

## Лекція 17

### РІВНІ СТРУМІВ ТА ПОТУЖНОСТІ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ

#### 1. Координація рівня струмів короткого замикання

Координація рівня струмів КЗ – це узгодження їх значень у різних вузлах СЕП з параметрами електрообладнання або значеннями окремих параметрів режиму. За своєю постановкою вона являє собою важливе техніко-економічне завдання, від вирішення якого залежать енергетичні та вартісні характеристики СЕП.

При централізованому електропостачанні промислових підприємств, міст та об'єктів сільського господарства це завдання постає при значних значеннях струмів КЗ на межі з живильною енергетичною системою. Його вирішення полягає в поступовому зниженні рівня струму КЗ, створюваного джерелами електричної енергії. Це виконується при проектуванні СЕП, її експлуатації та подальшому розвитку або реконструкції.

Під час проектування СЕП для вирішення проблеми координації струмів КЗ початковими стають дані про джерела живлення та склад електроприймачів. На основі запланованого територіального розміщення споживачів відомими вважаються передбачені джерела електричної енергії з такими характеристиками:

- встановлені потужності генеруючих джерел промислового району з перспективою розвитку на 8...10 років;
- потужності або струми КЗ, генеровані джерелами з урахуванням розвитку не менш як на 5 років з моменту введення в експлуатацію СЕП;
- робоча напруга районної ЕЕС;
- параметри ЛЕП між ЕЕС і СЕП.

Склад електроприймачів обумовлює вимоги до безперервності електропостачання, якості електричної енергії, допустимої тривалості перерв у живленні та ін. За цими початковими даними можна сформулювати необхідні властивості проекрованої СЕП щодо надійності, втрат напруги, потужності та енергії, безпеки, гнучкості, жорсткості та стійкості, а також накреслити

варіанти та визначити параметри передбаченого до застосування електрообладнання.

На основі кількісних показників перерахованих властивостей і характеристик електрообладнання для вузлів розподілу електричної енергії можуть бути встановлені оптимальні значення струмів КЗ. З їх урахуванням необхідно обґрунтовувати оптимальну структуру схеми електропостачання, число приймальних пунктів зв'язку з ЕЕС, розміщення підстанцій глибокого вводу (ПГВ), вибір робочих напруг та кількість ступенів розподілу енергії.

На етапі експлуатації СЕП необхідність вирішення питань координації струмів КЗ виникає при зміні схеми електропостачання, підвищенні потужності генеруючих джерел, потужності або перепускної потужності основних елементів, введенні обмежень на режим роботи основного електрообладнання, збільшенні щільності навантаження та завантаження мереж. Зазначимо, що нові значення струмів КЗ повинні узгоджуватися з параметрами встановленого електрообладнання та мереж.

Координація струмів КЗ досягається:

- стаціонарним або автоматичним розподілом мережі;
- застосуванням струмообмежувальних одноланцюгових і здвоєних реакторів чи інших струмообмежувальних пристроїв;
- використанням комутаційних апаратів підвищеної стійкості до впливу струмів КЗ;
- розукрупненням трансформаторних підстанцій за потужністю трансформаторів і секцій шляхом розміщення трансформаторів з розщепленими обмотками або здвоєних реакторів;
- зміною стану нейтралі мережі розземленням частини нейтралей трансформаторів, заземлення нейтралей через резистори, реактори та струмообмежувальні пристрої;
- електричним розподілом мережі встановленням розподільних трансформаторів.

В умовах наступного розширення і розвитку СЕП узгодження рівнів струмів КЗ переслідує таку ж мету, як і при експлуатації СЕП. Додатковий раціональний захід – будівництво нових приймальних пунктів зв'язку з ЕЕС і ПГВ з поперечним та поздовжнім розподілом мереж для покриття підвищення електричних навантажень.

На всіх етапах координації рівня струмів КЗ на різних ступенях розподілу енергії їх аналіз використовують для обґрунтування технічної необхідності створення нового та модернізації існуючого електрообладнання. Контроль струмів КЗ у вузлах навантаження та аналіз динаміки їх зміни – важливий чинник надійності електропостачання в процесі експлуатації.

## **2. Перехідні процеси в системах електропостачання підприємств в комплексі проблем електромагнітної сумісності**

### **2.1. Загальні відомості**

Будь-які комутації, що відбуваються в електричних системах (ЕС), супроводжуються зміною запасів електричної енергії, зосередженої в індуктивних та ємнісних елементах електроустаткування. Ці зміни супроводжуються виникненням перехідних процесів, які представляються у вигляді змін у часі струмів, напруги й інших параметрів, що характеризують фізичні процеси, які відбуваються. За рідкісним виключенням (електрична дуга, імпульсні процеси) між напругою і струмами в перехідних процесах зберігаються відомі з теоретичної електротехніки співвідношення.

