз, при цьому можна складати окремо постійні та змінні складові.

Сума трьох постійних складових дає загальну потужність трьохфазної мережі:

$$P_3 = \Sigma UI \cos \varphi .$$

Сума трьох кривих, які змінюються по синусоїдальному закону з рівною частотою, дає нову синусоїду, яка змінюється з тією ж частотою. При нерівномірному навантаженні всі синусоїди мають різні амплітуди. Складання таких синусоїд, зсунутих відносно один одного на 120° , дає нуль. Отже, якщо миттєва потужність при однофазному навантаженні є величиною змінною, яка змінюється по закону синуса, то миттєва потужність при рівномірному трьохфазному навантаженні незмінна в часі. Тому перетворення трьохфазного струму в однофазний повинно супроводжуватись

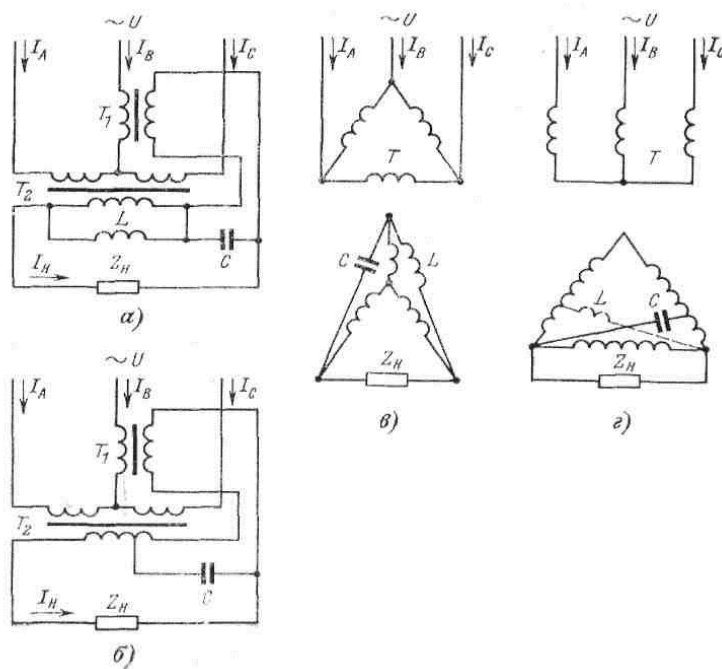


Рисунок 4.3. Схема трансформаторних симетруючих пристроїв.

а,б - з трансформатори Скотта; в,г - схеми інституту електродінаміки АН України.

перетворенням постійної в часі потужності в коливаючу. Очевидно, що це можливо лише в випадках наявності елементів, здібних запасати частину енергії протягом однієї долі періоду, а потім віддавати в слідуєчу частину періоду (ємність, індуктивність). Добитися перетворення однофазного навантаження в рівномірне трьохфазне, яким треба з'єднанням обмоток трансформатора неможливо. Крім того, трансформаторні схеми мають низький коефіцієнт потужності мережі ($0,7\cos\varphi_H$).

Розглянемо випадок підключення однофазного навантаження Z_H до лінійної напруги трьохфазної мережі (рис. 5.2,а). Струми в фазах:

$$I_A = U_{CA}/Z_H; I_C = -U_{CA}/Z_H; I_B = 0.$$

Симетричні складові прямої та зворотної послідовностей фазних струмів:

$$I_{B1} = \frac{1}{3}(I_B + aI_C + a^2I_A) = \frac{1}{\sqrt{3}}j\frac{U}{Z_H};$$

$$I_{B2} = \frac{1}{3}(I_B + a^2I_C + aI_A) = \frac{1}{\sqrt{3}}j\frac{U}{Z_H};$$

$$I_{C1} = a^2I_{B1}; I_{C2} = aI_{B2};$$

$$I_{A1} = aI_{B1}; I_{A2} = a^2I_{C2}.$$

$$I_{A1}+I_{A2}=I_A, I_{C1}+I_{C2}=I_C \text{ та } I_{B1}+I_{B2}=0$$

Принцип та способи компенсації реактивної складової струму навантаження достатньо добре відомий та не вимагає пояснень.

Тому, обчислюючи навантаження чисто активної, розглянемо, як можна скомпенсувати струми зворотної послідовності. З рис. 4.2,б видно, що якщо в фазі А створити струм, направлений назустріч I_{A2} та рівний йому, в фазі С - струм направлений назустріч I_{C2} та дорівнює йому, а в фазі В - струм дорівнює I_{B2} та зворотній йому, то струми зворотної послідовності будуть скомпенсовані. Такі струми можуть бути створені підключенням до

лінійної напруги U_{BC} дроселя та до лінійної напруги U_{AB} конденсаторної батареї. В наслідок одержана відома схема симетрування, яка називається схемою Штейнметця та буде докладно розглянута нижче.

На рис. 4.3 приведені трансформаторні симетруючі пристрої, де поряд зі спеціальними трансформаторами передбачено додаткову або ємність, або індуктивність, або і та, і інша одночасно. Додавання реактивних елементів забезпечує повну компенсацію струмів зворотної послідовності та в багатьох випадках сприяє підвищенню коефіцієнта потужності мережі.

Відомий одиничний випадок застосування приведених схем для симетрування ЕТП. Схема з трансформатором Скотта, ємністю та індуктивністю (рис. 4.3,а) була застосована у 50-х роках фірмою AEG для встановлення потужності 1000 кВА, а аналогічна схема, але без індуктивності (рис. 4.3,б) була використана при живленні однофазної електропечі для графітизації.

В теперішній час з'явилося декілька оригінальних схем симетруючих пристроїв з електромагнітними зв'язками, розроблених Інститутом електродинаміки АН України. Крім виконання своєї основної функції, трансформатор в цих схемах приймає участь і в симетруванні (рис. 4.3, в,г).

Проведений аналіз вказує, що при симетруванні активного навантаження найбільш повне використання потужності симетруючих елементів в схемі рис. 4.3,в досягається при числі витків на вторинній стороні трансформатора в співвідношенні 1: 0,37: 5. Сумарні витрати потужності на трансформацію, компенсацію та симетрування приведені у табл. 4.5.

Схема на рис. 4.3,г призначена для симетрування навантажень з низьким коефіцієнтом потужності. Точка підключення ємності до відпайки однієї з обмоток трансформатора визначається фазовим кутом навантаження. Переважність даної схеми в відсутності індуктивності та економії сумарної потужності на трансформацію, компенсацію та симетрування в порівнянні з

іншими схемами. Наприклад, при коефіцієнті потужності навантажень 0,5 сумарні витрати потужності в цій схемі на 26 % менш, ніж в розглядаємій нижче схемі з дроселем-дільником.

Однак при застосуванні даної схеми виникають значні труднощі. По-перше конструкція трансформатора та місце виводу відпайки залежить від коефіцієнта потужності навантажень, що вимагає знання точного значення останнього. Якщо ж передбачити компенсацію однофазного навантаження до визначення коефіцієнта потужності, то економічна ефективність схеми значно знижується. По-друге, необхідність розрахунку частини обмотки трансформатора на великий струм (до 60 % контурного струму навантаження) призводить до ускладнення конструкції трансформатора, збільшенню його габаритів та вартості. Тому питання застосування розглянутих трансформаторних схем симетрування може виникнути, якщо для електропечі потрібна розробка нового пічного трансформатора, та повинен вирішуватись в кожному конкретному випадку шляхом техніко-економічних розрахунків. Коефіцієнт потужності трьохфазної мережі цієї схеми складає 0,95 - 0,98. Тому в техніко-економічних розрахунках слід обчислити збільшення втрат в мережі на 4-11 % порівняно зі схемами, де коефіцієнт потужності мережі дорівнює 5. Якщо в схему на рис. 4.3,г ввести індуктивність, як вказано пунктиром, то пристрій дозволяє симетрувати чисто активне навантаження. Основні дані схеми приведені в табл. 4.5.

Суттєвим недоліком розглянутих схем є необхідність застосування спеціальних нестандартних трансформаторів. Крім того, деякі з цих схем (наприклад, з трансформатором Скотта) мають знижений коефіцієнт потужності трьохфазної мережі.

Значну групу симетруючих пристроїв представляють схеми з застосуванням автотрансформаторів або дільників напруги, деякі з них вказані на рис. 4.4. В цих схемах автотрансформатори не є генераторами струмів зворотної послідовності та служать тільки для створення необхідної

напруги по величині та фазі на симетруючих елементах в цілях більш повного їх використання по потужності. Спрощеною є схема, яка складається з дільника та індуктивності (рис. 4.4,а) або ємності (рис. 4.4,б). Якщо в цих схемах виключити дільники, то одержуються одноелементні схеми, які дозволяють симетрувати однофазне навантаження з фіксованим фазовим кутом (30°). Коефіцієнт потужності мережі при цьому дорівнює 0,5. Ввімкнення дільників дозволяє симетрувати однофазне навантаження при різних значеннях кута φ_n та збільшити коефіцієнт потужності мережі, максимальне значення котрого може досягти 0,707 - для схеми з індуктивністю, та 0,866 для схеми з ємністю. Від кута φ_n буде залежити відношення плеч дільника, тобто зміна фази навантаження тягне за собою необхідність переносу місця підключення індуктивності (ємності) до дільника.

На рис. 4.4,в приведена схема симетрування, одержана в результаті об'єднання двох розглядаємих схем. Схема забезпечує симетрування фазних струмів при зміні по величині навантажень шляхом змінення потужності лише з одного з елементів (або ємності, або індуктивності). Вимагаємі значення потужності елементів дані в табл. 5.5. Коефіцієнт потужності мережі при цьому залишається достатньо високим.

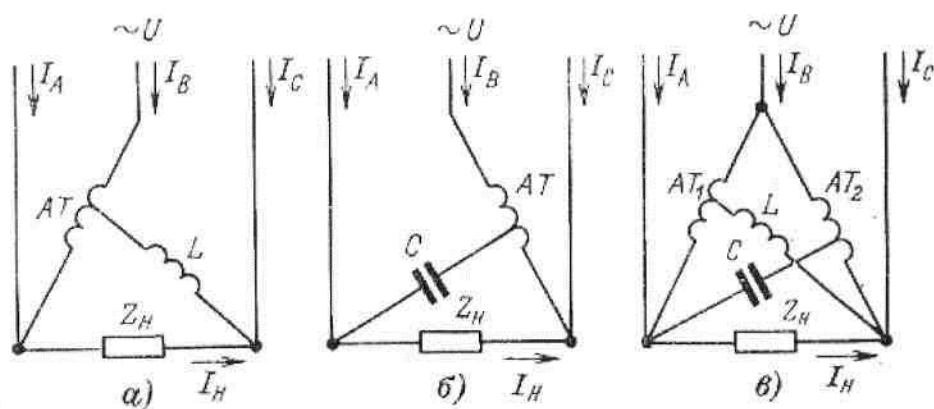


Рисунок 4.4. Схеми симетруючих пристроїв з автотрансформаторами, а - з індуктивністю; б- ємністю; в- індуктивністю та ємністю

Наприклад, при зміні навантаження від 100 до 50% номінального значення коефіцієнт потужності - не менш 0,95. Однак схема не може бути рекомендована до широкого застосування ввиду своєї складності та наявності великої кількості симетруючих елементів.

Симетруючі пристрої з електричними зв'язками мають два головних виконання: з'єднання елементів в зірку та трикутник (схема Штейнметца). Обмежене пристосування мають симетруючі пристрої з елементами, ввімкненими по схемі трьохпроменевої зірки. При цьому однофазне навантаження може бути ввімкнене або на лінійну напругу (рис. 4.5,а), або як промінь зірки (рис. 4.5,б). В цих схемах напруги на симетруючих елементах, а в іншому випадку і на навантаженнях, залежать від параметрів останньої та можуть змінюватись в широких межах. Пристрій по такій схемі може знайти застосування, якщо номінальна напруга навантаження або симетруючих елементів вище номінальної напруги мережі. Наприклад, пристрій по схемі рис. 4.5,а розроблено фірмою Brown-Boweri для електроконтактного пристрою потужністю 1500 кВА.

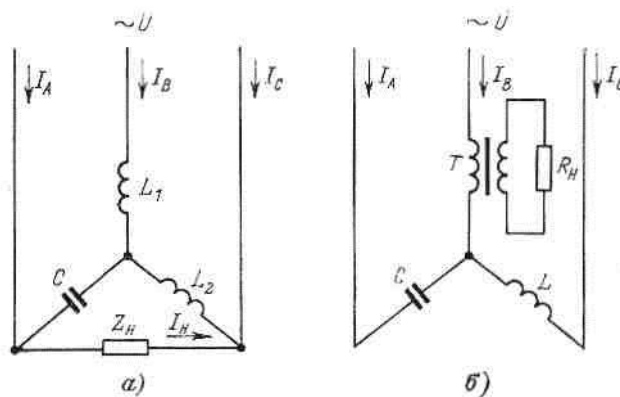


Рисунок 4.5. Схеми симетруючих пристроїв з ввімкненням елементів в "зірку"

а) навантаження на лінійній напрузі; б) навантаження як "промінь зірки"

Питання про симетрування може не виникати, якщо однофазне електропічне навантаження живиться від параметричного джерела струму,

тому останній одночасно може являтися і симетруючим пристроєм (по схемі трьохпроміневої зірки, рис. 4.5,б). Для цього необхідно виконання певних умов симетрування активного навантаження:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} = \sqrt{3} R_n ,$$

а при наявності узгоджуючого трансформатора Т з номінальною напругою первинної обмотки $U_{ном}$ повинно виконуватися рівняння:

$$U_{ном} / U = \sqrt{3} .$$

Коефіцієнт потужності трьохфазної мережі при цьому дорівнює 1,0 (див. табл. 4.1)

Найбільше розповсюдження для симетрування однофазних навантажень, в тому числі електротермічних, одержало зображення на рис. 4.6,а схема Штейнметца. Це обумовлено простотою схеми, ввімкненням симетруючих елементів та навантаження на лінійну напругу, коефіцієнтом потужності трьохфазної мережі, що дорівнює 1,0. Векторна діаграма струмів та напруги приведена на рис. 4.6,б.

Сумарна потужність симетруючих елементів С та L складає при цьому 1,16 активної потужності навантаження P_0 . Однак схема Штейнметца ефективна лише при симетруванні часто активного навантаження. З іншої сторони, більшість ЕТП має індуктивний фазовий кут навантаження. Це означає, що при застосуванні схеми Штейнметца обов'язковим являється доведення коефіцієнту потужності навантаження до 1,0. Тому в порівнянні витрати потужності повинна входити і потужність компенсуючих батарей C_k . Можливо симетрування індуктивно-активного однофазного навантаження по схемі Штейнметца, але це супроводжується різким погіршенням коефіцієнта потужності трьохфазної мережі.

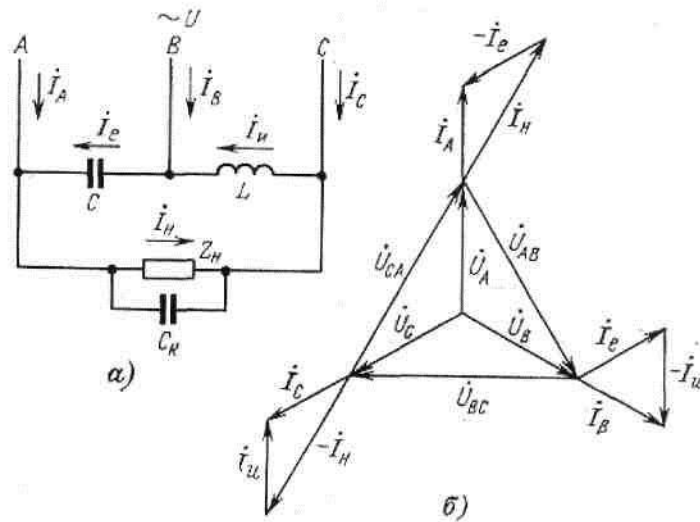


Рисунок 4.6. Схема Штейнметца (а),
векторна діаграма струмів та напружень (б).

Приваблива своєю простотою та можливістю симетрувати індуктивне навантаження схема симетрування, приведена на рис. 5.7,а. Компенсація струмів зворотної послідовності здійснюється при допомозі конденсаторної батареї C та дроселя L . Конденсатори підключаються до однієї з фаз та відпайки дроселя. Дросель має індуктивний зв'язок M між плечами, утворюваними точкою ділення. Коефіцієнт зв'язку при цьому повинен бути близьким до 1,0.

При симетризуванні індуктивно-активного навантаження кожному значенню фазового кута φ_n відповідає одна відпайка дроселя. При зміні кута φ_n наприклад його збільшенні, вимагає точка підключення батареї переміщується, як вказано на рис. 4.7,а.

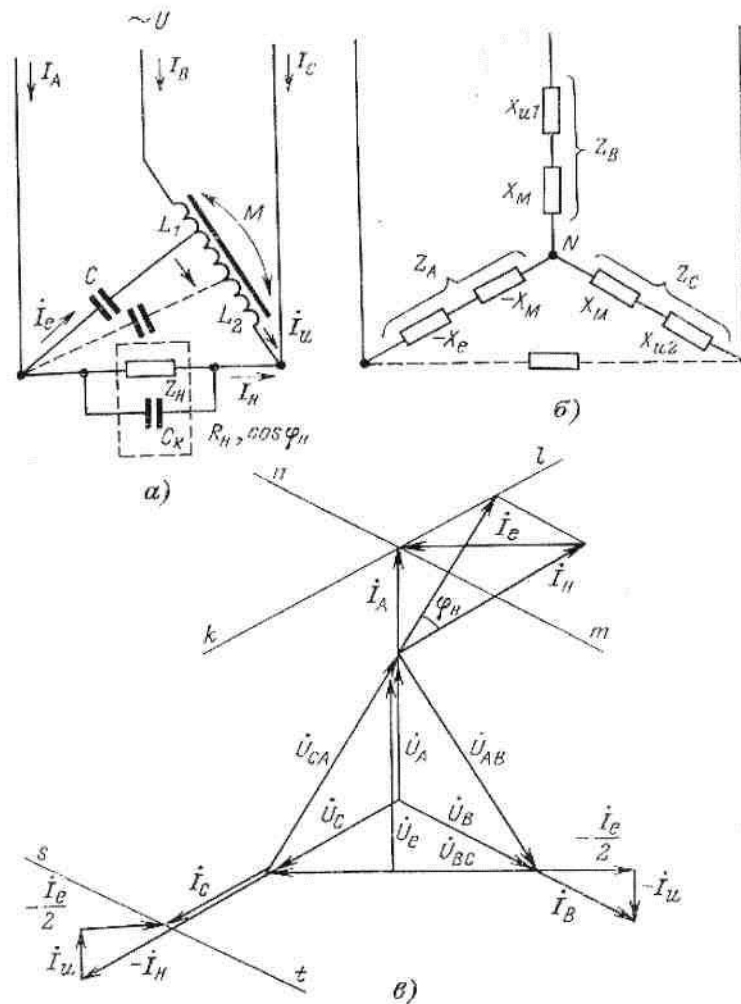


Рисунок 4.7. Схема з дроселем - дільником (а), схема зміщення (б) та векторна діаграма струмів та напруг при $\varphi_H = 30^\circ$ (в).