До останніх десятиліть електромагнітні процеси розглядалися в промислових електричних мережах і мережах енергосистем з точки зору виникнення значних порушень: статичної й динамічної стійкості, струмів КЗ і т.п.

Проблема аналізу і розрахунку перехідних процесів у СЕП є часткою загальної проблеми електромагнітної сумісності, сформульованої й оформленої в науковій дисципліні «Електромагнітна сумісність» (ЕМС). На минулих лекціях було розглянуто електромагнітні перехідні процеси в промислових системах електропостачання (частота 50 Гц). Як правило, в цьому випадку немає взаємного впливу окремих видів електроустаткування. Електромагнітне поле характеризує електромагнітні умови, представлені у вигляді різного роду електромагнітних перешкод (ЕМП). Відповідно окремі види електроустаткування є або генераторами перешкод (джерелами емісії перешкод), або об'єктами їх впливу, що характеризує їхню електромагнітну сумісність. Тривала дія ЕМП на ізоляцію електроустаткування може привести до її ушкодження і, як наслідок, до виникнення КЗ. Проникнення ЕМП до ланцюга систем автоматики, зв'язку і релейного захисту частенько викликає збої в роботі цих систем, тобто порушення електромагнітної сумісності. Це супроводжується помилковою роботою релейного захисту, виникненням автоколивань в основних мережах СЕП, порушенням статичної стійкості й іншими негативними явищами.

Тому поширення електромагнітних перехідних процесів у СЕП підприємств повинне включати не лише розрахунки струмів КЗ і стійкості паралельної роботи електростанцій електричних мереж, але й питання розрахунку і аналізу ЕМП, тобто комплекс питань електромагнітної сумісності.

## 2.2. Електромагнітні перешкоди в СЕП підприємств

СЕП підприємства є джерелом великої кількості електромагнітних перешкод. До них відносяться лінії електропередачі, розподільні пристрої, шинопроводи, кабелі, а також технічні засоби автоматизації, управління й захисту.

Виникнення аварійних (перехідних) електромагнітних процесів обумовлене, в першу чергу, короткими замиканнями в системах електропостачання або комутаційними перемикаваннями. Вони є джерелами коливальних і аперіодичних перешкод, що випадково виникають у часі, та характеризуються, як правило, широким частотним спектром.

Нормальні (сталі) електромагнітні процеси, для яких характерні перешкоди у зоні низьких, середніх і високих частот (від декількох Гц до 100 ГГц), створюються усіма енергетичними установками. На рис. 10.16 приведено частотні спектри імпульсних і періодичних електромагнітних перешкод в електротехнічних установках. Електротехнічні пристрої є не лише генераторами електромагнітних перешкод, а й об'єктом дії інших перешкод як в аварійних, так і нормальних режимах.

Головними причинами таких дій є:

- комутаційні процеси на стороні високої напруги, що виникають в результаті планових перемикань, аварійних процесів (короткі замикання, перекриття ізоляції ліній електропередачі, перемикавання, у тому числі операції з роз'єднувачами);
- комутаційні процеси на стороні низької напруги при включеннях і відключеннях апаратури, що містить індуктивні ланцюги, надточні пристрої, що створюють сильні електричні й магнітні поля промислової частоти;
- наявність потужних височастотних пристроїв зв'язку, передачі даних і т.п., а також наявність коливань напруги з частотою вищих гармонік, перерв живлення в ланцюгах електропостачання оперативного струму й т.д.;
- розряди статичної електрики, удари блискавки безпосередньо в об'єкти, що підходять до ліній або розташовані поблизу них.

Комутаційні процеси на стороні високої напруги в результаті планових перемикань, аварійних процесів (короткі замикання, перекриття ізоляції ліній електропередачі, перемикавання й т.п.) і низької напруги створюють перехідні електромагнітні перешкоди, перш за все, в технічних засобах автоматизації, управління, захисту.

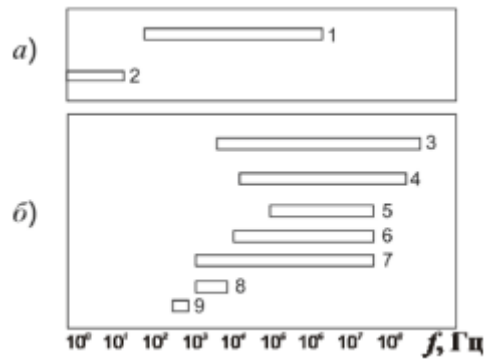


Рис. 16. Частотні спектри електромагнітних імпульсних (а) і періодичних (б) процесів, що викликають перешкоди в електротехнічних установках і пристроях: 1 – комутаційні процеси; 2 – кидки навантаження; 3 – радіо і телевізійні приймачі; 4 – комп'ютерні системи; 5 – мережеві комутаційні пристрої; 6 – електротехнічні установки; 7 – електроприймачі; 8 – централізоване управління; 9 – мережа електроживлення

При цьому в мережі високої напруги можуть виникати затухаючі коливання з частотою в сотні кілогерц і перенапруження, що у багато разів перевищують номінальну напругу. До найбільш інтенсивних перешкод, небезпечних для дискретних засобів автоматики в пристроях низької напруги, відносяться електромагнітні перешкоди, що створюються при комутації індуктивних ланцюгів. У несприятливих випадках при комутації індуктивних ланцюгів можливі значні рівні електромагнітних перешкод: перенапруження в місцях їх виникнення в електричних мережах напругою до 10 кВ; при крутизні перенапруг до 100 В/нс; час наростання імпульсу перенапруг – від 1 нс до 1 мс; перешкоди в лініях передачі даних, обумовлених перенапружками в електричних мережах.

За певних умов, як правило при перевищенні нормованих рівнів, електромагнітні перешкоди можуть привести до порушення перешкодостійкості технічних засобів електростанцій і підстанцій, зокрема, широко впроваджуваних нині пристроїв мікропроцесорного релейного захисту.

Проведені дослідження приблизно на 100 діючих підстанціях показали: до 15 % випадків ушкодження або неправильного функціонування вторинного устаткування обумовлено невиконанням умов електромагнітної сумісності [46].

У табл. 1 вказано види і характеристики деяких електромагнітних перешкод, що впливають на технічні засоби електростанцій і підстанцій.

У системах електропостачання підприємств в нормальному симетричному режимі експлуатації існують фонові перешкоди, рівні яких знаходяться в межах допустимих стандартних значень. Як правило, відхилення діючого значення від номінального коливається в межах  $\pm 2\%$ ; в тих же межах знаходиться і несиметрія трифазних напруг по зворотній послідовності. Фонові

рівні несинусоїдальності, обумовлені перш за все несиметрією магнітопроводів трансформаторів, зазвичай не перевершують 2 - 3 %.

Таблиця 1

**Деякі види і характеристики електромагнітних перешкод, що впливають на технічні засоби електростанцій і підстанцій**

Тривалі перешкоди	Перешкоди перехідного характеру з високою вірогідністю виникнення	Перешкоди перехідного характеру з низькою вірогідністю виникнення
Повільні зміни напруги : - у системах електропостачання змінного струму; - у системах електропостачання постійного струму	Провали напруги електроживлення (тривалість не більше 0,02 с) : - у системах електропостачання змінного струму; - у системах електропостачання постійного струму	Провали напруги електроживлення (тривалість більше 0,02 с) : - у системах електропостачання змінного струму; - у системах електропостачання постійного струму
Гармонійні складові та інтергармоніки напруги електроживлення	Коливання напруги електроживлення	Переривання напруги електроживлення: - у системах електропостачання змінного струму
Напруга промислової частоти	Затухаюче коливальне магнітне поле	Мікросекундні імпульсні перешкоди великої енергії
Кондуктивні перешкоди в смузі частот від 0 до 150 кГц (включаючи перешкоди на частоті 50 Гц)	Електростатичні розряди	Короткочасна напруга промислової частоти

На практиці спостерігаються неперіодичні провали напруги, пов'язані з комутацією двигунів, трансформаторів, конденсаторів і т. п. Як правило, глибина провалів не перевищує декількох відсотків номінальної напруги при тривалості від 100 мс до декількох секунд. Провали напруги, що виникають при короткому замиканні внаслідок ушкодження ізоляції, обумовлюють зниження напруги до 10 % номінального значення при тривалості від 500 мс до декількох секунд. Спостерігаються також періодичні зниження напруги, що визначаються роботою керованих вентильних перетворювачів, а також періодичні та неперіодичні перенапруження тривалістю до декількох десятків мікросекунд. Однією з причин таких перенапружень є грозові розряди.