Задача складається з знаходження такого значення φ_H , при якому сумарні витрати на симетруючу та компенсуючу потужність були б мінімальними. Для цього уявимо основні параметри схеми в функції фазового кута навантаження.

Аналіз та розрахунок схеми можна спростити, якщо не враховувати індуктивність розсіювання дроселя як дуже малу величину, та якщо схему з індуктивним зв'язком представити схемою заміщення без індуктивних зв'язків (рис. 4.7,б). В результаті отримаємо еквівалентні реактивні опори симетруючих елементів, з'єднаних в зірку:

$$\left. \begin{aligned} Z_A &= -j (X_e + X_M); \\ Z_B &= j (X_{u1} + X_M); \\ Z_C &= j (X_{u2} + X_M), \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

де X_e - реактивний опір ємності С; X_{u1} , X_{u2} - індуктивні опори плеч дроселя; X_M - опір взаємної індуктивності.

Умови симетрування однофазного навантаження за допомогою реактивних елементів, з'єднаних у зірку записуються у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} Z_A &= \sqrt{3} R_n; \\ Z_B &= 3 R_n \operatorname{tg} \varphi_n; \\ Z_C &= \sqrt{3} R_n \end{aligned} \right\}$$

де R_n - активний опір симетруючого навантаження. З врахуванням (5.1) та (5.2) запишемо систему рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} X_e + X_M &= \sqrt{3} R_n \\ X_{u1} + X_M &= 3 R_n \operatorname{tg} \varphi_n \\ X_{u2} + X_M &= \sqrt{3} R_n \\ X_M &= \sqrt{X_{u1} X_{u2}} \end{aligned} \right\}$$

(5.3)

розв'язок якої відносно параметрів симетруючих елементів дає умови симетрування при різних значеннях φ_n :

$$\left. \begin{aligned} X_{u1} &= \frac{3\sqrt{3} R_n \operatorname{tg}^2 \varphi_n}{\sqrt{3} \operatorname{tg} \varphi_n + 1} \\ X_{u1} = X_e &= \frac{\sqrt{3} R_n}{\sqrt{3} \operatorname{tg} \varphi_n + 1} \\ X_M &= \frac{3 R_n \operatorname{tg} \varphi_n}{\sqrt{3} \operatorname{tg} \varphi_n + 1} \end{aligned} \right\} \quad (4.4)$$

Нескладні розрахунки, проведені з використанням (4.4), дозволили отримати вирази для потужностей симетруючих елементів:

$$Q_e = \frac{P_0(1 + \sqrt{3} \operatorname{tg} \varphi_n + 3 \operatorname{tg}^2 \varphi_n)}{1 + \sqrt{3} \operatorname{tg} \varphi_n} \quad (4.5)$$

$$Q_{u1} = \frac{P_0}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{1 + \sqrt{3} \operatorname{tg} \varphi_n} \quad (4.6)$$

$$Q_{u2} = \frac{P_0}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\sqrt{3} \operatorname{tg} \varphi_n \sqrt{1 - \sqrt{3} \operatorname{tg} \varphi_n + 3 \operatorname{tg}^2 \varphi_n}}{1 + \sqrt{3} \operatorname{tg} \varphi_n} \quad (4.7)$$

де P_0 - активна потужність, яка споживається однофазною установкою.

Потужність батареї, яка компенсується C_k визначається за виразом:

$$Q_k = P_0(\operatorname{tg} \varphi_0 - \operatorname{tg} \varphi_n),$$

де φ_0 - вихідний фазовий кут навантаження

Сумарні витрати на симетрування визначаються рівнянням, отриманим від додавання (4.5) - (4.8):

Перший доданок отриманого виразу характеризує потужність елементів на симетрування навантаження з фазовим кутом φ_n , а другий -

потужність компенсуючої ємності для доведення фазового кута з вихідного значення φ_0 до φ_n . На рис. 4.8 приведені залежності необхідних потужностей дроселя та конденсаторних батарей, а також сумарних витрат потужності від фазового кута навантаження, побудовані для двох значень φ_n (30° та 60°).

Аналіз кривих показує, що мінімальна встановлена потужність реактивних елементів має місце при симетруванні індуктивно - активного навантаження з фазовим кутом 30° , тобто при коефіцієнті потужності 0,866. Звідси слідує важливий висновок, що для більшості однофазних ЕТП, які мають невисокий коефіцієнт потужності, найбільш доцільною є схема з дроселем - дільником, до середньої точки якого підключається конденсаторна батарея. Економія потужності симетруючих елементів в порівнянні зі відомою схемою Штейметца складає 0,29 активної потужності навантаження (рис.4.8, табл.4.2).

Однак у випадку доведення коефіцієнта потужності навантаження до 0,866 схема з дроселем-дільником буде мати дві батареї конденсаторів, ввімкнених на різні напруги. При застосуванні одного типу конденсаторів це може привести до недовикористання частини конденсатора по потужності. Тоді витрати симетруючої потужності для схеми з дроселем-дільником стають приблизно рівними витратам в схемі Штейметца. Але в схемі з дроселем - дільником конденсатори для симетрування ввімкнені на напругу нище номінальної, а це приводить до збільшення їх тривалість роботи та надійності пристрою.

Для ЕТП, коефіцієнт потужності яких вище 0,866 слідує застосовувати схему Штейметца. При живленні електропечі від пічного трансформатора у виняткових випадках може виявитися доцільним застосування симетруючого пристрою зі спеціально розробленим трансформатором. Однак питання застосування таких пристроїв повинно вирішуватися в кожному конкретному випадку на основі техніко-економічних розрахунків.

Таблиця 4.2. Потужність елементів в долях

Схема пристрою	Вимага- ємий $\cos\varphi_n$	Потужність елементів в долях				P_0 на	
		Трансформація	Компенсація	Симетрування		Сумарні витрати	Коефіцієнт потужності мережі
				Індуктивний елемент	Ємнісний елемент		
5.3,в	1,0	1,03	$\operatorname{tg}\varphi_0$	0,5	0,5	2,03+ $\operatorname{tg}\varphi_0$	1,0
5.3,г	0,11-0,5 (натур)	1,2- 1,32	-	-	10-2	11,2- 3,32	0,98- 0,95
5.3,г (з індуктивні елементами)	1	1,1	$\operatorname{tg}\varphi_0$	0,5	0,5	2,1+ $\operatorname{tg}\varphi_0$	1
5.4, б	0,866	1,16	$\operatorname{tg}\varphi_0$ 0,58	- 0,29	1,16	3,03 + $\operatorname{tg}\varphi_0$	0,866
5.4, в	1	1	$\operatorname{tg}\varphi_0$	0,72	0,5	2,22 + $\operatorname{tg}\varphi_0$	1
5.5,б	1	1	$\operatorname{tg}\varphi_0$	0,58	0,58	2,16 + $\operatorname{tg}\varphi_0$	1
5.6	1	1	$\operatorname{tg}\varphi_0$	0,58	0,58	2,16 + $\operatorname{tg}\varphi_0$	1
5.7(при φ_n =30)	0,866	1	$\operatorname{tg}\varphi_0$ 0,58	- 0,58	0,87	1,87 + $\operatorname{tg}\varphi_0$	1

5. ПРИЛАДИ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

5.1. Вимірювач струму та відхилення напруги типу 43203



Даний прилад призначений для вимірювання сили змінного струму і відхилення напруг від нормального у відсотках. Ряд номінальних напруг:

- для трьохфазних мереж: 100, 380 В;
- для однофазних мереж: $100/\sqrt{3}$; $380/\sqrt{3}$.

Прилад може бути використаний при експлуатації мереж трьохфазного струму.

Прилад забезпечує вивід вимірювальної інформації показника якості електричної енергії (відхилення напруг) і сили змінного струму для реєстрації самописними приладами постійного струму на номінальну напругу 5 В з вхідним опором не менш як 1 кОм, або іншими реєстраторами.

Таблиця 5.1. Робочі умови застосування

Показник	Значення
Напруга живлячої мережі, В	176-250
Частота змінного сигналу з живлячої мережі, Гц	49,3 - 50,3
Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої струму чи напруги в вимірювальних ланцюгах, %, не більше	20

Діапазони вимірювань і межі допустимих значень абсолютної основної похибки (Δ) приладу в нормальних умовах експлуатації (таблиця 5.3) відповідають значенням, вказаних в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2. Діапазон вимірювань і межі допустимих значень основної похибки приладу

Вид вимірювань	Діапазон вимірювань	Значення вимірюваної величини	Межа допустимого значення абсолютної основної похибки	Ступінь квантування
Відхилення напруг, %	-20...+20	-20...-10 -10...+10 +10...+20	$\pm 2 \pm 1$ ± 2	0.01
Сила змінного струму	0...5 А	0...5 А	± 0.125	0.01

Таблиця 5.3. Умови експлуатації приладу

Впливаюча величина	Нормальне значення
Температура оточуючого повітря, °С	20 ± 5
Відносна вологість повітря, %	30-80
Атмосферний тиск P_a (мм рт. ст.)	84 -106,7 (630-800)
Частота змінного сигналу з живлячої мережі, Гц	$50 \pm 0,5$
Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої струму чи напруги в вимірювальних колах, %, не	5
Коефіцієнт зворотної послідовності напруги, %	20
Напруга живлячої мережі, В	198-242

Швидкодія приладу - не менше 5 вимірів за секунду. Число розрядів індикації - 3,5.

Прилад має уніфікований вихідний сигнал - напруга постійного струму - $0,5 \text{ В} \pm 0,5 \text{ В}$, що характеризується статичними характеристиками. Пульсації напруги постійного струму не більше 1 % верхньої межі вимірювання вихідного сигналу. Опір навантаження не менше 1 кОм.

Межа допустимого значення додаткової похибки приладу, викликаной зміною температури оточуючого повітря в межах робочих температур на кожні 10°C , рівний половині межі допустимого значення основної похибки.

Межа допустимого значення додаткової похибки приладу, що викликана дією зовнішнього однорідного магнітного поля з індукцією 0,5 мТл, що змінюється синусоїдально з часом з частотою мережі живлення, рівна половині межі допустимого значення основної похибки.

Межа допустимого значення додаткової похибки приладу, що викликана впливом підвищеної вологості в робочих умовах застосування, дорівнює межі допустимого значення основної похибки.

Схема підключення приладу до мережі і вимірювання показників якості приведена на рис. 5.2.

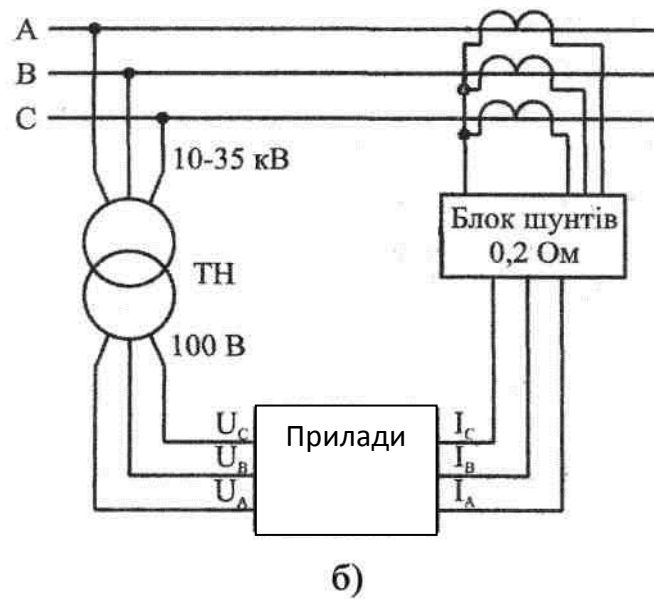
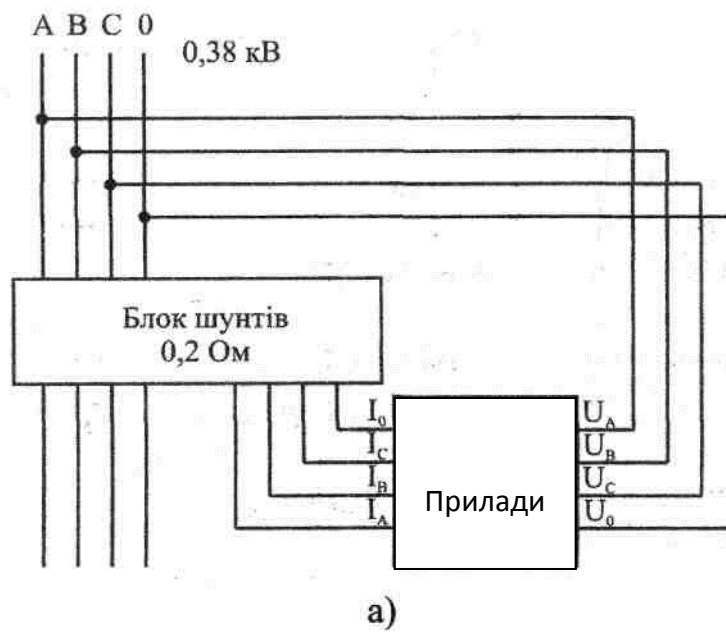


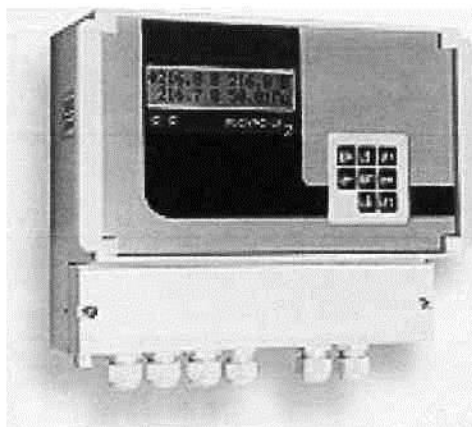
Рис. 5.2. Схема підключення до мережі приладів вимірювання якості електроенергії

а) до мережі 0,4 кВ

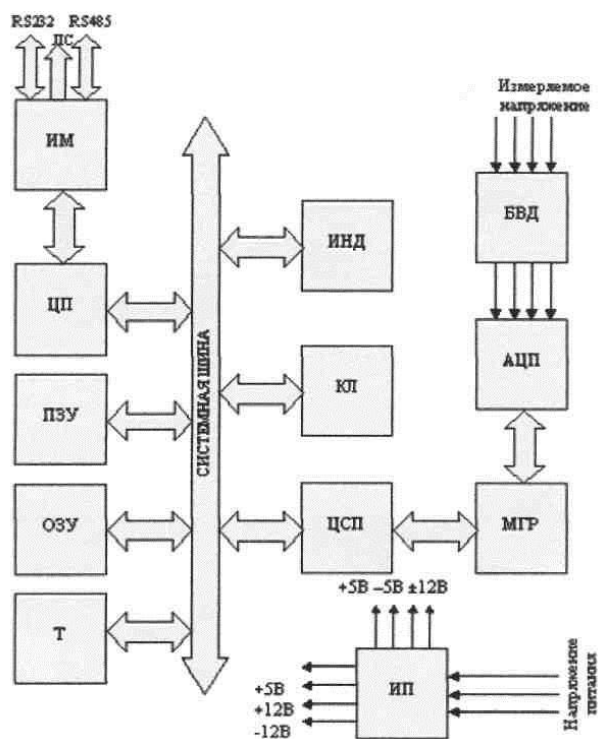
б) до мережі 10-35 кВ

5.2. "РЕСУРС-UF", "РЕСУРС-ІДО".

РЕСУРС-UF



Структурна схема приладу



ИМ - інтерфейсний модуль

ЦП - центральний процесор,

ПЗУ, ОЗУ - постійне, оперативно запам'ятовуючий прилад,

ИНД, що запам'ятовує, - індикатор,

КЛ - клавіатура,

ЦСП - цифровий сигнальний процесор,

МГР - модуль гальванічної розв'язки,

АЦП - аналого-цифровий перетворювач,

БВД - блок вхідних дільників.

Т - таймер.

Призначення.

Вимірник параметрів якості електроенергії «РЕСУРС-UF» призначений для автоматизації комерційного контролю показників якості електроенергії в електричних мережах загального призначення при змінному трифазному і однофазному струмі частотою 50 Гц.

Сфера застосування.

Організація автоматизованого обліку показників якості електроенергії на промислових і енергозбутових підприємствах, в органах енергонагляду, а також для енергоаудиту.

Прилад може експлуатуватися як в автономному режимі, так і у складі багаторівневих автоматизованих систем обліку і контролю електроенергії (АСКУЕ).

Основні функції, що виконуються приладом в модифікаціях «РЕСУРС-UF» і «РЕСУРС-UF2».

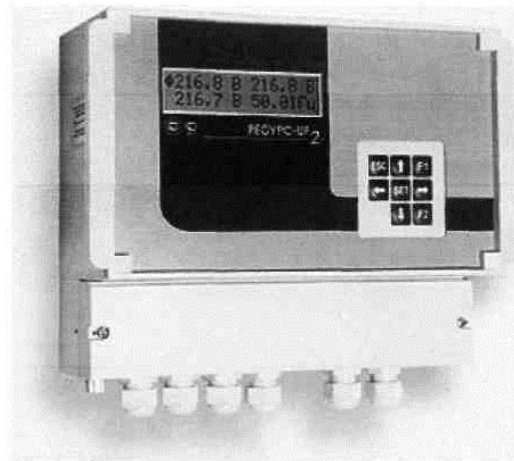
Вимірюємі показники якості, відповідні вимозі ДЕСТ 13109-97.

- відхилення частоти;
- стале відхилення напруги;
- коефіцієнт спотворення синусоїдальності напруги;
- коефіцієнт n-ої гармонійної складової напруги;
- коефіцієнт несиметрії напруги по зворотній послідовності;
- коефіцієнтів несиметрії напруги по нульовій послідовності;
- коефіцієнт тимчасового перенапруження
- вимір тривалості і глибини провалу, тривалості і коефіцієнта тимчасового перенапруження з фіксацією часу початку події і його параметрів.

Прилад вимірює також інші допоміжні параметри електроенергії (технічні характеристики):

- вимір параметрів якості електроенергії в однофазних, трифазних трьох- і чотирьохпровідних електричних мережах напругою 220/380 В безпосередньо, а вище - через вимірювальні трансформатори напруги;
- введення номінальних значень, нормальних відхилень показників якості електроенергії, що гранично допускаються;
- вимір середніх значень показників якості електроенергії за інтервал часу, певний ДЕСТ 13109: сталі відхилення напруги - 1 хв.; коефіцієнти несиметрії - 3 хв.; відхилення частоти – 20 с;
- збереження середніх параметрів за кожен інтервал усереднення протягом трьох діб;
- розрахунок середніх значень показників якості електроенергії за 30 хвилин;
- облік часу виходу контрольованих параметрів за нормальні і значення, що гранично допускаються, за інтервал часу - 30 хвилин, добу, розрахунковий період;
- забезпечення збереження часу виходу за нормальне значення, що гранично допускається, за поточний і попередній розрахунковий період, в цілому, і за кожну добу окремо, а також за кожних 30 хвилин цієї доби;
- забезпечення збереження інформації не менше чим про 30 останніх провалів і перенапруження;
- вироблення реального часу (години, хвилини, і секунди) і календаря (день, місяць, рік).

Додаткові функції, що виконуються приладом лише в модифікації
«РЕСУРС-UF2»



- вимір значень фазних струмів, що діють;
- вимір активної, реактивної і повної енергії однофазної або трифазної мережі;
- вимір фазового кута між струмом і напругою;
- вимір коефіцієнтів спотворення кривої струму;
- вимір коефіцієнтів гармонійних складових струму до сорокової гармоніки.

Прилад забезпечує збереження всіх вихідних і розрахункових даних і безперервну роботу таймера при відключенні електроживлення протягом 15 діб. Прибор забезпечує захист від несанкціонованого редагування вихідних даних. Прибор оснащений інтерфейсом RS232C/RS485 і забезпечує передачу інформації за запитом в АСКУЕ.

Основне електроживлення приладу здійснюється змінним однофазним струмом напругою $(220+22/-33)$ В і частотою (50 ± 1) Гц. Додаткове електроживлення здійснюється від однойменної фази з аналогічними параметрами. Потужність, споживана приладом - не більше 40 ВА. Робочий діапазон температур приладу - від мінус 10 до 50°C . Можливе постачання приладів з робочим діапазоном температур від -20 до $+60^{\circ}\text{C}$. Ступінь захисту корпусу перетворювача від зовнішніх дій відповідає класу IP64.

Загальні технічні характеристики.

- Електроживлення вимірника здійснюється змінною однофазною напругою 220/380 В і частотою (50 ± 5) Гц.
- Електроживлення може здійснюватися від однієї з фаз контрольованої мережі з аналогічними параметрами.
- Вхідний опір вимірника по входах 220/380 В не менше 400 кОм.
Вхідний опір вимірника по входах 57,74/100 В не менше 100 кОм.
- Потужність, споживана вимірником по колах живлення, не більше 20ВА.
- Час встановлення робочого режиму не більше 5 хв.
- Вимірник забезпечує безперервну роботу протягом всього терміну служби.
- Габаритні розміри не більше 280x245x125 мм.
- Маса не більше 3 кг.
- Напруга радіоперешкод, що створюються вимірником, не перевищує значень, вказаних в ДЕСТ 29216 для класу А.
- Середній час відновлення працездатного стану не більше 2 годин.
- Середнє напрацювання на відмову не менше 20 000 годин в нормальних умовах експлуатації.
- Середній термін дії не менше 5 років.

5.3. ЕРИС-КЕ

(модифікації 02, 03, 04, 05, 06)

Призначення і сфера застосування

Вимірювачі показників якості електричної енергії ЕРИС-КЭ (модифікації 02, 03, 04, 05, 06) (далі вимірники) призначені для виміру показників якості електричної енергії встановлених ДЕСТ 13109-97 і похідних від них.

Сфера застосування вимірників:

а) контроль якості електроенергії в однофазних і трифазних електричних

мережах з номінальною частотою 50 Гц і системах енергопостачання загального призначення;

б) обстеження електромереж підприємств (енергоаудит);

в) вимір активної і реактивної енергії як лічильник електричної енергії відповідно до ДЕСТ 30206-94 і ДЕСТ 26035-83.

Опис

Вимірювачі виконані у вигляді функціональний закінчених блоків в корпусі з ізоляційного матеріалу і мають до чотирьох каналів для виміру напруги і до чотирьох каналів для виміру струмів.

Вимірювачі забезпечують перетворення вхідних сигналів з частотою 256 вибірок на один період по кожному каналу. Після цифрової обробки результати вимірів і службова інформація відображаються на цифровому і графічному дисплеї або за допомогою зовнішньої ЕОМ.

Вимірювачі мають три межі вимірів напруги: 220 В; $100\sqrt{3}$ В; 100 В.

У мережах 0,38 кВ входи для виміру напруги підключаються до контрольованих точок (ділянкам) мереж безпосередньо, а в мережах 6 кВ і вище - через вимірювальні трансформатори.

Залежно від виконання, канали струму підключаються за допомогою комплекту струмовимірювальних кліщів або шляхом безпосереднього включення в розрив струмових кіл.

Вимірювачі можуть живитися або від незалежного джерела (100 - 220) В, 50 Гц, або від вимірювальних кіл напруги.

Вимірювачі здійснюють вимір і обчислення наступних показників якості електроенергії по ДЕСТ 13109-97:

а) стале відхилення напруги;

б) розмах зміни напруги;

в) доза флікера;

г) коефіцієнти спотворення синусоїдальності кривої напруги і струмів;

д) коефіцієнти n-их гармонійної складової напруги і струмів;

- є) коефіцієнти несиметрії напруги і струмів по зворотній послідовності;
- ж) коефіцієнти несиметрії напруги і струмів по нульовій послідовності;
- і) відхилення частоти;
- к) момент виникнення імпульсу;
- л) імпульсна напруга (амплітуда і тривалість);
- м) коефіцієнт і тривалість тимчасового перенапруження;
- н) тривалість і глибину провалу напруги.

Вимірники також здійснюють вимір, обчислення і зберігання наступних характеристик режиму в контрольованій мережі:

- а) значення струмів і напруги, що діють ;
- б) миттєві значення струмів і напруги з дискретністю по 256 точок на період;
- в) повна і активна потужності з врахуванням спотворень;
- г) фазовий кут зрушення між напругою і струмом основної частоти;
- д) фазовий кут зрушення між гармонійними складовими напруги і струму;
- є) фазовий кут зрушення між складовими струму і напруги;
- ж) фазовий кут зрушення між складовими струму і напруги нульової послідовності;
- з) повна, активна і реактивна потужності;
- і) активна і реактивна потужності зворотної і нульової послідовності;
- к) повна, активна і реактивна потужності на частотах гармонік;
- л) повна, активна і реактивна електрична енергія;
- м) активна енергія з врахуванням спотворень.

Вимірювачі також можуть здійснювати реєстрацію миттєвих і діючих значень кривих струмів і напруги.

Вимірювач модифікації ЕРИС-КЕ.06 на додаток до вищепереліченого може здійснювати вимір активної і реактивної енергії і бути використаний як лічильник електричної енергії класу точності 0, 5S в двох типах виконання

приладів ЕРИС-КЕ.06/1 для однофазного кола і ЕРИС-КЕ.06/3 для трифазного кола. Дозволяє окремо враховувати електричну енергію для періодів, коли якість електричної енергії відповідає ДЕСТ 13109-97 і для періодів коли вона не відповідає вимогам даного ДЕСТу, а також величину і параметри цієї невідповідності для кожного періоду.

5.4. РМ 175



Аналізатор якості електроенергії РМ175 SATEC є недорогим, компактним, багатфункціональним, трифазним вимірником, реєстратором і аналізатором якості енергії (по ДЕСТІ3109-97).

Для спрощення монтажу доступне готове вирішення РМ175-SC - багатфункціональний вимірювальний перетворювач із зовнішніми трансформаторами струму.

Вимір енергії відбувається в чотирьох квадрантах, клас точності 0.2S.

При використанні GSM модему, який можна опціонально замовити з приладом, зв'язок стає безпроводним. Дальність зв'язку обмежена лише зоною покриття стільникового оператора. У комплект йде безкоштовний пакет PAS, що працює з GSM модемом.

Переносний електроаналізатор EDL175XR SATEC реалізує всі можливості аналізатора якості електроенергії РМ175.

Аналізатор якості електроенергії РМ175 SATEC вимірює прямі

показники якості електроенергії (ПКЕ). PM175 SATEC спеціально розроблений для задоволення вимог широкого спектру користувачів, від розробників електричних панелей до операторів підстанцій.

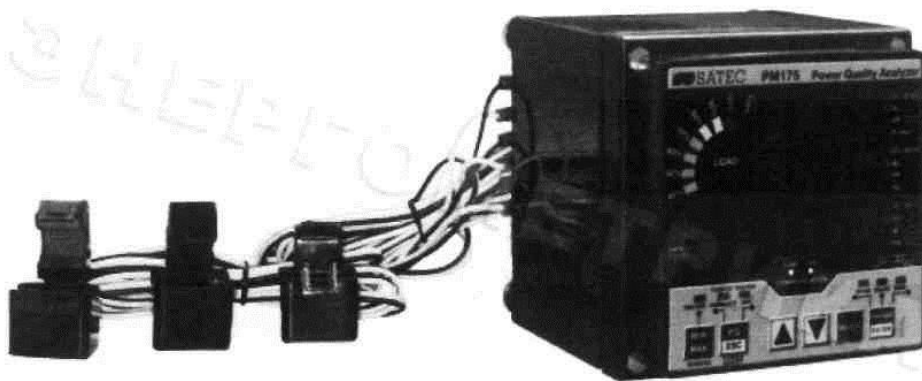
Яскравий 3-х рядковий дисплей LED забезпечує зручне читання даних з електроаналізатора PM175 SATEC. Можлива видалена установка дисплея (на відстань до 1000 метрів від приладу).

Два порти зв'язку дозволяють локальне і видалене автоматичне читання даних з приладу і його програмування. Для цього в комплект з електроаналізатором PM175 SATEC входить спеціалізоване ПО PAS для збору даних.

Програма PAS може бути використана для завдання установок PM 175 SATEC через порти зв'язку, для здобуття даних реального часу (моніторингу) і зареєстрованих даних і подій, а також для оновлення версії програмного забезпечення приладу.

В приладі передбачені власні різні опції видаленого зв'язку, включаючи телефонні лінії, локальну мережу і інтернет. Спільна робота з інтелектуальним комунікатором ETC2002 пропонує, використовуючи інтернет, можливість доступу для моніторингу і контролю енергосистем з будь-якого місця і у будь-який час.

5.5. PM175-SC



PM175-SC - аналізатор якості електроенергії, що поставляється в комплекті з роз'ємними трансформаторами струму. Це спеціальна версія приладу PM175, придатна для випадків, коли складно або практично неможливо підключити існуючий вимірювальний трансформатор струму безпосередньо до вимірювального приладу. Роз'ємні трансформатори струму дозволяють підключати вимірювальний прилад в струмовий ланцюг без її розриву.

Номінальний первинний струм: 5А; внутрішній діаметр: 16 мм.

Стандартна довжина кабелю, що поставляється в комплекті з трансформатором струму: 2.5 м.

У комплекті з приладом PM175 безкоштовно поставляється російськомовна версія програми PAS.

Технічні характеристики

- 3 входи напруги і 3 входи змінного струму ізолювано гальванічно, для прямого підключення до лінії електроенергії або через трансформатори струму і напруги
- Багатофункціональний 3-фазний вимірювальний прилад (реальні значення (RMS), що діють, напруга, струми, потужності, $\cos\phi$, струм нейтралі, несиметрія напруги і струмів, частота)
- Вбудований аналізатор гармонік, КИС (THD) напруги і струму, TDD струму і дочинник струму, КИС (THD) інтергармонік, до 50-ої гармоніки
 - Спектр гармонік, а також кути по напрузі і струму
 - Вимір інтегральних значень струму, напруги, потужності, THD, TDD.
- Лічильник електроенергії в чотирьох квадрантах, клас точності 0.2S (IEC62053-22:2003)
- Time-of-Use (TOU), 8 загальних та тарифних регістрів енергії/інтегральної потужності по 8 тарифів, 4 сезони по 4 типи днів, 8 змінювань тарифів в день, дуже легко програмована тарифна схема.
- Автоматичний денний профіль для енергії і максимальної інтегральної

потужності (загальні і тарифні реєстри)

- Вбудований програмований контролер, 16 тригерів, що управляють; програмовані установки і затримки часу; управління вихідними реле; час реакції 1/2 -періоди

- Реєстратор подій, щоб реєструвати внутрішню діагностику, події тригерів і операції цифрових входів/релейних виходів

- 16 розділів реєстрації даних; зручне програмування запису в базах даних на періодичній основі або по будь-якому внутрішньому або зовнішньому тригеру.

- Два розділи реєстрації форми хвилі; одночасне фіксування запису 6 каналів змінного струму на одному графові; частота запису 32, 64 і 128 точок за один період; запис до 20 періодів перед подією; безперервний запис до 30 секунд на частоті 32 точки за один період.

- Реєстратор якості енергії типу EN50160 (статистика відповідності EN50160, статистика супроводу по гармоніках EN50160, вмонтований аналізатор якості енергії; запрограмовані установки та гістерезис; приготовлені до використання звіти).

- Запис і моніторинг форм хвилі протягом реального часу; одночасний запис по 6 каналам 4-х періодів на частоті запису 128 точок за один період.

- Зручний для читання 3-рядковий (2 по 4 символи +1 по 6 символів) яскравий дисплей, що має світлодіодні індикатори, регульований час оновлення, опція прокручування сторінок з регулюванням часу експозиції, автоповернення на сторінку за умовчанням

- Графічний елемент на світлодіодах, що відображує навантаження у відсотках відносно визначеного користувачем струму навантаження

- Два цифрові входи для моніторингу зовнішніх контактів і здобуття імпульсів від лічильників енергії, води і газу

- 2 релейних виходу для аварійної сигналізації та управління, а також для вихідних імпульсів енергії.

- 2 опційних оптично ізольованих аналогових виходи з внутрішнім

джерелом живлення; опції виходу 0-20мА, 4-20 мА, 0-1 мА, ± 1 мА (± 5 мА за замовленням)

- 2 опційних оптично ізольованих аналогових входа з внутрішнім джерелом живлення; опції входу 0-20мА, 4-20 мА, 0-1 мА, ± 1 мА (± 5 мА по замовленню)

частота 50/60 Гц

- Опційний аналоговий розширювач AX-8 (до двох розширювачів на один РМ175), забезпечує додатково 2 по 8 аналогових виходів; опції роботи 0-20мА, 4-20 мА, 0-1 мА, ± 1 мА (з джерелом живлення 50/60 Гц)

- Точний внутрішній годинник з резервним живленням від батареї

- 1 Мбайт RAM з резервним живленням від батареї для запису довготривалих даних і форм хвилі

- Захист за допомогою паролю установки параметрів та зчитування з панелі приладу і через канал зв'язку. Записи в розділ реєстрації подій (Event log) спроб несанкціонованого доступу в прилад

- Легке оновлення поточної версії програми приладу через будь-який порт зв'язку.

6. ПРИЧИНИ ПОЯВИ ВИЩИХ ГАРМОНІК В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

6.1 Джерела вищих гармонік в СЕПП

Причиною появи вищих гармонік струму, напруги в системах електропостачання промислових підприємств є наявність нелінійних навантажень (тобто навантажень, які мають нелінійну вольт-амперну характеристику). Нелінійні навантаження спотворюють синусоїдальність форми кривої струму, який протікаючи по поздовжнім елементам системи електропостачання викликає несинусоїдальні спади напруги. В результаті спотворюється і форма кривої напруги на шинах.

На сучасних промислових підприємствах значне розповсюдження отримали різноманітні перетворювачі, що містять елементи силової електроніки (діоди, тиристори, транзистори). Дані установки є одним з основних джерел вищих гармонік. Найбільш розповсюдженими є трьохфазні мостові схеми вентильних перетворювачів. Ці схеми являються також основою для побудови більш складних схем багатомостових перетворювачів.

Розглянемо амплітудний спектр струму мостового перетворювача. На підприємствах вентильні перетворювачі працюють, як правило, на проти е.р.с., активно-індуктивне навантаження або на активне навантаження.

Форма кривої залежить від кута керування α , що задається системою імпульсно-фазового керування і кута комутації γ , що визначається за виразом

$$\gamma = \arccos(\cos \alpha - I_{d*} X_{K*}) \quad (6.1)$$

де I_{d*} - відносне (в долях від номінального) значення випрямленого струму;

X_{K*} - відносне значення індуктивного значення контуру комутації, приведене до потужності трансформатора перетворювача. Для некерованого перетворювача очевидно $\alpha = 0$, $\cos \alpha = 1$.

Порядок (номера) вищих гармонік струмів визначається згідно з виразом

$$\nu = kp \pm 1 \quad (6.2)$$

де p - пульсність перетворювача;

k - ряд натуральних чисел: 1; 2; 3...

Для мостового перетворювача, у якого $p = 6$, $\nu = 5; 7; 11; 13; 17; 19....$

До інших досить поширених джерел вищих гармонік в системах електропостачання промислових підприємств належать:

- дугові сталеплавильні печі;
- дугові вакуумні печі;
- газорозрядні лампи;
- установки електродугового та контактного зварювання;
- силові трансформатори;
- побутові напівпровідникові прилади (персональні комп'ютери, телевізори).

Розглянемо деякі з них.

В системах електропостачання підприємств *дугові сталеплавильні печі* розглядаються як різко змінні навантаження, що обумовлюють коливання напруги в мережі. На генерування вищих гармонік звичайно звертається увага в меншій мірі, оскільки в порівнянні з вентильними перетворювачами тієї ж потужності, рівні вищих гармонік, що генеруються ДСП, виявляються в 3-4 рази менше. Сказане відноситься до періоду розплавлювання, на протязі якого коливання і вищі гармоніки проявляються більш інтенсивно, ніж в інші періоди плавки (окислення, рафінування). Тому для практичних цілей важливо знати рівні вищих гармонік для стадії розплавлення. В цей період криві струмів і проти-е.р.с. дуг значно спотворені, спотворення різні по

фазам мережі; струми вищих гармонік утворюють системи прямої і оберненої послідовностей. Значення коефіцієнту несиметрії гармонік струму $k_{2\nu}$, що визначається відношенням вищих гармонік оберненої $I_{\nu 2}$ і прямої $I_{\nu 1}$ послідовностей

$$k_{2\nu} = \frac{I_{\nu 2}}{I_{\nu 1}} \quad (6.3)$$

як правило, зростає із зростанням ν . Для різних ДСП $k_{2(2,3)} \approx 0.1 \div 0.3$, $k_{2(5,7)} \approx 0.2 \div 0.4$

Наявність магнітної несиметрії між фазами мережі обумовлює зростання гармонік, кратних трьом, до 13 5, 5-ї – до 11 %, 11-ї – до 4 %. Випрямляюча дія електричної дуги являється причиною появи постійної складової струмів, що також збільшує долю вищих гармонік в струмі печі; це збільшення пов'язане також із зростанням вищих гармонік намагнічуючого струму пічного трансформатора. Оскільки нелінійність дуги ДСП проявляється по-різному в залежності від потужності печі, матеріалів електродів, складу і особливостей підготовки шихти, системи керування режимом горіння дуг і багатьох інших факторів, прогнозування рівнів вищих гармонік на основі лише теоретичних міркувань є досить важким; коректність відповідних результатів невелика. Тому для оцінки вищих гармонік струму, що генеруються ДСП, рекомендується користуватися в якості аналога результатами вимірювань значень I_ν / I_1 , %, проведених на діючих ДСП.