**2.3. Джерела штучних електромагнітних перешкод у СЕП підприємств**

На сучасних промислових підприємствах більше половини електроенергії використовується в перетвореному вигляді (на металургійних заводах – більше 90 %). Широко вживані вентильні перетворювачі, різного роду

перетворювачі частоти, побутові прилади, що працюють як у статичних, так і в перехідних режимах, є потужними генераторами електромагнітних перешкод.

Нелінійні навантаження – дугові сталеплавильні печі й установки електрозварювань, вітроелектростанції, силові трансформатори, двигуни – також генерують значні перешкоди.

Розглянемо джерела штучних електромагнітних перешкод в системах електропостачання підприємств. Робота електроустановок усіх виробництв створює відхилення напруги. Коливання напруги мають місце при роботі електроустановок машинобудівних підприємств (з потужними зварювальними агрегатами), підприємств чорної металургії з дуговими сталеплавильними печами і кольорової металургії з електролізними установками.

Несиметрія напруги виникає при роботі потужних однофазних електроприймачів, тягових підстанцій електрифікованого залізничного транспорту, підприємств з потужними зварювальними установками. Тут спостерігається нерівномірний розподіл однофазних споживачів і неоднчасна зміна навантаження по фазах. Несинусоїдальність напруги викликається роботою дугових сталеплавильних печей, електролізних установок, тягових підстанцій електрифікованого залізничного транспорту.

Вентильні перетворювачі є потужними концентрованими джерелами гармонійних перешкод – вищих гармонік. У найчастіше вживаних 6-пульсних мостових схемах переважаючими є 5, 7, 11 і 13-а гармоніки, звані канонічними, рівні яких (по відношенню до 1-ої гармоніки) зворотно-пропорційні номеру, тобто  $1/5$ ,  $1/7$ ,  $1/11$ ,  $1/13$ . При використанні 12-пульсних схем теоретично відсутні 5-а і 7-а гармоніки, а переважають 11-а і 13-а. Такі перетворювачі застосовуються, наприклад, в схемах головних приводів прокатних станів, електролізному виробництві й т.ін.

При ударних навантаженнях, наприклад у прокатному виробництві, в живлячих електричних мережах відбуваються провали і коливання напруги.

При роботі прокатних станів у разі відсутності спеціальних швидкодіючих компенсуючих пристроїв виникають значні коливання напруги. Так, в мережі напругою 10 кВ стана типу «слябінг» доза флікера (одиниця виміру коливань напруги) складає 10,5; на шинах напругою 10 кВ – 2,2. У мережі стана типу «блюмінг» значення дози флікера становить більше 4.

Наприклад, накиди реактивної потужності при захопленні металу валками на стані холодного прокату сягають 2000 Мвар, що призводить до виникнення провалів напруги (залежно від номінальної напруги і потужності короткого замикання) до 10...12 %.

Вентильний перетворювач, що працює в мережі з несиметрією лінійної напруги, є джерелом струму зворотної послідовності :

$$I_2 = 0,5K_{2U}I_1,$$

де  $K_{2U}$  – коефіцієнт несиметрії лінійної напруги при зворотній послідовності;  $I_1$  – 1-а гармоніка мережевого струму вентильного перетворювача в симетричному режимі.

Фаза струму  $I_2$

$$\arg I_2 = \varphi_2 + \alpha,$$

де  $\varphi_2$  – зсув по фазі між векторами струмів  $I_2$  і  $I_1$ ;  $\alpha$  – кут управління вентильним перетворювачем.

Перетворювачі частоти (ПЧ) останніми роками знаходять більш широке застосування для регулювання швидкості обертання двигунів у складі системи управління частотно-регульованого електроприводу в металургії, машинобудуванні, на підприємствах легкої промисловості. Перетворювачі частоти є джерелами гармонійних електромагнітних перешкод не лише вищих гармонік, але й так званих інтергармонік (ІГ) або міжгармонік, частоти яких знаходяться між частотами канонічних вищих гармонік. Джерелами інтергармонік є також споживачі, що постійно або короткочасно працюють в перехідному режимі: дугові сталеплавильні печі, установки електрозварювання, вентильні перетворювачі прокатних станів й інші різкозмінні нелінійні навантаження.