Крім гармонік порядків $\nu = 2, 3, 4...$ струм ДСП містить так звані інтергармоніки.

Дугові вакуумні печі отримують живлення від вентильних перетворювачів, які комутуються по 6-пульсним схемі зі зрівнювальним реактором. Регулювання струму навантаження здійснюється з допомогою дроселів насичення, що ввімкнені в анодні ланцюги. Крива струму мережі виявляється такою ж, як і для мостових вентильних перетворювачів

електроприводів. Вентильний перетворювач, зібраний із некерованих вентилів, завдяки введенню в ланцюг реакторів (дроселів) насичення працює як керований з діапазоном регулювання кута керування $4-20^\circ$. Рівень неканонічних вищих гармонік струму виявляється досить значним ($I_2 \approx 8\%$, $I_3 \approx 6\%$).

Побутове навантаження (телевізори, персональні комп'ютери) являються джерелами вищих гармонік непарних порядків, рівні яких є досить значними. В сучасних телевізорах (головним чином кольорових) використовуються двохнапівперіодні випрямлячі; паралельно навантаженню $R_{мл}$ телевізійного приймача включається конденсатор для згладжування пульсацій випрямленого струму. В схемах випрямлячів використовуються тиристори або транзистори.

Відносні значення вищих гармонік струму телевізорів різних типів знаходяться в межах $K_{I(3)} = 75-85\%$, $K_{I(5)} = 45-60\%$; $K_{I(7)} = 12-30\%$, $K_{I(11)} = 8-15\%$.

В переважній більшості випадків фази перших гармонік струму співпадають, що призводить до їх сумування. Фази гармонік 3-го порядку мають близькі значення, відношення загального струму $I_{3\Sigma}$ до арифметичної суми струмів третьої гармоніки ΣI_3 знаходиться в межах

$$\frac{I_{3\Sigma}}{\Sigma I_3} = 0.65 - 0.85 \quad (6.4)$$

при кількості телевізорів від 10 до 100.

В результаті гармоніки 3-го порядку в нульовому проводі I_{30} досягають значень

$$I_{30} = 3K_{03}\Sigma I_3 \quad (6.5)$$

при значенні $K_{03} = 0.75-0.85$, причому більші значення K_{03} мають місце при меншій кількості ввімкнених телевізорів.

Для 9-ї гармоніки, яка також утворює систему нульової послідовності, $K_{09} = 0.05 - 0.25$.

Сумування гармонік 5 і 7-го порядків відбувається при коефіцієнті $K_{5,7} = 0.2 - 0.8$.

Спектр струму мережі персональних комп'ютерів аналогічний.

Газорозрядні лампи знаходять широке застосування в промислових і міських мережах. Доля їх в освітлювальному навантаженні окремих виробництв складає 75-80 %. Нелінійність вольт-амперної характеристики кола дугового розряду ламп являється причиною спотворення форми кривої струму, що споживається з мережі. В спектрі присутні гармоніки непарних порядків. Найбільші значення мають гармоніки 3, 5, 7, 9-го порядків.

Зварювальні випрямлячі. В промисловості широке застосування знаходять зварювальні установки, в яких в якості джерела живлення використовуються напівпровідникові випрямлячі. Зварювальні випрямлячі комутуються по трьохфазній мостовій схемі з використанням некерованих вентилів або керованих – тиристорів.

В розрахунках зварювальна дуга враховується у вигляді постійної проти-е.р.с. Струми вищих гармонік, що генеруються зварювальними випрямлячами, різні для окремих режимів роботи зварювальних установок. В залежності від навантаження зварювальний випрямляч, зібраний по трьохфазній мостовій схемі, може працювати в одному з трьох режимів комутації:

- переривчастих струмів при малих навантаженнях, якому відповідає двохвентильна комутація (А);
- змішаної двох- і трьохвентильної комутації при середніх навантаженнях (В);
- трьохвентильної комутації при великих навантаженнях (С).

Аналіз показує, що в кривих струмів знаходяться тільки непарні вищі гармоніки. Рівні 5-ї і 7-ї гармонік струму є досить нестабільними; невеликі зміни умов горіння дуги можуть призводити до збільшення чи зменшення

струму 5-ї і 7-ї гармонік в декілька разів. В реальних кривих струму зварювальних випрямлячів присутні вищі гармоніки парних порядків і кратні трьом; основною причиною їх появи являється розкид кутів запалення груп вентилів, який обумовлений розкидом і нестабільністю характеристик окремих вентилів. Дає про себе знати також підмагнічування магнітопроводу трансформатора постійним магнітним потоком.

6.1.1. Розрахунок вищих гармонік в СЕПП

Визначимо рівень вищих гармонік напруги і величину коефіцієнта викривлення синусоїдальної кривої напруги при підключенні ТПЧ. Розрахункова схема зображена на рис. 7.1.

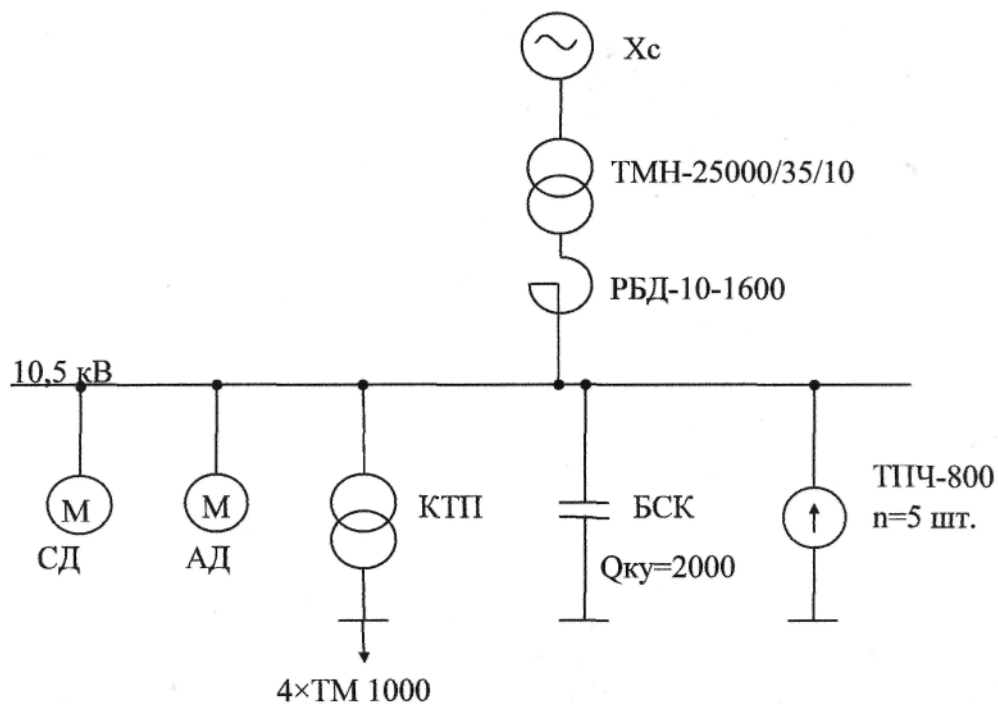


Рис. 6.1. Розрахункова схема до розрахунку рівня вищих гармонік Вихідні дані до розрахунку:

$$N_{\text{тр}}=4, S_{\text{тр}}=1000 \text{ кВА}, Q_{6\text{к}}=2000 \text{ кВар}$$

$$N_{\text{сд}}=2, P_{\text{сд}}=100 \text{ кВт}, U_{\text{н}}=10\text{кВ}$$

$$N_{\text{ад}}=3, P_{\text{ад}}=250 \text{ кВт},$$

$$N_{\text{тпч}} = 5, S_{\text{тпч}} = 1240 \text{ кВА}, S_{\text{гпп}} = 25 \text{ МВА}$$

За розрахунковою схемою складається схема заміщення рис. 6.1.

Опір елементів схеми заміщення:

- опір енергосистеми:

де згідно завдання. $X_c = 0$

Опір двох обмоткового трансформатора зв'язку з енергосистемою:

$$X_{\text{мрв}} = \frac{11}{S_{\text{тр}}} v = \frac{11}{1 \cdot 25} = 0,4v$$

Опір реактора:

$$X_{\text{pv}} = v X_p = 0,14v$$

Опір цехових трансформаторів:

$$X_{\text{мрв}} = \frac{34}{N_{\text{тп}} \cdot S_{\text{тр}}} = \frac{34}{4 \cdot 1} = 9v$$

Опір асинхронних двигунів:

$$X_{\text{адв}} = \frac{17}{N_{\text{ад}} \cdot P_{\text{ад}}} = \frac{17}{3 \cdot 0,25} = 23 \text{ v Ом}$$

Опір синхронних двигунів:

$$X_{\text{сдв}} = \frac{17}{N_{\text{сд}} \cdot P_{\text{сд}}} = \frac{17}{2 \cdot 0,1} = 85 \text{ v Ом}$$

Опір батареї конденсаторів:

$$X_{\text{бкв}} = \frac{U_n^2}{Q_{\text{бк}}} \cdot \frac{1}{v} = \frac{10^2}{2} \cdot \frac{1}{v} = \frac{50}{v} \text{ Ом}$$

Розрахунок проводимо для двох режимів роботи:

1. Батареї конденсаторів вимкнені

Еквівалентний опір схеми заміщення в послідовній ділянці:

$$X_{\text{еквлv}} = X_{\text{трв}} + X_{\text{cv}} = 0,4 + 0 = 0,4 \text{ v Ом}$$

Еквівалентний опір елементів схеми заміщення на паралельній ділянці:

$$X_{\text{екв2v}} = \frac{1}{\frac{1}{X_{\text{екв1v}}} + \frac{1}{X_{\text{адv}}} + \frac{1}{X_{\text{сдv}}} + \frac{1}{X_{\text{тпv}}}} =$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{0,4} + \frac{1}{23} + \frac{1}{85} + \frac{1}{9}} = 0,41 \text{ в Ом}$$

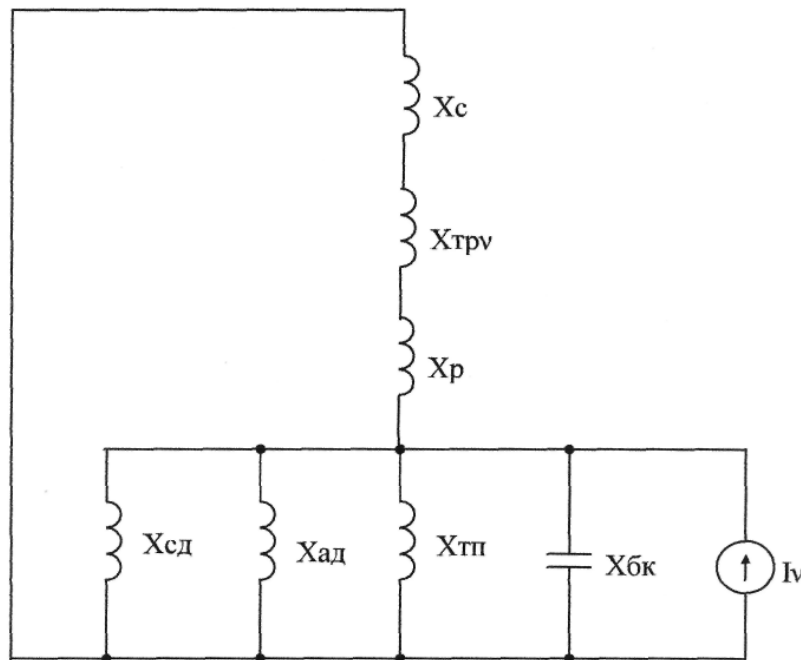


Рис. 6.2. Схема заміщення до розрахунку рівня вищих гармонік

Струм який генерується нелінійним навантаженням.

Струм першої гармоніки перетворювача:

$$I_{\text{н.1тпч}} = \frac{0,9 \cdot U_a \cdot I_a}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{н.м}} \cdot \cos \varphi} = \frac{0,9 \cdot 800 \cdot 1550}{\sqrt{3} \cdot 10000 \cdot 0,8} = 80,6 \text{ А}$$

Максимальні значення рівнів вищих гармонік струму, для групи однакових вентиляльних перетворювачів частоти

Струм, який генерується нелінійним навантаженням:

$$I_{\text{нv}} = \frac{I_{\text{н.1тпч}} \cdot n}{[1,11 \cdot (v \pm 1)]} = \frac{80,6 \cdot 5}{1,1 \cdot (v \pm 1)} \text{ А}$$

Розрахунок вищих гармонік при вимкнених батареях конденсаторів зводимо до таблиці 6.1.

Коефіцієнт викривлення синусоїдальної кривої на шинах 10 кВ:

$$k_{U_n} = \frac{\sqrt{3} \cdot x_{екв2.v} \cdot I_q \cdot \sqrt{n_v}}{U_n} \cdot 100 = \frac{\sqrt{3} \cdot 0,41 \cdot 4858 \cdot \sqrt{5}}{10000} \cdot 100 = 7,7 \%$$

Струм на секції

$$I_q \geq k_{qp} \cdot I_{\Sigma min.v} = 12,05 \cdot 403 = 4858 \text{ A}$$

Коефіцієнт поточкорозподілу:

$$k_{qp} = \frac{x_{e.v}}{x_{екв2.v} + x_{ev}} = \frac{0,44}{0,41 + 0,440} = 12,05$$

Аномальні гармоніки струму враховуються введенням коефіцієнту, що дорівнює 1,2. Таким чином коефіцієнт викривлення синусоїдальності кривої напруги на шинах 10 кВ при вимкнених БК:

$$k_U = 1,2 \cdot k_U = 1,2 \cdot 7,7 = 9,3 > 5 \%$$

2. Батареї конденсаторів увімкнені

Еквівалентний опір схеми заміщення:

$$\begin{aligned} X_{екв2v} &= \frac{1}{\frac{1}{X_{екв1v}} + \frac{1}{X_{адv}} + \frac{1}{X_{сдv}} + \frac{1}{X_{тпv}} - \frac{1}{X_{бкv}}} = \\ &= \frac{1}{\frac{1}{0,4} + \frac{1}{23} + \frac{1}{85} + \frac{1}{9} - \frac{v}{50}} = \frac{v}{2,434 - 0,020 v^2} \end{aligned}$$

Номінальний струм БСК:

$$I_{бкн} = \frac{Q_{н.бк}}{\sqrt{3}U_n} = \frac{2000}{1,73 \cdot 10} = 116 \text{ A}$$

Струм v -ї гармоніки в колі БСК

$$I_{\text{бкв}} = K_v I_{\text{бкн}}$$

K_v - коефіцієнт кратності струму v -ї гармоніки:

$$K_v = \frac{X_{\text{екв}}}{X_{\text{бкв}}} = \frac{v}{2,434 - 0,020 v^2} \cdot \frac{v}{50} = \frac{v^2}{121,7 - 1,00 v^2}$$

Таблиця 6.1. Розрахунок ВГ при увімкнених БК

Розрахункова величина	Номер гармоніки			
	5	7	11	13
Струм ТПЧ v -ї гармоніки $80,6 \cdot 5$ $[1,11 \cdot (v \pm 1)]$	72,6	51,9	33,0	27,9
Кратність струму $K_v = \frac{v^2}{121,7 - 1,00v^2}$	0,2585	0,6738	166,99	-3,5748
Струм гармоніки у колі БК $I_{\text{бкв}} = K_v I_{\text{бкн}}$	29,88	77,89	1931	-413,27

Еквівалентний струм БК

$$I_{\text{бк}} = \sqrt{\sum_{i=1}^7 I_{vm}^2} = \sqrt{30^2 + 78^2 + 1931^2 + (-413,3)^2} = 1976 \text{ А}$$

Коефіцієнт перевантаження БК за струмом:

$$K_I = \frac{I_{\text{бк}}}{I_{\text{бкн}}} = \frac{1976}{115,6} = 17,09 > K_{\text{доп}} = 1,3$$

Необхідне встановлення силових резонансних фільтрів.

Коефіцієнт викривлення синусоїдальної кривої напруги даного режиму

роботи:

$$K_{нс} = 1,2 \cdot \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^7 U_{vm}^2}}{U_1} = 1,2 \cdot \frac{\sqrt{299^2 + 556^2 + 8775^2 + (-1590)^2}}{10000} \cdot 100 = 10,7 \%$$

$$K_{нс} = 10,7 \% > K_{нс, доп} := 5 \%$$

$$X_{бк5} = \frac{50}{5} = 10,0 \text{ Ом} \quad X_{бк11} = \frac{50}{11} = 4,55 \text{ Ом}$$

$$X_{бк7} = \frac{50}{7} = 7,1 \text{ Ом} \quad X_{бк13} = \frac{50}{13} = 3,85 \text{ Ом}$$

$$U_{бк5} = 30 \cdot 10,0 = 299 \text{ В} \quad U_{бк11} = 1931 \cdot 4,5 = 8775 \text{ В}$$

$$U_{бк7} = 78 \cdot 7,1 = 556 \text{ В} \quad U_{бк13} = -413 \cdot 3,8 = -1590 \text{ В}$$

Розрахунок показує, що в обох режимах роботи системи електропостачання несинусоїдальність напруги перевищує допустимі значення. Необхідне встановлення силових резонансних фільтрів.

6.2 Застосування активних і гібридних фільтрів для зменшення рівнів вищих гармонік в СЕПП

6.2.1 Структура та принцип дії активного фільтру

ФКП являються багатофункціональними пристроями, в теперішній час знаходять переважające застосування в системах електропостачання промислових підприємств для компенсації реактивної потужності і мінімізації рівнів вищих гармонік. Однак масове їх застосування дозволило виявити їх деякі, досить значні недоліки. Це, по-перше, значна встановлена потужність і необхідність використання для досягнення допустимого рівня несинусоїдальності ФКП декількох гармонік, що знижує надійність приладів і збільшує значення струмів короткого замкнення в системах електропостачання. По-друге, на якість фільтрації суттєво впливає амплітудно-частотна характеристика вхідного опору живлячої мережі зі сторони вузла. При нестабільності цієї характеристики, досить ймовірний в потужних системах 220 кВ і вище, можливе виникнення ефекту антирезонансу з появою перенапруг і надструмів в СЕПП. У випадку, коли

неможна виключити появу вищих гармонік більш низького порядку, ніж частота налаштування ФКП з найменшим номером гармоніки, можливі значні перевантаження ФКП і їх пошкодження (наприклад, в мережах з ДСП). При складному характері амплітудного спектру струмів і напруг мережі, коли мають місце також інтергармоніки, застосування ФКП може виявитися неефективним.

В зв'язку з цим в остання 15-20 років велись інтенсивні пошуки рішень, котрі дозволили б уникнути відмічених недоліків ФКП. Найбільш перспективним представляється можливість використання активних і гібридних фільтрів.

Ідея активного фільтру не нова, однак відсутність ефективної технології виробництва по прийнятним цінам уповільнило її розвиток на багато років. Сьогодні широка доступність польових транзисторів з ізолюваним затвором і цифрових процесорів сигналу перетворили активний фільтр в практичне вирішення проблеми.

Принцип дії активного фільтру пояснює схема на рис. 7.3

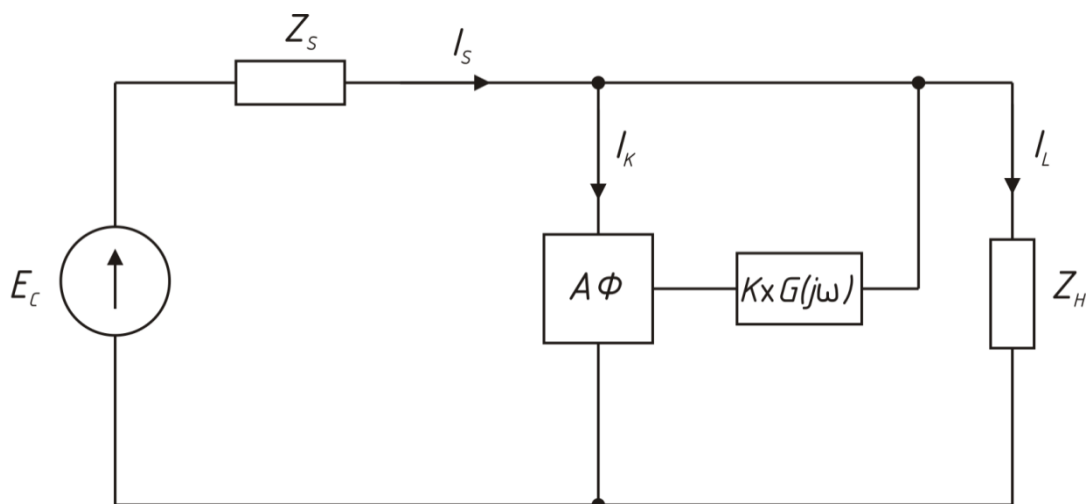


Рисунок 6.3. Структурна схема активного фільтру

Активний фільтр являє собою джерело струму, який складається із реактивної складової першої гармоніки навантаження і струмів вищих

гармонік. Струм навантаження вимірюється датчиком струму, дані якої аналізуються цифровим перетворювачем сигналу для визначення картини спектру гармонік. Ця інформація використовується генератором струму для генерування в мережу саме такого гармонічного струму, який необхідний для компенсації спотворень навантаження:

$$i_S = i_L + i_K \quad (6.6)$$

На практиці величина гармонічного струму зменшується приблизно на 90 %.

В зв'язку з тим, що керування активного фільтру відбувається на основі даних, що надходять від датчика, він динамічно адаптується до змін в гармоніках навантаження. В цілому система компенсації формується як розімкнута – без зворотного зв'язку, або як замкнена. Так як процеси аналізу і генерування контролюються програмним забезпеченням, то пристрій легко запрограмувати на компенсацію деяких гармонік з метою забезпечення максимального ККД в діапазонах характеристики приладу.

Методи ідентифікації реактивної складової і струмів вищих гармонік можна розділити на три групи:

- векторні методи, засновані на теорії миттєвої потужності;
- метод виділення основної гармоніки струму навантаження;
- універсальний метод, що заснований на визначення активної потужності, що споживається навантаженням, і відповідно активної складової цього струму. Шляхом віднімання цієї складової із струму навантаження знаходиться «небажаний» струм – реактивні складові першої гармоніки і вищих, що підлягають компенсації з допомогою активного фільтру.

Універсальний метод є найбільш простим в реалізації, однак в теперішній час в більшості випадків, зокрема при реалізації паралельних активних фільтрів малої і середньої потужності використовуються керуючі пристрої, засновані на алгоритмі теорії миттєвої потужності.

Розглянемо детально структуру системи компенсації вищих гармонік з використанням паралельного активного фільтру (рис. 6.4).

В якості активного фільтру використовується інвертор напруги, в ланцюг якого ввімкнені силові транзистори (також можуть застосовуватися тиристори). В схемі активного фільтру передбачено незалежне керування кожним транзистором. В схемі, що розглядається, має місце двосторонній обмін активною потужністю між інвертором і мережею таким чином, що середнє значення в усталеному режимі рівне нулю. Це виключає необхідність використання додаткового джерела живлення. Конденсатор C_d являється накопичувачем енергії і служить для згладжування пульсації миттєвої активної потужності споживача.

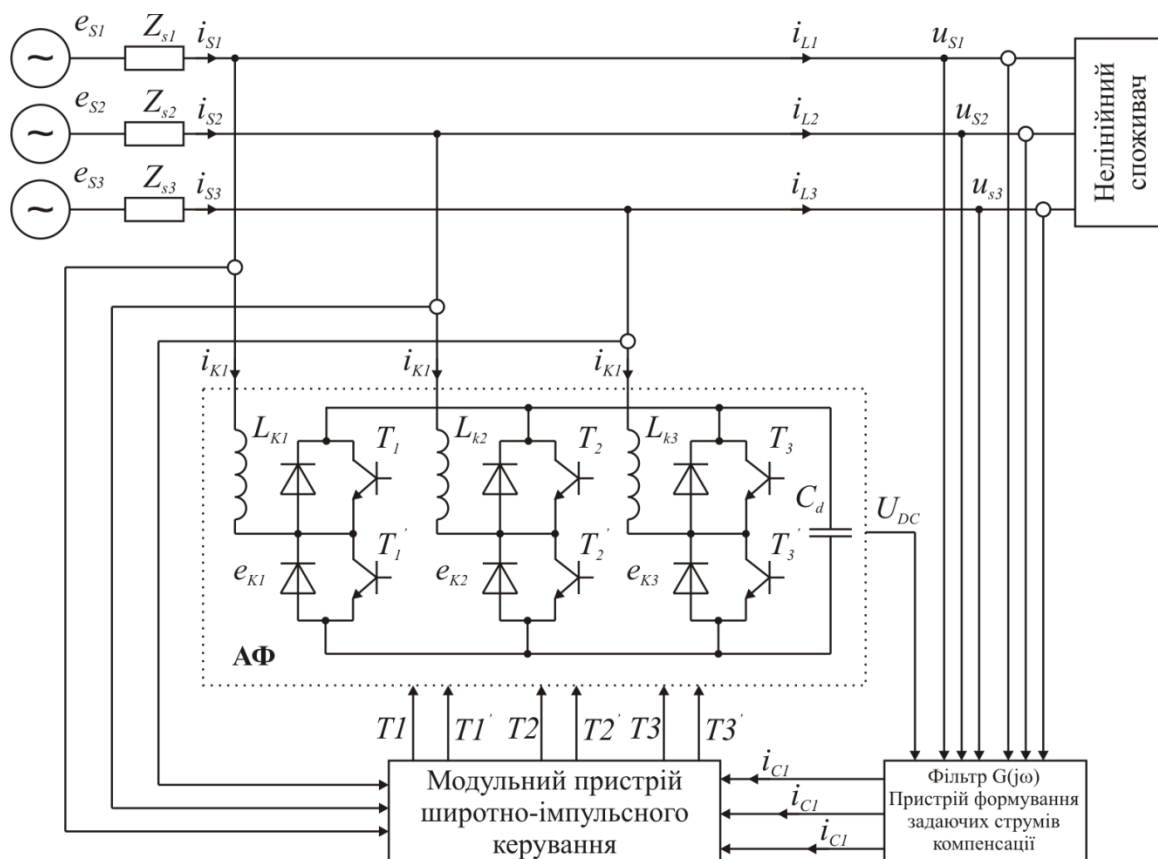


Рисунок 6.4. Трьохфазна системи компенсації з паралельним активним фільтром з використанням інвертора напруги

В пристрої для формування задаючих струмів i_c реалізовується алгоритм мінімізації струмів вищих гармонік, заснований на теорії миттєвої

потужності. Модулятор (пристрій широтно-імпульсного керування інверторами активного фільтру) перетворює неперервні сигнали i_c в керуючі імпульси $T1, T1', \dots, T6'$ і разом із згладжувальними реакторами $L_{\kappa 1(1,3)}$ забезпечують формування необхідних компенсуючих струмів $i_{\kappa 1(1,3)}$. В колі модулятора передбачений зворотний зв'язок за струмом. Таким чином забезпечується «слідкування» струмів компенсації i_k за змінами задаючих струмів i_c .

Якщо гармонічні струми, що генеруються навантаження, перевищують максимальне номінальне значення активного фільтру, пристрій автоматично обмежує струм компенсації по своєму максимальному номінальному значенню: фільтр не може перевантажуватися і буде продовжувати корекцію до максимального номінального значення струму, я будь-який переважаючий гармонічний струм повернеться в систему живлення. Активний фільтр може постійно робити в такому стані без спотворень.

Описані активні фільтри можуть використовуватися в мережах з великою потужністю нелінійних навантажень. В цьому випадку можуть застосовуватися також інвертори струму, однак вони використовуються рідко, в основному, із-за значних габаритів реакторів-накопичувачів енергії.

В практиці компенсації реактивної потужності і мінімізації рівнів вищих гармонік знайшли застосування повздовжні активні фільтри, або фільтри послідовного включення, при якому в ланцюг живлення джерела вводиться незалежне джерело змінної напруги. Амплітуда і фаза цього джерела можуть змінюватися по заданому закону. Очевидно, що чим ближче активний фільтр знаходиться до об'єкту компенсації і (або) фільтрації, тим вище його енергетична ефективність. В даному випадку в схемах активного фільтру використовуються такі ж інвертори напруги і струму, як і в системах з паралельним включенням. Різниця закладається лише в способі підключення їх до живлячої мережі. Керування активним фільтром в цьому випадку здійснюється з використанням метода широтно-імпульсної

модуляції таким чином, щоб вихідна напруга U_K «відслідковувала» задаючі напруги U_c .

На рисунку 6.5 наведена принципова схема поздовжньої системи компенсації і фільтрації з використанням активного фільтру.

Невеликий резонансний фільтр C_F , L_F (R_F моделює втрати) застосовується для ліквідації високочастотних викривлень напруги U_K , що виникають в процесі модуляції.

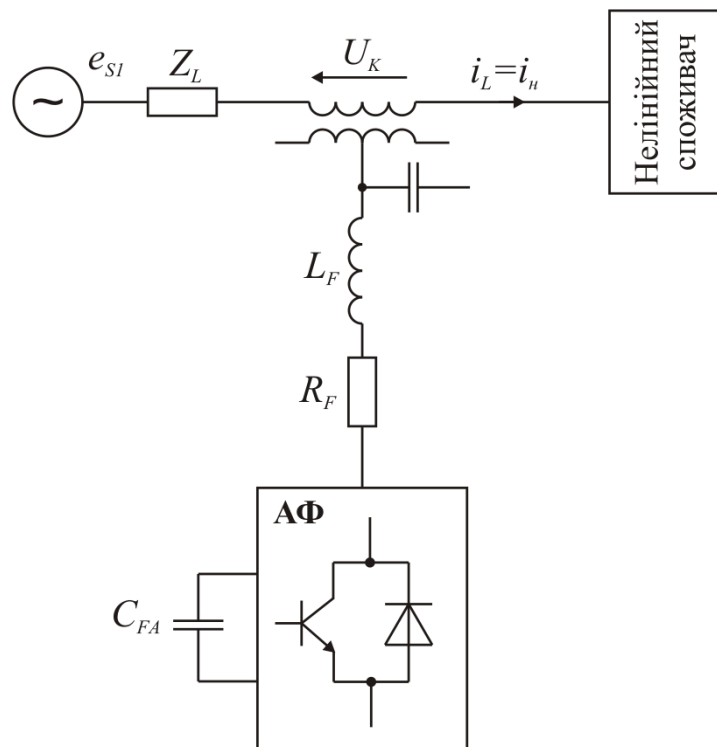


Рисунок 6.5. Схема поздовжньої системи компенсації і фільтрації з використанням АФ

Подібні системи дозволяють не лише забезпечити мінімізацію вищих гармонік і інтергармонік, але і регулювання напруги у споживача, оскільки напруга U_K може змінюватися за амплітудою і за фазою. Відповідно, система поздовжнього включення активного фільтру може мати характер індуктивного або ємнісного опору на основній частоті. В останньому випадку

вона може розглядатися як конденсатор в установці поздовжньо-ємнісної компенсації.

Активні фільтри можуть бути встановлені в різних точках розподільчої мережі (рис. 6.6):

- в точці загального приєднання (на шинах ТП) – позиція *A*.
- часткова компенсація гармонічних струмів (позиція *B*)
- поблизу нелінійних навантажень з метою забезпечити місцеву компенсацію гармонічних складових (позиція *C*).

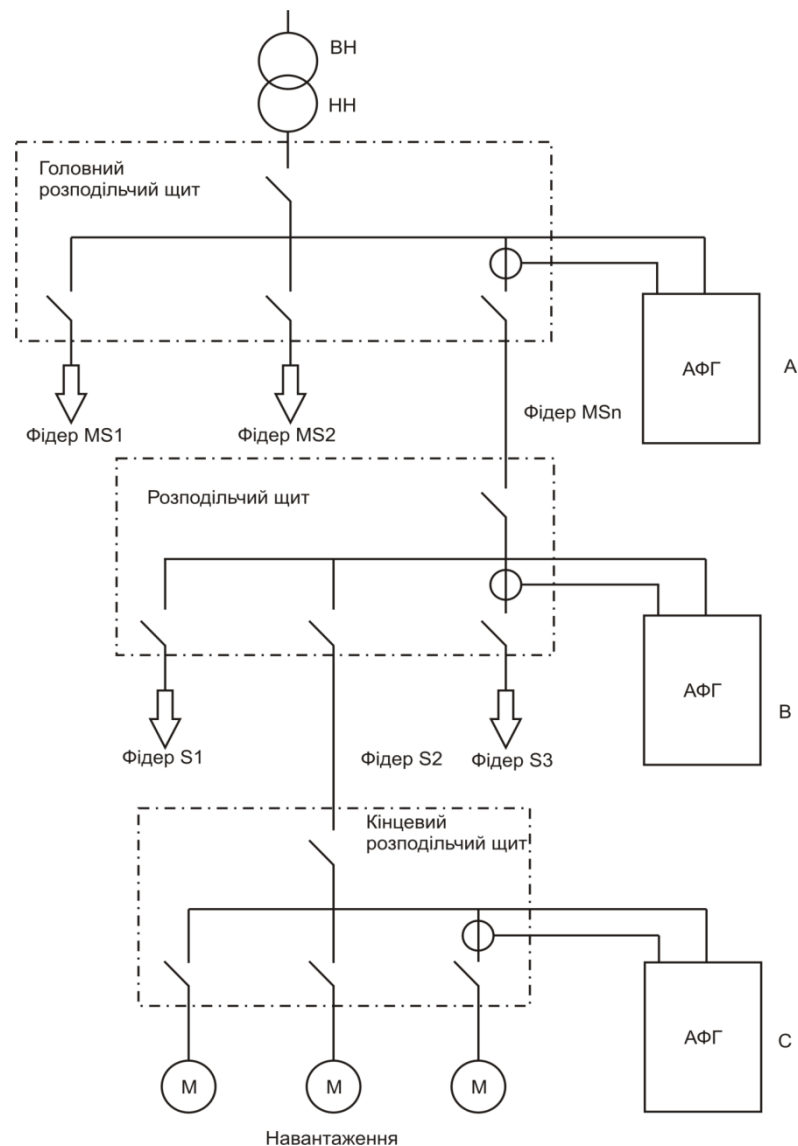


Рисунок 6.6. Можливі варіанти встановлення АФ в СЕПП

Слід відмітити, що фільтр реагує лише на ті гармоніки, що генеруються нелінійним навантаженням, яке приєднане після фільтру. Наприклад, фільтр

в позиції *B* буде коректувати лише гармонічний струм навантажень на фідері *S3* і не буде реагувати на навантаження будь-якого іншого фідера. Це дозволяє досягнути більшої гнучкості в проектуванні системи корекції.

В ідеальному випадку компенсація гармонічних складових повинна відбуватися в точці їх появи.

Для оптимізації компенсації гармонік декілька фільтрів можуть бути з'єднані в різних конфігураціях. Ці конфігурації можуть використовуватися в будь-якій точці розподільчої мережі, пропонуючи повну гнучкість і широкий вибір компенсуючих стратегій.

Можливі дві конфігурації приєднання активних фільтрів:

- паралельна конфігурація (рис. 6.7а) ;
- каскадна конфігурація (рис. 6.7б).