На рис. 1 представлено структурну схему перетворювача частоти з ланкою постійного струму, що складається з випрямляча В, інвертора І (як правило, інвертора напруги) та індуктивно-ємнісного фільтру (ланка постійного струму):

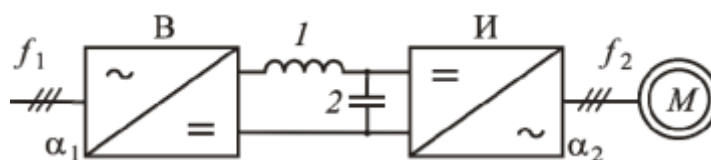


Рис. 1. Схема перетворювача частоти з ланкою постійного струму (реактором і конденсатором):  $f_1, f_2$  – відповідно вхідна частота від випрямляча В і вихідна частота інвертора І;  $\alpha_1, \alpha_2$  – кути управління випрямлячем й інвертором; 1 – реактор; 2 – конденсатор; М – двигун змінного струму (мотор)

Випрямляч й інвертор можуть бути керованими або некерованими. Потужні перетворювачі частоти у складі фільтру мають згладжуючий реактор, призначений для зменшення пульсацій випрямленого струму. В малопотужних перетворювачах частоти у ланці постійного струму міститься тільки конденсатор.

У всіх випадках перетворювачі частоти підключаються до мережі безпосередньо (без спеціального трансформатора).



Кожній канонічній вищій гармоніці в мережевому струмі відповідають дві інтергармоніки (4, 6, 8, ...). Спектральний склад вхідного (мережевого) струму  $f_{вх}$  має вигляд

$$f_{вх} = (kp_1 \pm 1) f_1 + p_2 f_2 v.$$

Як приклад приведемо спектр частот навколо канонічної 7-ої гармоніки (рис. 2).

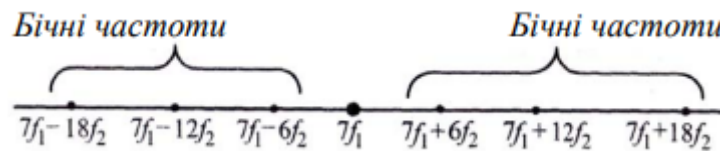


Рис. 2. Частотний спектр бічних частот навколо 7-ої вищої гармонійної складової

Як правило,  $f_1 \neq f_2$ . Навколо кожної канонічної гармоніки (рис. 2) з'являється ряд бічних частот – інтергармонік. Значення  $(7 f_1 - 18 f_2) \geq 5 f_1$  і  $(7 f_1 + 18 f_2) < 11 f_1$ .

На рис. 2 представлено частотний спектр вищих гармонік та інтергармонік для перетворювача частоти (див. рис. 10.17) при  $f_1 = 50$  Гц,  $f_2 = 30$  Гц. З рис. 3 видно, що амплітуда інтергармоніки 2-го і 4-го порядку сягають 22% номінального струму 1-ої гармоніки, рівень 5-ої гармоніки – 40 %.

Безпосередні перетворювачі частоти, звані циклоконверторами, складаються з двох зустрічно включених випрямлячів (рис. 3). Залежно від виду модулюючої функції, що формується системою імпульсно-фазового управління (СІФУ), рівень інтергармонік у мережевому струмі перевищує рівні канонічних вищих гармонійних.

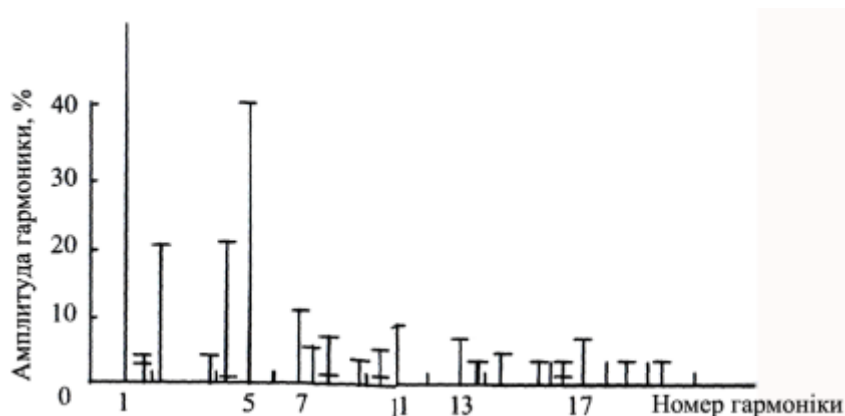


Рис. 3. Розрахунковий спектр вищих гармонійних складових струму перетворювача частоти з ланкою постійного струму