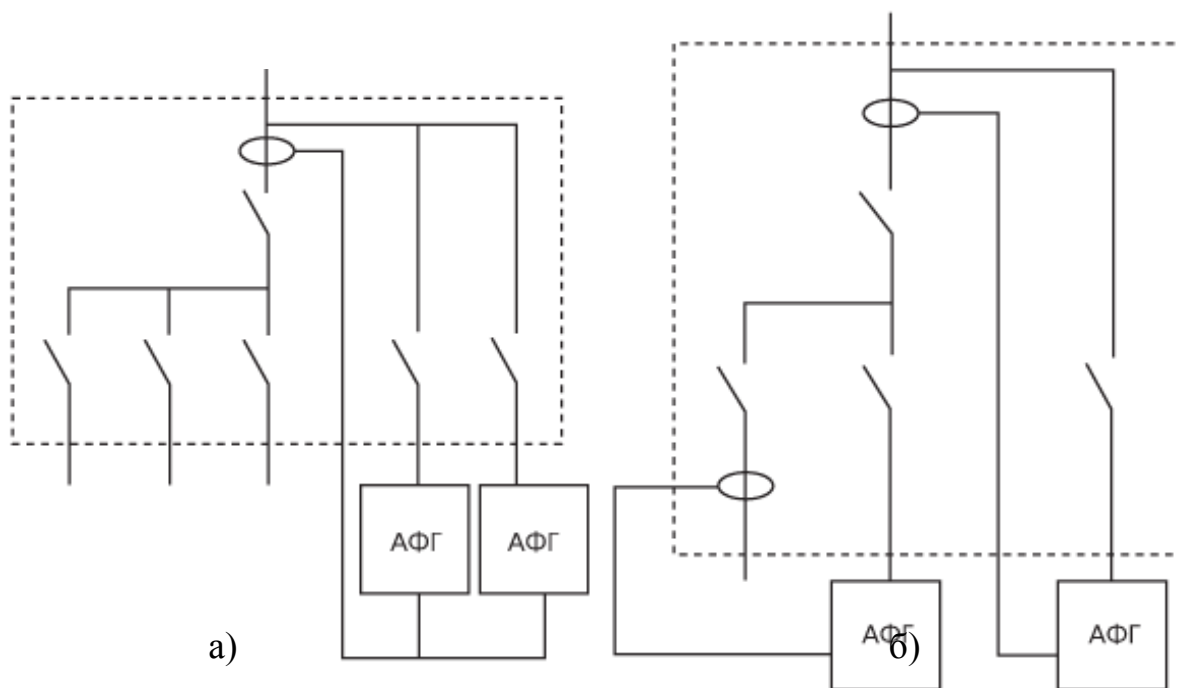


Рисунок 6.7. Паралельна та каскадна конфігурація активних фільтрів

До переваг паралельної конфігурації відносяться:

- збільшена можливість корекції в певній точці системи змінного струму шляхом приєднання до чотирьох фільтрів з однаковим номіналом;

- збільшена можливість корекції для цілей подальшого збільшення навантаження;

- підвищена надійність із-за використання запасу значення номіналу фільтру.

Переваги каскадної конфігурації:

- збільшення загальної компенсаційної властивості шляхом використання фільтрів з однаковими або різними номіналами;

- компенсація певного навантаження або місцева компенсація гармонік, а також загальна компенсація гармонічних складових групи нелінійних навантажень.

ВИСНОВКИ

Дана робота була присвячена дослідженню проблеми якості електричної енергії та її впливу на режими роботи електроприймачів в СЕПП.

В другому розділі магістерської роботи розглядається проблема контролю якості електричної енергії в системах електропостачання промислових підприємств; висвітлюються сучасні методи вимірювання показників якості електричної енергії, теоретичні засади роботи приладів для їх вимірювання, а також розглянуті сучасні прилади-аналізатори для контролю якості електричної енергії, що випускаються промисловістю країн СНД та країн Західної Європи, проведено їх порівняльний аналіз. Також в цьому розділі детально розглядаються основні показники якості електричної енергії та їх вимірювання.

В третьому розділі детально досліджено причини виникнення вищих гармонік напруги і струму, їх основні джерела. Детально розглянуто причини виникнення та рівні вищих гармонік. Також було розглянуто питання застосування фільтрів вищих порядків для зменшення рівнів вищих гармонік та інтергармонік напруги.

Четвертий розділ даної роботи має детальний огляд впливу відхилення та колювання напруги на роботу промислових електроспоживачів, а також методику розрахунку відхилення та колювання напруги.

Наявність споживачів, які впливають на якість електроенергії, вносить ускладнення в рішення проектних задач електрозабезпечення промислових підприємств. При виборі схеми живлення необхідна розробка варіантів, які виключають взаємний негативний вплив споживачів один на одного або тих, які впливають найменше. Якщо схемні рішення не дають бажаного результату, то повинні передбачатись додаткові заходи і заходів підвищення якості електроенергії. Оцінку таких заходів потрібно здійснювати комплексно з урахуванням проектних рішень в області електропостачання,

електрообладнання і технології, а доцільність проведення даних заходів повинна підтверджуватись техніко-економічними розрахунками.

При виході показників якості за встановленні межі збільшуються втрати електроенергії в системах електропостачання, знижується рівень надійності роботи електрообладнання, виникають порушення технологічних процесів і знижується випуск продукції.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Плешков П.Г., Полтавець М.М. Якість електричної та електромагнітної сумісності електроспоживачів сільського господарства. Конструкція виробництва та експлуатація сільськогосподарських машин. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Випуск 29. – Кіровоград, 2000. – С. 90-97.
2. Плешков П.Г., Беседа С.В. Исследование электромагнитной совместимости электрооборудования и автоматизированных устройств с системами электроснабжения. Проблемы создания новых машин и технологий. Научные труды Кременчугского государственного политехнического института. Вып. 2/1999-Кременчуг, 1999. – С.156-160.
3. Методика расчетов платы за перетоки реактивной электроэнергии между энергоснабжающей организацией и ее потребителями. Согласовано Национальной комиссией по вопросам регулирования электроэнергетики Украины 3.10.1997 г. Утверждено Указом Министерства Энергетики Украины 14.11.1997 г. за №37. Зарегистрировано в Министерстве Юстиции Украины 24.12.1997 г. за №619/2423.
4. A New Definition of Instantaneous Active – Reactive Current and Power Based on Instantaneous Space Vectors on Polar Coordinates in Three-Phase Circuits, Aktira Nabal Toshiko Tanaka, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 11, No 3, 1996, p. 1238-1244.
5. «О необходимости разделения понятий качества потребления и преобразования энергии» Родькин Д.И. — Сборник «Труды КДПУ» 2003, 2
6. Comments on Active Power Flow and Energy Accounts In Electrical Systems With Nonsinusoidal Waveforms and Asymmetry Gzarneski L. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 11, No 3, 1996, p. 1244-1250.
7. Тонкаль В.Е., Новосельцев А.В., Денисюк С.П., и др. Баланс энергий в силовых цепях., Киев, «Наукова думка», 1992, с. 312.
8. Родькин Д.И., Кожушок Г.Н. Особенности использования метода

енергодіагностики. Вестник Харьковского политехнического университета. Проблемы автоматизированного электропривода, Харьков, ХПУ, т.2, 2002, стр. 526-531.

9. Плешков П.Г., Подурець А., Свірідов А.П. Комплексна оптимізація енергетичних і технологічних параметрів електротехнологічного устаткування термічної обробки металів. Проблеми економії енергії. Збірник матеріалів III Міжнародної науково-практичної конференції. Львів 10-14 жовтня, 2001. – Львів, Видавництво національного університету «Львівська політехніка», 2001. – С. 150-151.

10. Плешков П.Г., Серебренніков С.В., Цюцюра В.І. Контроль якості електричної енергії за допомогою комп'ютерних аналізаторів спектру. 3-я українська НТК «Науковий контроль та технічна діагностика», НКТД-2000. – Дніпропетровськ, 22-25 травня. – 2000 р. – С.217 – 220.

11. Вопросы качества электроэнергии в электроустановках / И.В.Жежеленко, Ю.Л.Саенко. – Мариуполь: ПГТУ, 1996. – 173с.

12. Постанова НКРЕ № 36 від 15.01.2003 р. «Щодо внесення змін та доповнень до Процедури встановлення або перегляду тарифів для ліцензіатів з передачі електричної енергії місцевими (локальними) електромережами та з постачання електроенергії за регульованим тарифом, затвердженої постановою НКРЕ від 01.08.2001 р. № 801»

13. Методичні вказівки до виконання магістерських робіт на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня – магістр електротехніки за фахом 8.090603 «Електротехнічні системи електроспоживання». /Укл.: П.Г.Плешков, Н.Ю.Гарасьова – Кіровоград: КДТУ, 2002-44 с.

14. П.Г.Плешков, Ю.І.Казанцев, А.Ю.Орлович. Основи енергозбереження та енергозберігаючі режими в системах електропостачання промислових підприємств. – Кіровоград: РВЛ КНТУ 2007.

ДОДАТОК А. РОЗРАХУНКИ ЕКОНОМІЧНИХ ЗБИТКІВ, ЩО ЗУМОВЛЕНІ ЗНИЖЕННЯМ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Якість електроенергії впливає як на економічність режиму мережі електропостачання підприємства, так і на якісний та кількісний рівень виробництва, тобто відхилення показників якості електроенергії від нормативних, а інколи і номінальних значень, може привести до збитку. Розрахунки збитку для підприємств різних галузей дають змогу зробити висновок, що при відносно невеликих значеннях показників якості найбільшим являється збиток, обумовлений відхиленням (5-7%), та коливанням напруги (більше 5–6 %). В ряді випадків на підприємстві можуть бути визначені механізми чи ланки, що в найбільшій мірі діють на об'єм та якість продукції. Відхилення показників якості електроенергії вище нормативних значень у вузлах мережі, до яких підключені ці електроспоживачі, обумовлюють практично повну величину збитку на підприємстві.

Значний збиток наноситься за рахунок вагомих відхилень напруги, які перевищують встановлені норми. На багатьох промислових підприємствах відхилення напруги складають $\pm 10\%$ від номінального, а в окремих випадках напруга знижується до $\pm 15\%$. Розрахунки збитку для підприємств різних галузей дають змогу зробити висновок, що при відносно невеликих значеннях показників якості найбільшим являється збиток, обумовлений відхиленням напруги (5-7%), та коливанням напруги (більше 5-6%). В ряді випадків на підприємстві можуть бути визначені механізми чи ланки, що в найбільшій мірі діють на об'єм та якість продукції. Відхилення показників якості електроенергії вище нормативних значень у вузлах мережі, до яких підключені ці електроспоживачі, обумовлюють практично повну величину збитку на підприємстві.

А.1 Розрахунок економічного збитку від відхилення напруги на прикладі текстильної промисловості

Як відомо, відхилення напруги можуть викликати зміни продуктивності механізмів по причині зміни частоти обертання приводних механізмів на прикладі асинхронних двигунів.

Найбільш повно характеризують економічність роботи асинхронного двигуна і пов'язаного з ним виробничого механізму при відхиленнях напруги характеристики збитку $Y=f(\delta U)$. В залежності від конкретної задачі ці характеристики можуть бути побудовані як для окремих механізмів, так і для їх груп.

Користуючись характеристиками $Y=f(\delta U)$, можна визначити оптимальні режими напруги в різних точках системи внутрішнього електропостачання заводу (затискачі двигуна механізму, шини цехової трансформаторної підстанції і т.п.).

В наш час розроблена методика, яка, в відмінності від існуючої, дозволяє оцінити величину економічного збитку при відхиленнях напруги для окремих механізмів бавовняно паперової промисловості і для її груп, використовуючи результати експерименту по визначенню впливу змін напруги на роботу станків і машин.

В загальному вигляді вираз для визначення величини сумарного збитку $Y_{\text{експ}}$ в функції відхилень напруги для окремих механізмів бавовняно паперової промисловості має вид:

$$Y_{\text{експ}} = Y_1 + Y_2 + Y_3 = \left[\left(\overline{P_H} - \overline{P_{\delta U}} \right) \cdot \alpha + \left(\overline{P_{\delta U}} - \overline{P_H} \right) \cdot c_0 + \left(\overline{Q_{\delta U}} - \overline{Q_H} \right) \cdot k_{\text{вик}} \cdot c_0 \right] \cdot t, \quad (\text{A.1})$$

де $Y_1 = \left(\overline{P_H} - \overline{P_{\delta U}} \right) \cdot \alpha \cdot t$ - збиток, викликаний зміною продуктивності механізмів;

$\left(\overline{P_H} - \overline{P_{\delta U}} \right)$ - середня годинна продуктивність механізму при роботі двигуна відповідно при номінальній напруги і відхиленні від неї, вони визначаються за результатами експерименту;

α – вартість одиниці продукції, що випускається даним виробництвом,

$\alpha=8,6$ (грн/кг);

$$Y_2 = (\overline{P_{\delta U}} - \overline{P_H}) \cdot c_0 \cdot t,$$

$Y_3 = (\overline{Q_{\delta U}} - \overline{Q_H}) \cdot k_{\text{вук}} \cdot c_0 \cdot t$ - складові збитку від зміни споживання активної та реактивної потужності асинхронним двигуном;

$\overline{P_H}$, $\overline{P_{\delta U}}$ - середня величина спожитої активної потужності двигуном механізму відповідно при номінальній напрузі та відхиленні напруги від номінальної;

$\overline{Q_H}$, $\overline{Q_{\delta U}}$ - середня величина спожитої реактивної потужності спожитої двигуном механізму із мережі відповідно при номінальній напрузі та відхиленні напруги від номінальної;

c_0 – вартість 1 кВт·год втраченої електроенергії;

$k_{\text{вук}}$ – коефіцієнт зміни втрат.

Величини $\overline{P_H}$, $\overline{P_{\delta U}}$, $\overline{Q_H}$, $\overline{Q_{\delta U}}$ визначаються за допомогою лічильників активної та реактивної електроенергій.

Проведемо розрахунок економічного збитку для одного цеху прядильних машин однієї потужності, що живляться від одного розподільчого пристрою, за $t = 1$ год., при відхиленні напруги від номінального значення рівного $\delta U = -0,15$:

$$Y_{\text{експ}} = Y_1 + Y_2 + Y_3 = [(350-271) \cdot 4,6 + (3096-2000) \cdot 0,3276] + \\ + (1676-1200) \cdot 4,6 \cdot 0,3276 \cdot 1 = 7061,82, \frac{\text{грн}}{\text{год}}.$$

(A.2)

Аналогічно проводимо розрахунки для різних значень відхилень напруги δU , звідки можна зробити висновок про економічний ефект регулювання напруги. Результати розрахунків зводимо до таблиці А.1, це дає змогу наглядно оцінити величину і структуру сумарного збитку $Y_{\text{експ}}$, в залежності від величини напруги на затискачах приводних двигунів.

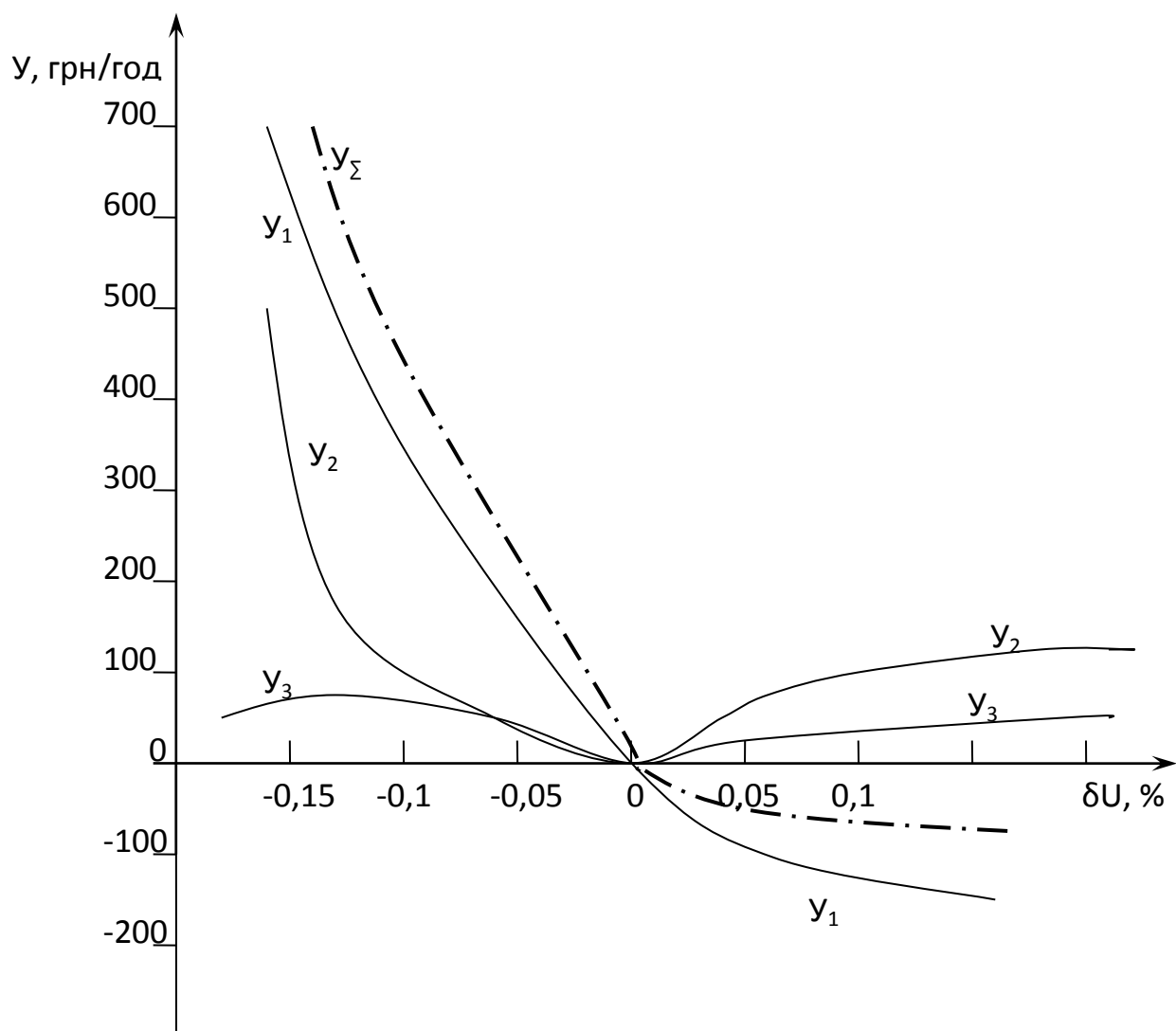


Рисунок А.1. Зростання та падіння економічного збитку при різних відхиленнях напруги.

Таблиця А.1. Економічний збиток при відхиленні напруги та її регулюванні

$\delta U, \%$	$Y_1, \text{грн/год}$	$Y_2, \text{грн/год}$	$Y_3, \text{грн/год}$	$Y_{\Sigma}, \text{грн/год}$
-15	6179,4	3259,05	273,39	7661,82
-10	3269,8	977,61	320,39	4897,8
-5	1189,2	552,08	316,68	2357,96
0	0	0	0	0
5	-1603,2	908,28	155,53	170,061
10	-1563,4	1205,14	532,43	-295,83

При аналізі проробленої вище роботи можна зробити висновок, що зниження напруги в мережах 0,4 кВ стають причиною значного економічного збитку для текстильних підприємств.

Складова сумарного збитку, що характеризує зміну виробності станків і машин при відхиленнях напруги, являється самою значимою по величині. Найбільш достовірно для текстильних підприємств її можна визначити експериментальним шляхом.