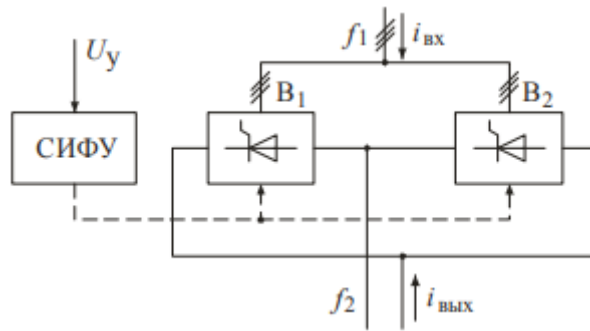


Рис. 4. Структурна схема безпосереднього перетворювача частоти з одно-фазним виходом: В1, В2 – зустрічно включені випрямлячі;  $f_1, f_2$  – відповідно вхідна і вихідна частоти струму

У табл. 2 зіставлені рівні вищих гармонійних перетворювачів (див. рис. 1 і 4) при різних законах управління.

Дугова сталеплавильна піч (струм дуги – 25...70 кА) є джерелом значних електромагнітних перешкод: несинусоїдальності, коли вань і несиметрії напруги. Найбільшою мірою генерування перешкод проявляється в період розпрямлення металу. Усереднені значення спектру вищих гармонік струму, генерованих дуговою сталеплавильною піччю, складають:

Номер гармоніки	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Значення гармоніки струму, %	100	2,7	2,3	0,65	2,3	1,3	1,5	1,0	0,85

Спектр процесу змін струму дугової сталеплавильної печі в період розплавлення металу є змішаним і складається з дискретної і безперервної складових.

**Рівні вищих гармонік у циклоконверторів і перетворювачів частоти з ланкою постійного струму**

Параметр, що визначається	Мостовий 6-пульсний циклоконвертор					3ф-3ф, 6-пульсний перетворювач частоти з ланкою постійного струму, $f_2$
	3ф-1ф при $f_2 = 10$ Гц і законі управління				3ф-3ф при $f_2 = 20$ Гц і синусоїдальному законі управління	
	лінійний	синусоїдальний	трикутник	прямокутник		
Діюче значення вхідного струму, %	147	208	183	173	128	113
Основна гармоніка вхідного струму, %	100	100	100	100	100	100
Діюче значення вищих гармонік вхідного струму, %	9	23	24	33	56	42
Діюче значення інтергармонік вхідного струму, %	107	181	152	138	56	30
Перевищення діючого значення інтергармонік над діючим значенням вищих гармонік вхідного струму	у 12 разів	у 8 разів	у 6 разів	у 4 рази	-	у 1,3 рази

Енергія інтергармонік для сталеплавильних печей продуктивністю 100 т і 200 т сягає 20 % всієї енергії змішаного спектру.

Несиметрія напруги на шинах печей залежно від напруги живлення дорівнює 5...6 % для мереж напругою 6...35 кВ, 3 % – для мереж напругою 110 кВ. Для цих же випадків значення дози флікера знаходиться, як правило, у межах 1,5...10.

Установки електрозварювань створюють практично всі основні електромагнітні перешкоди, що характеризують якість електроенергії: несинусоїдальність, несиметрію, провали і коливання напруги.

Струми  $n$ -ої вищої гармоніки  $I_n$  машин контактного зварювання визначаються за виразом

$$I_n = \frac{S_n \kappa_{зс} \sqrt{ПВ_{фс}}}{n^2 U_n},$$

де  $S_n$  – номінальна (паспортна) потужність установки електрозварювання;  $\kappa_{зс}$ ,  $ПВ_{фс}$  – середньостатистичні коефіцієнти відповідно завантаження і фактичної тривалості включення;  $n = 3, 5, 7$  – номер вищої гармоніки;  $U_n$  – номінальна напруга мережі.

Межі зміни значень гармонік струму односточкових установок для  $n = 3$  складають 12...30 %, для  $n = 5-4$  – 15 %, для  $n = 7-2$ ...8 %.

Струми вищих гармонік зварювальних машин постійного струму і зварювальних випрямлячів, комутованих за 6-пульсною схемою, розраховуються за аналогічним виразом

$$I_n = \frac{S_n k_{3c} \sqrt{ПВ_{\phi c}}}{\sqrt{3} n^2 U_n},$$

де  $n = 5, 7, 11$ .

Коефіцієнт несиметрії в мережах з установками електрозварювань знаходиться в межах 1...5 %.

Дані установки електрозварювань є також джерелами інтергармонік. При точковому зварюванні інтергармоніки з'являються в діапазоні 35...75 Гц з амплітудами, що сягають 20 % основної гармоніки зварювального струму. Для усіх установок електрозварювань енергія дискретного спектру складає 6...20 % загальної енергії змішаного спектру. Параметри провалів напруги приведено в табл. 3.