Також доцільне використання регулюючих пристроїв, так як на затискачах двигунів прядильних машин допустимі відхилення напруги в межах від -5% до +10% від номінального значення, однак, для мереж прядильних цехів бажаними являються відхилення напруги в межах від -5% до +5% , а для ткацьких цехів конкретно – від 0 до +5%.

A.2 Розрахунок додаткових витрат на освітлення, обумовлених коливанням напруги

При явній сумісній системі живлення силових і освітлювальних навантажень мають місце також і коливання напруги, викликані ударними навантаженнями, пуском потужних двигунів, роботою кранів та зварювальних апаратів, вплив тривалих коливань напруги може бути оцінено з економічної точки зору за терміном дії джерел світла. Коливання напруги впливає на термін придатності ламп і освітленість в цілому.

Дослідження показали, що оптимальна втрата напруги визначається розрахунковими річними затратами, які повинні відноситись не до одиниці потужності, а до одиниці світлового потоку – люмену, точніше люмену-годині. Це пояснюється тим, що частина витрат пропорційна кількості годин використання установки, але частина від нього не залежить. Щорічні витрати включають сумарний відсоток річних відрахувань по мережі, вартість електроенергії вартість заміни ламп розжарення, що може бути визначено шляхом підрахунку збільшення річних витрат на заміну ламп розжарення при підвищеному рівні напруги.

Додаткові витрати в гривнях:

$$D = \frac{\tau}{T} \cdot (n - 1) \cdot \alpha \cdot \beta, \quad (\text{A.3})$$

де τ – річна кількість годин роботи частини ламп при підвищеній напрузі, год;

T – повна річна кількість годин роботи ламп, год;

α – відносна кількість ламп (в частинах одиниці), до яких на протязі τ годин підводиться підвищена напруга;

β – щорічні витрати на заміну ламп (вартість ламп та оплата за роботу) при номінальній напрузі на протязі всього часу включення, грн./рік;

n – кратність зменшення терміну дії ламп при підвищеній напрузі

при $U = 105\%U_H$, $n = 2$; при $U = 110\%U_H$, $n = 4$.

Додаткові витрати в відсотках від щорічних витрат на заміну ламп при номінальній напрузі на протязі всього часу включення:

$$\Delta D = 100 \frac{\tau}{T} \cdot (1 - n) \cdot \alpha. \quad (\text{A.4})$$

Проведемо розрахунок цеха з кількістю світлових точок 2082 шт. і середньою потужністю 0,22 кВт:

$$D = \frac{1500}{4750} \cdot (2 - 1) \cdot 0.25 \cdot 10000 = 3925 \text{ грн./рік}. \quad (\text{A.5})$$

$$\Delta D = 100 \cdot \frac{1500}{4750} \cdot (2 - 1) \cdot 0.25 = 7.9 \%. \quad (\text{A.6})$$

Аналогічно проводимо розрахунок додаткових затрат для $\tau=3000$ год/рік, і $\tau=4000$ год/рік, відповідно при напругах $U = 105\%U_H$, та $U = 110\%U_H$ результати розрахунків зводимо до таблиці А.2 та зображуємо на рис.А.2.

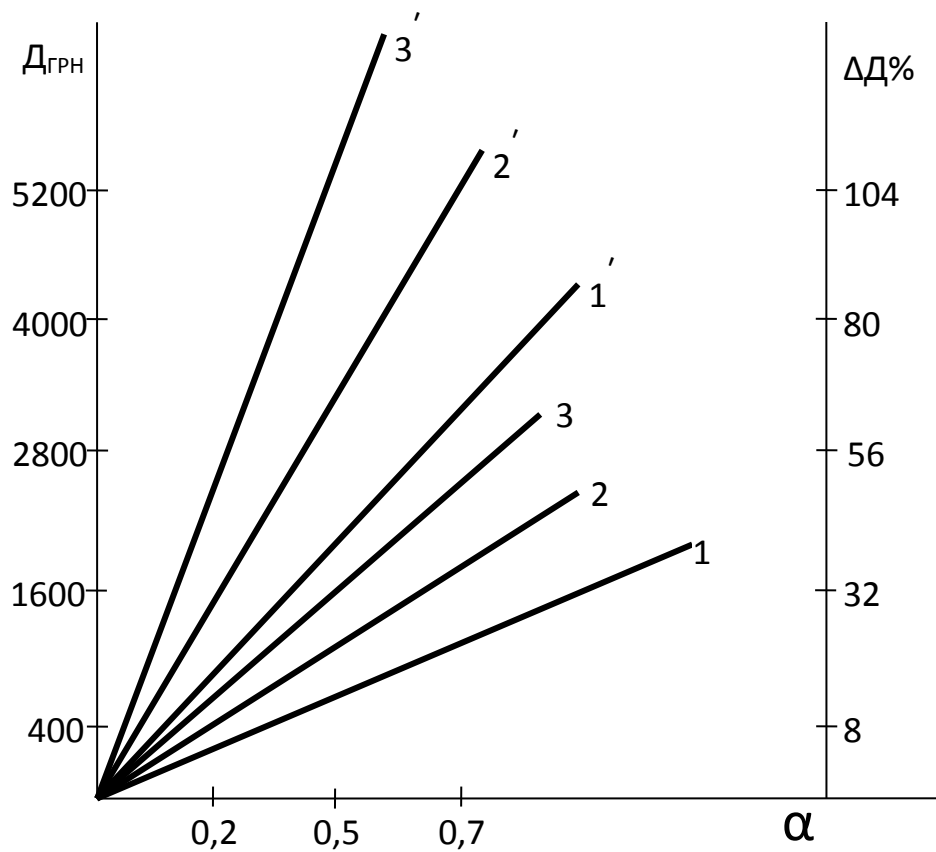


Рисунок А.2. Залежність додаткових затрат від годин роботи частини ламп при підвищеній напрузі $U = 105\%U_H$ та $U = 110\%U_H$ відповідно.

Таблиця А.2. Додаткові затрати на освітлення

α	τ , год/рік	n , при $1,05 \cdot U_H$	D , грн при $1,05 \cdot U_H$	ΔD , % при $1,05 \cdot U_H$	n , при $1,1 \cdot U_H$	D , грн. при $1,1 \cdot U_H$	ΔD , % при $1,1 \cdot U_H$
1	2	3	4	5	6	7	8
0,25	1500	2	3925	74,9	4	7690	175,8
0,5	1500	2	7490	145,8	4	13580	351,57
0,75	1500	2	15184	253,7	4	22368	457,4
0,25	3000	2	7520	165,8	4	12500	361,7
0,5	3000	2	15400	361,6	4	37000	653,15

Продовження таблиці А.2

1	2	3	4	5	6	7	8
0,75	3000	2	25250	483,37	4	50000	954,7
0,25	4000	2	18053	231,05	4	22106	452,1
0,5	4000	2	26105	492,1	4	43210	824,21
0,75	4000	2	33158	633,16	4	69316	1626,3

А.3 Визначення збитку від несиметрії напруги для трифазного асинхронного двигуна

Трифазний асинхронний двигун з номінальним навантаженням підключений на несиметричну напругу мережі. Коефіцієнт несиметрії $\alpha_H = 5\%$. Вихідні дані двигуна наступні:

номінальна потужність $P_H = 17$ кВт;

коефіцієнт корисної дії $\eta = 0,89$;

відношення пускового струму до номінального $I_H/I_H = 7$;

коефіцієнт втрат $k = \Delta P_0/\Delta P_{M1} = 0,5$.

вартість двигуна з урахуванням монтажу $K=1050$ грн. .

вартість 1 кВт*год електроенергії $C_{ye} = 4,2$ грн.. Річне число годин роботи двигуна $T_r=4000$ годин.

Сумарні номінальні втрати в двигуні складуть:

$$\Delta P_H = \Delta P_0 + \Delta P_{M1} = \frac{P_H(1-\eta)}{\eta} = \frac{17(1-0,89)}{0,89} = 2,1 \text{ кВт.}$$

(А.7)

Номінальні втрати активної потужності в обмотках двигуна рівні:

$$\Delta P_{M1} = \frac{\Delta P_H}{k+1} = \frac{2,1}{0,5+1} = 1,4 \text{ кВт.} \quad (\text{А.8})$$

Втрати активної потужності в обмотках двигуна від струмів зворотної послідовності:

$$\Delta P_{M2} = \Delta P_{M1} \alpha_H^2 \left(\frac{I_H}{I_H} \right)^2 = 1,4 \cdot (0,05)^2 \cdot 7^2 = 0,17 \text{ кВт.} \quad (\text{А.9})$$

Вартість додаткових втрат активної потужності при несиметричній напрузі досягне:

$$Y_1 = \Delta P_{M2} C_{ye} T_p = 0,17 \cdot 4,2 \cdot 4000 = 2856 \text{ грн./рік} \quad (\text{A.10})$$

Термін служби асинхронного двигуна при симетричній напрузі $T_1 = 20$ років. По методиці [Л. 3] знаходимо відносне зниження терміну служби при несиметричній напрузі з $\alpha_n = 5\%$:

$$t = \frac{T_2}{T_1} = 0,4 \text{ або } T_2 = 8 \text{ років.} \quad (\text{A.11})$$

Річний збиток для двигуна від скорочення терміну служби:

$$Y_{II} = 1050 \cdot 4,2 \cdot 0,422 = 1861 \text{ грн./рік} \quad (\text{A.12})$$

Сумарний річний збиток складе:

$$Y_{\Sigma} = Y_1 + Y_{II} = 2856 + 1861 = 4717 \text{ грн./рік.} \quad (\text{A.13})$$

Приведені річні витрати на двигун при симетричній напрузі будуть рівні:

$$Z = K_{pII} + \Delta P_n C_{ye} T_{\Gamma} + = 1050 \cdot 4,2 + 2,1 \cdot 4,2 \cdot 4000 = 39690 \text{ грн./рік.} \quad (\text{A.14})$$

Таким чином, щорічний збиток від несиметрії напруги для асинхронних двигунів складає понад 13% від річних витрат на двигун.

ДОДАТОК Б. ОХОРОНА ПРАЦІ

Б.1 Аналіз небезпечних та шкідливих факторів при обслуговуванні електроустановок

Б.1.1 Види уражень електричним струмом

Захисні заходи, що вживаються при роботі з електроустановками, повинні забезпечити безпеку людини від ураження електричним струмом. Щоб визначити вимоги до заходів захисту, треба знати дію електричного струму на організм людини, допустимі значення струму, що проходить через людину, і прикладеної напруги, а також їх залежність від параметрів електроустановки: роду струму, напруги, частоти.

Вивчення механізму дії електричного струму, що проводилося ученими різних країн, показало, що він викликає в організмі людини загальну реакцію зі сторони центральної та периферичної нервової системи. Електричний струм дратує організм, викликаючи реакцію величезного числа нервових закінчень. Таку дію порушує функціонування дихання і кровообігу, викликає оборотні і необоротні зміни.

Окрім дії на нервову систему спостерігається безпосередня дія електричного струму на м'язи, особливо на серцевий м'яз. При цьому може виникнути фібриляція, що є однією з причин необоротної зміни функціонування серцевого м'яза.

Фібриляцією серця називається такий стан, коли воно перестає скорочуватися як єдине ціле, а відбуваються некоординовані скорочення окремих волокон серцевого м'яза. Число таких скорочень може досягати декількох сотень в хвилину. Серце перестає функціонувати як насос, кров не переміщається в організмі, і, якщо не здійснити дефібриляцію, наступить смерть.

Дія електричного струму на живу тканину організму на відміну від дії інших чинників (пара, хімічні речовини, випромінювання і т. п.) чинить своєрідний і різносторонній вплив. Діючи через організм людини, електричний струм проводить:

-термічну дію, яка виявляється в опіках окремих ділянок тіла, нервів, кровоносних судин, серця, мозку та інших органів, що викликає в них серйозні функціональні розлади;

-електролітичну дію, яка виявляється в розкладанні органічної рідини, та викликає значні порушення її фізико-хімічного складу;

-біологічну дію, яка проявляється роздратуванням і збудженням тканин організму, а також порушує внутрішні біоелектричні процеси, які в нормальному стані протікають в організмі і тісно пов'язані з його життєвими функціями.

Різноманіття дії електричного струму приводить до різних електротравм, що викликаються як дією електричного струму, так і електричної дуги.

Електротравми можна поділити на два види: місцеві електротравми, з місцевим пошкодженням тіла, і електричні удари, коли дія становить на весь організм та порушуються нормальна діяльність життєво важливих органів і систем. Як показує аналіз нещасних випадків від електричного струму, 20% доводиться на місцеві електротравми, 25% — на електричні удари і 55%—на змішані травми.

Місцеві електротравми є яскраво вираженим порушенням цілості тканин тіла, зокрема кісткових тканин, викликані впливом електричного струму або електричної дуги. Розглянемо характерні види електротравм.

Електричний опік. Залежно від умов появи розрізняють два основні види опіку: струмовий (контактний), який виникає при проходженні струму безпосередньо через тіло людини при контакті людини з струмоведучою частиною, і дуговий, обумовлений дією на тіло людини електричної дуги.

У електричному колі тіло людини володіє певним опором, при протіканні струму в тканинах, як і в будь-якому опорі, виділяється деяка кількість тепла, пропорційна квадрату значення струму, опору і часу дії. При струмі більше 1 А тепло, що виділяється, досить для нагріву тканин до температури 60—70° С, при цій температурі згущується білок і виникає опік.

Такі опіки проникають глибоко в тканини тіла, дуже болісні, вимагають тривалого лікування і можуть з'явитися причиною часткової або повної інвалідності.

При роботі з електроустановками напругою вище 1 кВ важкі опіки можна отримати і без безпосереднього контакту з струмоведучими частинами, а при випадковому наближенні до них на небезпечну відстань. В цьому випадку спочатку виникає іскровий розряд, який потім перетворюється на електричну дугу. Температура дуги досягає декількох тисяч градусів.

Висока температура дуги спільно з тепловою дією електричного струму, що протікає через тіло людини, призводить до сильного опіку. При цьому різко скорочуються м'язи, дуга подовжується і розривається. Із-за швидкої реакції організму на таку дію короточасне протікання струму не викликає порушень в роботі органів дихання і серця, але поверхня тіла, уражена опіком, буває настільки великою, що може наступити смерть.

В установках напругою до 1 кВ опіки електричною дугою можливі в тому випадку, якщо людина потрапляє в зону горіння дуги.

Розрізняють чотири ступені опіку: I — почервоніння шкіри; II — з'явлення пухирів; III — омертвіння шкіри; IV — обуглювання тканин. В основному тяжкість пошкодження тіла при опіках обумовлюється площею поверхні тіла, ураженої опіком, а не ступенем опіку. Струмові опіки спостерігаються приблизно у 38% потерпілих від електричного струму, дугові опіки — у 25% потерпілих. Характерний вид струмового опіку показаний на рис. Б.1

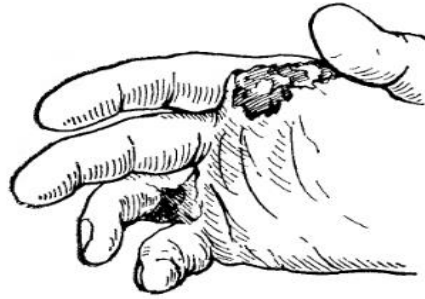


Рисунок Б.1. Стумовий (контактний) опік руки IV ступеня змінним струмом напругою 220 В

Електричні знаки (мітки струму) можуть виникнути тільки при хорошому контакті з струмоведучою частиною електроустановки. Вони мають жовтуватобілий або жовтий колір з різко обкресленими білою або сірою каймою краями. Шкіра в місці появи електричного знаку має вид затверділої мозолі. Наслідки придбання електричного знаку при великій його площі можуть бути серйозними і привести до порушення функцій ураженого органу.

Електричні знаки можуть повторювати на тілі людини конфігурацію тієї частини електроустановки, якої він стосувався. Зазвичай знаки бувають круглої або овальної форми розміром 1—5 мм з поглибленням в центрі (рис. Б.2). Є припущення, що електричні знаки викликаються хімічною і механічною дією струму.

Металізація шкіри пов'язана з проникненням у верхні шари шкіри дрібних частинок металу, який розплавився під дією електричної дуги. Таке ураження шкіри зустрічається при коротких замиканнях, відключеннях роз'єднувачів і рубильників під навантаженням.

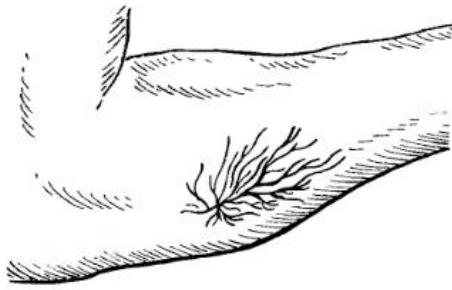


Рисунок Б.2. Електричний знак у вигляді блискавки (на правому передпліччі)

При цьому найдрібніші краплі розплавленого металу під впливом електродинамічних сил розлітаються на всі боки з великою швидкістю.

Кожна з цих крапель хоча і володіє високою температурою, але має малий запас тепла і, як правило, не здатна пропалити одяг. Тому вражаються зазвичай відкриті частини тіла — руки, особа (рис.Б.3). Метал проникає неглибоко, затримуючись у верхніх шарах шкіри, тому вона набуває жорсткої шорсткої поверхні, колір її визначається кольором з'єднань металу, що упродовжилися в шкіру. Зазвичай з часом уражена ділянка шкіри сходить і поверхня шкіри набуває нормального вигляду.



Рисунок Б.3. Металізація шкіри

Метал може проникнути в шкіру людини унаслідок електролізу в місцях зіткнення людини з струмоведучими частинами. Металізація шкіри буває у 10% потерпілих від електричного струму. В більшості випадків водночас з

металізацією стається дуговий опік, який майже завжди викликає важкі ураження.

Механічні пошкодження виникають внаслідок дії різких мимовільних судорожних скорочень м'язів під дією струму, який протікає через людину. Як результат, можуть статися розриви сухожиль, шкіри, кровоносних судин і нервової тканини; ісовірні вивихи суглобів і переломи кісток. Механічні пошкодження виникають достатньо рідко (приблизно у 0,5% осіб, потерпілих від струму). Всі випадки механічних пошкоджень супроводять електричним ударам, оскільки вони викликаються струмом, що проходить через людину. Третя частина з них супроводжується, крім того, контактними опіками тіла.

Електроофтальмія — процес запалення зовнішніх оболонок очей, який виникає в результаті дії потужного потоку ультрафіолетових променів, що енергійно поглинаються клітинами організму і викликають в них хімічні зміни. Таке опромінення виникає за наявності електричної дуги, яка є джерелом інтенсивного випромінювання видимого світла, ультрафіолетових і інфрачервоних променів.

Запалення розвивається через 2—6 год після ультрафіолетового опромінювання. При цьому мають місце почервоніння і запалення слизових оболонок вік і часткова сліпота. Попередження опіку очей забезпечується застосуванням захисних окулярів, не проникних для ультрафіолетових променів і які захищають очі від частинок розплавленого металу.

Електричні удари — вельми частий вид уражень, особливо при роботі з електроустановками напругою до 1 кВ. Він характеризується збудженням живих тканин тіла електричним струмом, який протікає через нього, та супроводжується неконтрольованими судорожними скороченнями м'язів.

В залежності від результату електричні удари розділяють на п'ять груп: судорожне ледве відчутне скорочення м'язів, судорожне скорочення м'язів, яке супроводжується сильними болями без втрати свідомості, судорожне скорочення м'язів з втратою свідомості, але з диханням та стабільною

роботою серця, з втратою свідомості і порушенням діяльності серця або дихання і клінічна смерть (відсутність дихання і пульсу).

Електричний удар може викликати важкі розлади в організмі, які виявляються зразу після дії струму або через деякий час і навіть місяці.

Якщо в період клінічної смерті почати надавати постраждалому відповідну допомогу, тобто шляхом штучного дихання забезпечити постачання його крові киснем, а за допомогою масажу серця наладити в організмі штучний кровообіг, тобто постачання клітин організму киснем, то розвиток смерті може бути припинений і життя збережене.

Таким чином, причиною смерті від дії електричного струму є припинення дихання, припинення діяльності серця і електричний шок.

Припинення дихання обумовлюється дією струму на м'язи грудної клітки. При струмі до 25 мА частотою 50 Гц постраждалий відчуває затруднення дихання і настає задуха (асфіксія). Припинення дихання настає і в результаті поразки легенів, обумовленої короткочасним (декілька секунд) протіканням струму в декілька сотень міліампер.

Припинення роботи серця також пояснюється безпосередньою або рефлекторною дією струму на серцевий м'яз. При цьому може відбутися зупинка або наступити фібриляція серця.

Електричний шок — це процес важкої нервово-рефлекторної реакції організму на роздратування електричним струмом. В стані шоку виникають глибокі розлади дихання, кровообігу, нервової системи, обміну речовин та інших систем організму. Відразу ж після дії струму настає короткочасна фаза збудження організму. Біологічна смерть характеризується необоротними явищами, пов'язаними з припиненням біологічних процесів в клітинах і тканинах і розпадом білкових структур. Біологічна смерть настає після періоду клінічної смерті.

Б.2 Технічні заходи, що забезпечують безпеку робіт в електроустановках

Б.2.1 Захисне відключення

Призначення. Захисне відключення – система швидкодіючого захисту, яка забезпечує автоматичне вимикання електроустановки при появі в ній небезпеки ураження електричним струмом. Дана небезпека може виникнути, частково, якщо є замикання фази на корпус, погіршення опору ізоляції мережі нижче визначеної межі і у випадку доторкання людини безпосередньо до струмоведучої частини, яка знаходиться під напругою.

Небезпека ураження обумовлена напругою дотику U_{np} , В, або, інакше кажучи, струмом, що проходить через людину, I_h , А. Як відомо,

$$U_{np} = I_h \cdot R_h,$$

де R_h – опір тіла людини, Ом.

Таким чином, якщо при дотику людини до корпусу обладнання чи фази мережі напруга дотику (або через людину) перевищує тривало допустиме значення, то з'являється реальна загроза враження людини електричним струмом і засобом захисту в цьому випадку може бути, частково, швидкий розрив ланцюга струму через людину, тобто відключення відповідної частини мережі. Для виконання цієї задачі і призначене захисне відключення.

Основними елементами обладнання захисного відключення (ПЗВ) є прилад захисного відключення та виконавчий орган – автоматичний вимикач.

Прилад захисного відключення – це сукупність окремих елементів, які приймають вхідну величину, реагують на її зміни і при заданому значенні посиляють сигнал на відключення вимикача.

Чутливість ПЗВ – їх здатність відчувати малі зміни вхідної величини – виконувати безпосередній вплив на степінь безпеки.

Під уставкою в даному випадку розуміють попередньо встановлену величину вхідного сигналу, при якій спрацьовує ПЗВ.

Час відключення – це інтервал часу з моменту створення аварійної ситуації до моменту вимкнення струму у всіх полюсах вимикача, рівний часу спрацювання пристрою ПЗВ t_n , с, і часу спрацювання t_b , с;

$$t_{\text{відк}} = t_n + t_b.$$

Час спрацювання пристрою ПЗВ t_n – період з моменту виникнення аварійної ситуації до подачі імпульсу на вимикання вимикача – залежить від конструкції і властивостей давача та інших елементів пристроїв. Відповідно, при наявності контактів і рухливих частин t_n значно збільшується.

Селективність – це вибіркова дія ПЗВ – виражається в здатності вимикати від мережі лише пошкоджені об'єкти, тобто об'єкт, на якому створилась небезпека ураження людини електричним струмом. Селективність - важлива властивість ЗВ, оскільки через неселективності разом із пошкодженими об'єктами може вимикатись непошкоджене устаткування.

Самоконтроль – властивість реагувати на пошкодження у власній схемі шляхом вимикання захищаємого об'єкту – являється бажаним для всіх типів ПЗВ.

Самоконтроль непошкодженості необхідний для схем ПЗВ, які застосовують замість заземлення або занулення, інакше у випадку відсутності заземлення (занулення) і пошкодження ПЗВ, замикання на корпус залишиться не вимкненим і виникне реальна небезпека ураження струмом.

Надійність ПЗВ - це стан постійної готовності до дії, здатність спрацьовувати в усіх випадках порушення нормального режиму роботи захищаємого об'єкту з створенням небезпеки ураження струмом, та здатністю не реагувати на інші фактори порушення режиму.

Типи пристроїв захисного відключення. Ситуації, що становлять ризик ураження людей електричним струмом, виникають через зміну електропровідності фаз мережі відносно землі. Як результат цієї зміни

можуть змінюватись й інші електричні параметри пристроїв, наприклад потенціал корпусу; струм, що стікає в землю та ін. Отже, степінь небезпеки ураження людини струмом, значення напруги дотику (або струму, що проходить через людину), знаходиться в певній залежності від цих параметрів. Отже, будь-який із цих параметрів може бути вхідною величиною для пристрою ЗВ.

Існують також комбіновані пристрої, які реагують не на одне вхідне значення, а на кілька вхідних значень.

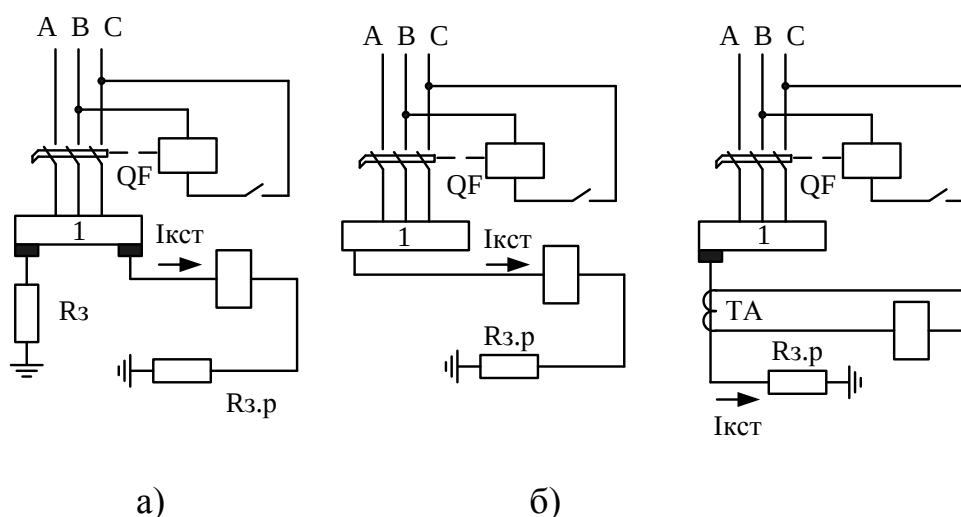


Рисунок Б.4. Принципіальна електрична схема захисного відключення:

а) реагуючого на потенціал корпусу; б) реагуючого на струм замикання на землю з включенням реле струму в розсічку заземляючого провідника безпосередньо (зліва) або через ТТ (зправа); 1- електроустановка.

Пристрої, що реагують на потенціал корпусу. Метою цього типу ПЗВ є усунення ризику ураження людей електричним струмом при наявності підвищеного електричного потенціалу на заземленому або обнуленому корпусі. Ці пристрої зазвичай є додатковими захисними заходами перед заземленням або зануленням.

Принцип дії – швидке відмикання від мережі пошкодженого обладнання, якщо потенціал, що виник на його корпусі, φ_k , В, виявиться більшим потенціалу $\varphi_{k, \text{доп}}$, В, при якому напруга доторкання до корпусу має найбільше допустиме значення $U_{\text{пр, доп}}$, В.

Перевага ПЗВ, реагуючих на потенціал корпусу, - безперечна простота їх схем.

Недоліками їх являються необхідність мати допоміжні заземлення, неселективність вимикання у випадку приєднання декількох корпусів до одного заземлювача, відсутність самоконтролю ушкоджень і нестабільність уставки при змінах опору заземлювача корпусу r_e .

Пристрої, що реагують на струм замикання на землю. Їх призначення - виключити ризик ураження електричним струмом людини при дотику до заземленого корпусу в період замикання на нього фази.

Захисне відключення можна застосовувати в наступних випадках:

1.В доповнення до системи заземлення в мережах з ізольованою нейтралю, коли необхідно забезпечити відключення пошкодженого обладнання.

2.При захисті пересувних установок, коли допускається відключення всього електрообладнання установки.

3.Для віддалених струмоприймачів в мережах з глухо заземленою нейтралю, коли важко забезпечити успішну роботу заземлення шляхом приєднання корпусів електрообладнання до багатократно заземленого нульового проводу.

Б.2.2 Захисне заземлення

Захисне заземлення – штучне електричне з'єднання з землею або з її еквівалентом металічних неструмоведучих частин, які можуть опинитися під напругою внаслідок замкнення на корпус і по іншим причинам (індуктивний вплив сусідніх струмоведучих частин, виніс потенціалу, розряд блискавки і т. п.).

Еквівалентом землі може слугувати вода, кам'яне вугілля в корінному заляганні тощо.

Призначення захисного заземлення – усунення небезпеки враження струмом у випадку доторкання до корпусу електроустановки та до інших неструмоведучим металічним частинам, що опинилися під напругою в наслідок замкнення на корпус та по інших причинах.

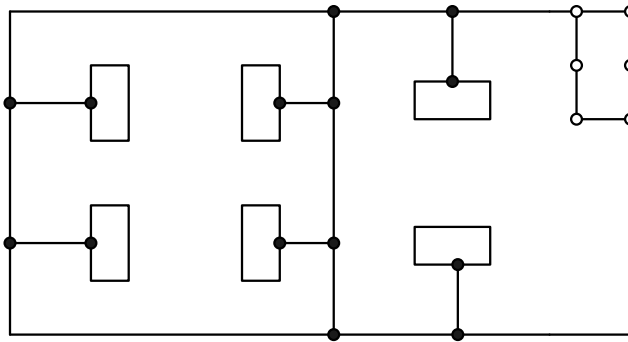


Рисунок Б.5. Принципіальна схема захисного заземлення:

- 1- заземлене обладнання;
- 2- заземляючі провідники;
- 3- заземлювач.

Захисне заземлення потрібно відрізнити від поняття - робоче заземлення та заземлення блискавкозахисту.

Робоче заземлення – штучне сполучення з землею окремих точок струмового ланцюга. Робоче заземлення призначається для створення належного функціонування електроустановки в звичайних чи аварійних умовах і проводиться безпосередньо (тобто з'єднанням провідником частин, із заземлювачем) або через спеціальні пристрої – пробивні запобіжники, розрядники, резистори та ін.

Заземлення блискавкозахисту – штучне сполучення із землею блискавкоприймачів та розрядників з метою відводу від них удару струму блискавки в землю.

Принцип дії захисного заземлення – зменшення до безпечних значень напруги доторкання і кроку, обумовлених замкненням на корпус та іншими причинами. Це проводиться шляхом зниження потенціалу заземленого

обладнання, а також методом зрівнювання потенціалів поверхні, на якій стоїть людина, та заземленого обладнання.

Захисне заземлення застосовується на таких об'єктах:

- мережі змінного струму напругою до 1000 В— трифазні трипроводні з ізольованою нейтраллю, однофазні двопроводні, ізольовані від землі, а також постійного струму двопроводні з ізольованою середньою точкою обмоток;
- мережі змінного і постійного струму напругою вище 1000 В з будь – яким режимом нейтралі чи середньою точкою обмоток джерела струму.

Захисне заземлення є найбільш простою і в той же час вельми ефективною мірою захисту від ураження електричним струмом при виникненні напруги на металевих неструмоведучих частинах.

Перед початком роботи в електроустановках оперативним персоналом даної електроустановки повинні бути виконані технічні заходи, що забезпечують безпеку робіт:

1. Вимкнення обладнання, що виводиться в ремонт та використання заходів проти його помилкового включення або самоувімкнення.
2. Установка тимчасових огорож, плакатів: “Не вмикати працюють люди”, “Не відкривати працюють люди”.
3. Приєднання переносного заземлення до заземлюючої шини і перевірка відсутності напруги на струмопровідних частинах, які з метою безпеки виробництва робіт потрібно заземлювати.
4. Накладання переносного заземлення на вимкнені струмопровідні частини електроустановок одразу після перевірки, відсутності напруги або включення заземлюючих ножів, що мають бути на кожному приєднанні електроустановки.
5. Огородження робочого місця і вивішування плакатів, що дозволяють працювати “Працювати тут”.

Захисні заходи при пошкодженні ізоляції:

Б.2.3 Занулення

Небезпека ураження струмом при торканні до корпусу та інших не струмоведучих металічних частин електрообладнання, що виявилися під напругою внаслідок замикання на корпус та по інших причинах, може бути усунена швидким відключенням пошкодженої електроустановки від живлячої мережі і разом з тим зниженням напруги корпусу відносно землі. Цій меті слугує занулення, принципова схема якого в мережі трифазного струму показана на рис.Б.Б.

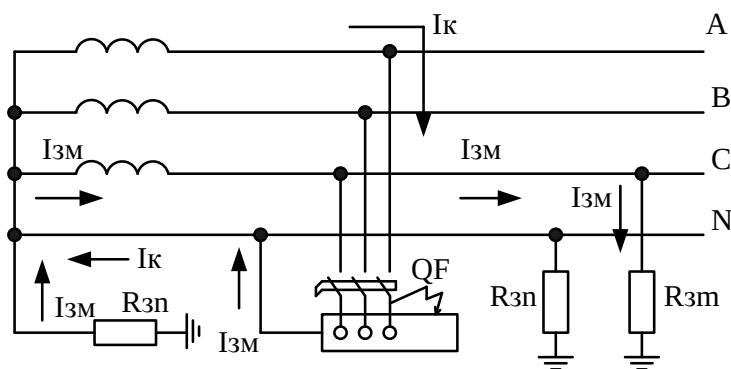


Рисунок Б.6. Принципіальна електрична схема занулення:

- 1- заземляючий провідник;
2- корпус зануленої електроустановки.

Занулення - металічне з'єднання металічних не струмоведучих частин електроустановки, які можуть потрапити під напругу, з глухо заземленою нейтральною точкою обмотки джерела струму в трифазних мережах, при

цьому провідник який забезпечує вказане з'єднання занулених частин з глухо заземленою нейтраллю називається нульовим захисним провідником.

Призначається занулення для усунення небезпеки пошкодження струмом в разі доторкання до корпусу електроприймача та других металічним не струмоведучим частинам які опинилися під напругою відносно землі в наслідок замикання на корпус та по другим причинам.

Принцип дії занулення полягає в перетворенні замикання на корпус в однофазне коротке замкнення з метою визвати найбільший струм, здатний забезпечити спрацювання захисту і тим самими автоматичну від'єднати пошкоджену установку від живлячій мережі.

Таким чином занулення виконує дві захисних дії - швидке автоматичне від'єднання пошкодженої ділянки від живлячої мережі і зниження напруги занулених металічних неструмоведучих частин, які опинилися під напругою, відносно землі.

Занулення застосовується в трифазних чотирьох провідних мережах до 1000 В глухо заземленою нейтраллю напругою 380/220, 220/127 660/380 В. Занулення застосовується і в три провідних мережах постійного струму з глухо заземленою середньою точкою обмотки джерела живлення, а також в однофазних двопровідних мережах змінного струму з глухо заземленим виводом обмотки джерела струму.

Нульовий захисний провідник призначений для забезпечення необхідного для відключення установки значення струму однофазного короткого замкнення, шляхом утворення для цього струму ланцюга з малим опором.

Заземлення нейтралі обмоток джерела живлення, живлячого мережу до 1000 В необхідне для зниження напруги занулених корпусів (і нульового захисного провідника) відносно землі до безпечного значення при замкненні фази на землю.

Повторне заземлення нульового робочого провідника практичне не діє на відключаючу здатність схеми, але значно зменшує небезпеку враження струмом виникаючу в результаті обриву нульового захисного провідника і замикання фази на корпус на місці обриву, але не може усунути її повністю, тобто не може забезпечити тих умов безпеки котрі існували до пошкодження. У зв'язку з цим треба здійснювати прокладку нульового захисного провідника так, щоб виключити можливість його пошкодження. В нульовому захисному провіднику забороняється встановлювати вимикачі, запобіжники та інші прибори які здатна порушувати його цілісність.

Таким чином призначення повторного заземлення провідника - зниження напруги відносно землі занулених конструкцій в період замкнення фази на корпус як при справній схемі занулення, так і в разі обриву нульового захисного провідника.

Занулення повинно виконуватися у наступних випадках:

В приміщеннях з підвищеною небезпекою та особо небезпечних по відношенню враження електричним струмом, а також ззовні приміщень при напрузі електроустановок 42 В

В приміщеннях без підвищеної небезпеки при напрузі електроустановок 380 В та вище змінного струму і 440 В і вище постійного струму.

У вибухонебезпечних приміщеннях усіх класів незалежно від напруги електроустановок.

Зануленню також підлягають металічні не струмоведучі частини котрі підлягають заземленню в тому числі корпуси електричних машин, трансформаторів апаратів, світильників, металічні кабельні з'єднувальні муфти, металічні оболонки і броня контрольних та силових кабелів, металічні рукава та труби електропроводки.