Газорозрядні лампи (люмінесцентні й дугові ртутні) є джерелами вищих гармонік порядку  $n = 3, 5, 7$ . Генерування несинусоїдальності обумовлене нелінійністю вольтамперної характеристики дуги і наявністю дроселя в комплекті пускорегулюючої апаратури. Відносне значення струмів 3-ої і 5-ої гармонік складає відповідно до 16...21 % і 0,9...3 % – для люмінесцентних ламп з індуктивно-ємнісним баластним опором; 18 % і 5,8...7,2 % – для дугових ртутних ламп з компенсацією.

Таблиця 3

### Параметри провалів напруги, що створюються установками електрозварювань деяких типів

Тип машини	Потужність установки, кВ·А	Глибина провалу напруги, %	Тривалість провалу напруг, с
Точкова стаціонарна	75	1,2	0,18
Стикувальна	750	13,0	0,70
Багатоточкова	63	16,3	0,36
Дугова	60	1,0	17,00

При цьому значення гармонік струму знаходяться за виразом

$$I_n = \frac{0,2 S_n}{n^2 U_n},$$

де  $S_n$  – номінальна потужність дугових ртутних ламп.

Вітроенергетичні установки є інтенсивними джерелами електромагнітних перешкод, в основному, вищих гармонік і коливань напруги. На рис. 5 представлено типову схему вітроустановки. Інвертор сполучено з

електричною мережею напругою 10 кВ безпосередньо або через підвищуючий трансформатор. На секціях шин на напругу 10 кВ робилися виміри тривалої дози флікера і коефіцієнта спотворення кривої синусоїдальності напруги  $K_U$ .

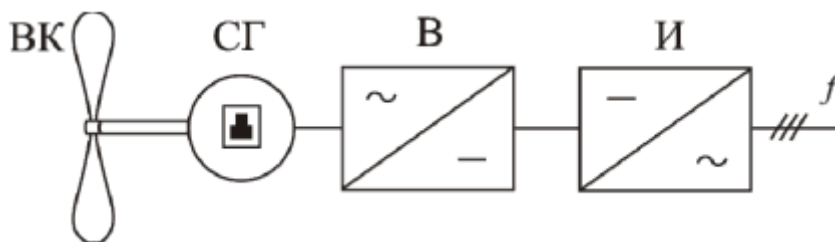


Рис. 6. Схема вітроенергетичної установки: СГ – синхронний генератор; В – випрямляч; И – інвертор; ВК – вітроколесо

У табл. 4 кількісну оцінку рівня електромагнітних перешкод приведено у відносних одиницях в логарифмічному масштабі. Цей підхід дозволяє порівнювати значення, що розрізняються на декілька порядків.

Представлені з позиції ЕМС електроустаткування й електричні пристрої відносяться до нелінійних навантажень. У сучасних СЕП спостерігається все зростаюча питома вага перетворювачів навантаження, заснована на пристроях силової перетворювальної техніки та енергоелектроніки. У схемах цих пристроїв використовуються, як правило, випрямлячі і (чи) інвертори, що комутують за 6- або 12- пульсною мостовою схемою.

Таблиця 4

#### Максимальний рівень електромагнітних перешкод у розподільній мережі підприємства напругою 0,38...35 кВ

Причина електромагнітних перешкод	Рівень перешкод, $H_n$	Тривалість імпульсу, мкс
Відключення або включення ліній:		
вимикачем	+1,7	5...20
вимикачем при короткому замиканні	-	5...20
роз'єднувачем	+2,5	500...1500
Удар блискавки	+2,5	до 1000
Корона на живлячих лініях напруги 110 кВ і вище	-5,0	постійна

#### 2.4. Розрахунки електромагнітних перехідних процесів з урахуванням вимог ЕМС

На електричних станціях і підстанціях промислових підприємств переважаючими видами ЕМП є гармонійні перешкоди – вищі гармоніки струму і напруги, що обумовлено, перш за все, широким застосуванням силової перетворювальної техніки. Постійна наявність вищих гармонік призводить до електромагнітних втрат і додаткового нагріву електроустаткування. При рівнях

вищих гармонік, що перевищують фонові значення, спостерігається нагрів електроустаткування і, як наслідок, виникає процес зниження електричної міцності ізоляції, інтенсивніше зростає знос ізоляції, виникає вірогідність ушкодження (пробою). Очевидно, що в цьому випадку надійність і термін служби ізоляції й електроустаткування знижуються.

Відомо, наприклад, що для кабелів термін служби ізоляції  $I_x$  (відносне значення) класу А зменшується у 2 рази при збільшенні температури нагріву на кожні  $6^\circ$ , тобто

$$I_x = 2^{\frac{\tau - \tau_{\text{доп}}}{6}},$$

де  $\tau$  – температура нагріву ізоляції,  $^\circ\text{C}$ ;  $\tau_{\text{доп}}$  – допустима температура нагріву жили кабелю, що складає  $65^\circ\text{C}$  для кабелів 6 кВ і  $60^\circ\text{C}$  – для кабелів 10 кВ.

Оцінка міри термічної дії струму КЗ здійснюється за допомогою інтеграла Джоуля  $B_k$  (теплого імпульсу)

$$B_k = \int_0^{t_{\text{вим}}} i_k dt,$$

де  $i_k$  – струм КЗ у момент часу  $t$ , А;  $t_{\text{вим}}$  – розрахункова тривалість КЗ, с.

Можлива оцінка за допомогою термічно еквівалентного струму КЗ  $I_{\text{тер.ел}}$

$$I_{\text{тер.ел}} = \sqrt{\frac{B_k}{t_{\text{вим}}}}.$$

У розрахунках інтеграл Джоуля допустимо визначати за формулою

$$B_k = B_{kп} + B_{kа},$$

де  $B_{kп}$  і  $B_{kа}$  – інтеграл Джоуля відповідно до періодичної й аперіодичної складових струму КЗ.

Для випадку довільної розрахункової схеми при віддалених КЗ і (чи) синхронних компенсуючих інтеграл Джоуля і термічно еквівалентне джерело КЗ визначаються за наближеними формулами:

$$B_k = I_{пс}^2 (t_{\text{вим}} + T_{аек}),$$

$$T_{терек} = I_{пс} \sqrt{1 + \frac{T_{аек}}{t_{\text{вим}}}},$$

де  $I_{пс}$  – діюче значення періодичної складової еквівалентного джерела енергії (системи), А;  $T_{аек}$  – еквівалентна постійна часу загасання аперіодичної складової струму КЗ, с.

Електричні апарати і кабелі задовольняють умовам термічної стійкості, якщо

$$B_k \leq B_{терсп}, I_{терел} \leq I_{тердоп}.$$

Для кабелів 6-10 кВ з паперовою ізоляцією гранично допустима температура нагріву при КЗ складає  $\Theta_{\text{доп}} = 200^\circ\text{C}$ .

Додаткові втрати за рахунок електромагнітних перешкод призводять до додаткового нагріву електроустаткування  $\Delta\tau$  і скорочення терміну служби ізоляції (електроустаткування в цілому) на  $\Delta T_{cl} = T_c - T_c^{(не)}$ , де  $T_c$  і  $T_c^{(не)}$  – термін служби елементів СЕП за наявності й відсутності ЕМП. Тривалість дієздатності ізоляції оцінюється за формулою Монтзингера

$$T_c = A e^{-0,086\tau},$$

де  $A$  – коефіцієнт, залежний від виду ізоляції;  $0,086$  – параметр Монтзингера, заснований на припущенні, що перегрівання на  $8^\circ$  призводить до скорочення терміну служби ізоляції удвічі;  $\tau$  – температура нагріву ізоляції.

Відносне скорочення терміну служби ізоляції електроустаткування

$$\Delta T = \frac{T_c - T_c^{не}}{T_c} = 1 - e^{0,086\Delta\tau} \approx 0,086\Delta\tau + \frac{(0,086\Delta\tau)^2}{2}.$$

Скорочення терміну служби ізоляції призводить до відповідного зниження надійності функціонування електроустаткування, зростання вірогідності її ушкодження й виникнення міжфазного або трифазного КЗ. Оцінку надійності після часу нормальної експлуатації  $t_{не}$  здійснюють, як правило, за допомогою закону (рівняння) Вейбулла. Функція надійності  $R(t)$  по Вейбуллу

$$R(t) \approx 1 - \lambda t^\alpha,$$

де  $\alpha$  – параметр форми розподілу;  $\lambda$  – параметр потоку відмов.

На практиці для розрахунку різного виду електроустаткування використовуються табличні значення цих параметрів.

Значення функції надійності  $R(t)$  для часу  $t$  (з урахуванням скорочення терміну служби ізоляції) відповідає рівню надійності, вірогідності ушкодження ізоляції й виникнення КЗ.