

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА



В. Ф. Рой

**« ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ У СИСТЕМАХ
ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ »**

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

*(для студентів 5 курсу денної та 6 курсу заочної форм навчання
магістерської програми за спеціальністю
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка)*

Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2018

Рой В. Ф. Конспект лекцій із дисципліни «Електромагнітна сумісність у системах електроспоживання» (для студентів 5 курсу денної та 6 курсу заочної форм навчання магістерської програми за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка) / В. Ф. Рой ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 114 с.

Автор д-р фіз.-мат. наук, проф. В. Ф. Рой

Рецензент В. А. Малярєнко, д-р техн. наук, проф.

Рекомендовано кафедрою систем електропостачання та електроспоживання міст, протокол № 3 від 09.04. 2017.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1 ОСНОВНІ ТЕРМІНИ І ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ	6
2 ВІДНОСНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА РІВНІ ЗАВАД	7
2.1 Логарифмічні відносні характеристики. Рівні завад	8
2.2 Основні типи та діапазони електромагнітних завад	8
2.3 Синфазні та протифазні завади	9
2.4 Поняття « земля і маса ».	11
2.5 Типи й основні параметри завад	11
3 КЛАСИФІКАЦІЯ ДЖЕРЕЛ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЗАВАД	13
3.1 Опис періодичних завад у частотній і часовій формах	13
3.2 Представлення неперіодичних функцій часу у частотній формі	16
3.3 Спектри періодичних і імпульсних процесів	18
3.4 Шляхи передачі електромагнітних завад	19
4 ДЖЕРЕЛА ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЗАВАД	21
4.1 Класифікація джерел електромагнітних завад	21
4.2 Джерела вузькосмугових завад	22
4.3 Вплив завад на мережі електропередач	24
4.4 Джерела широкосмугових імпульсних завад	25
4.5 Джерела широкосмугових перехідних завад	27
4.6 Комутація струму в індуктивних ланцюгах	29
4.7 Перехідні процеси в мережах електропередач	30
4.8 Класи навколишнього середовища	31
5 МЕХАНІЗМИ ВИНИКНЕННЯ ТА ВПЛИВ ЗАВАД	33
5.1 Механізми передачі завад	33
5.2 Гальванічний вплив завад	33
5.3 Емнісний вплив завад	36
5.4 Екранування ліній	39
6 ПАСИВНІ ПРИСТРОЇ ПРИДУШЕННЯ ЗАВАД	47
6.1 Фільтри	47
6.2 Елементи фільтрів	51
6.3 Мережні фільтри	55
6.4 Обмежувачі перенапруг	57
6.5 Захисні елементи	57
6.6 Екранування	61
6.7 Розділюючі елементи	65
7 ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ОБСТАНОВКИ НА ОБ'ЄКТИ	67
7.1 Задачі визначення ЕМО	67

7.2 Програма робіт по визначенню ЕМО	67
7.3 Вплив завад на кабелі систем	68
7.4 Імпульсні завади при перехідних процесах в ланцюгах ВН. . . .	69
7.5 Імпульсні завади при ударах блискавки	71
7.6 Електромагнітні завади радіочастотного діапазону	73
7.7 Імпульсні магнітні поля	76
8 ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ ТЕХНІЧНИХ ПРИСТРОЇВ У ВУЗЛАХ НАВАНТАЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ	76
8.1 Вплив кривої форми струму на роботу обладнання	76
8.2 Статичні перетворювачі – джерело гармонік	77
8.3 Вплив гармонік на роботу систем електрозабезпечення	79
8.4 Вплив резонансів на системи електрозабезпечення	80
8.5 Вплив на обладнання споживачів	83
8.6 Обмеження рівня гармонік напруг і струмів	84
9 ЕКОЛОГІЧНИЙ І ТЕХНОГЕННИЙ ВПЛИВ ПОЛІВ	92
9.1 Вплив електричних полів на живі організми	92
9.2 Механізми дії електричних і магнітних полів на живі організми	94
9.3 Електромагнітна обстановка на робочих місцях і в побуті	96
9.4 Нормування безпечних для людини напруженості полів	100
9.5 Нормування умов роботи персоналу в зоні впливу ПЛ	102
9.6 Екологічний вплив коронного розряду	105
9.7 Вплив ліній електропередач на лінії зв'язку	109
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.	113
ДОДАТОК А	114

ВСТУП

Електромагнітна сумісність (ЕМС) об'єднує такі електромагнітні явища, як радіоперешкоди, що впливають на мережі, перенапруги, паразитні зв'язки, фон промислової частоти, вплив заземлення та ін. Згідно стандарту VDE 0870 ЕМС визначається як спроможність технічних засобів функціонувати із заданою якістю в даній електромагнітній обстановці і не створювати неприпустимих електромагнітних завад іншим технічним пристроям.

Основними об'єктами в сфері ЕМС є передавачі та приймачі електромагнітної енергії. До передавачів електромагнітної енергії відносяться електричні мережі, радіо- та телевізійні передавачі, електроприймачі та ін.

На об'єктах електроенергетики передавачами електромагнітного впливу на автоматичні та автоматизовані системи управління технологічними процесами є наступні:

- перехідні процеси в ланцюгах високої напруги при комутаціях силовими вимикачами і роз'єднувачами;
- перехідні процеси в ланцюгах високої напруги при коротких замиканнях, спрацюванні розрядника або обмежувача перенапруги;
- електричні та магнітні поля промислової частоти, створені силовим обладнанням станцій та підстанцій;
- перехідні процеси в заземлюючих пристроях підстанцій, зумовлені струмами КЗ промислової частоти та струмами блискавок;
- швидкі перехідні процеси при комунікаціях в індуктивних ланцюгах низької напруги;
- перехідні процеси в ланцюгах різних класів напруги при ударах блискавки по самому об'єктові або поряд з ним;
- розряди статичної електрики;
- електромагнітні збурення в ланцюгах оперативного струму.

Прикладами передавачів електромагнітних збуджень є автомобільні пристрої запалювання, люмінесцентні лампи, колекторні електродвигуни, силова електроніка, зварювальні апарати, електроінструмент та ін.

В окремих випадках розглядаються такі види електромагнітних збуджень як:

- електромагнітні імпульси ядерних вибухів;
- магнітне поле Землі при аномальних проявах на поверхні Сонця;
- джерела електромагнітних завад на електричних станціях і підстанціях.

До приймачів електромагнітних збуджень відносяться теле- і радіоприймачі, силові електроприймачі, системи автоматизації, автомобільна мікроелектроніка, керовані прилади і регулятори, засоби релейного захисту і автоматики, пристрої обробки інформації і т.п. Багато

з електричних пристроїв можуть одночасно бути як приймачами так передавачами.

Як видно з вищесказаного, електричні пристрої вважаються сумісними, якщо вони в якості передавача є джерелом електромагнітних завад не вище допустимих, а в якості приймача мають допустиму чутливість до зовнішніх завад.

Електромагнітні явища можуть виникати у вигляді зворотних або незворотних порушень. В якості зворотних порушень можна вважати шум при телефонній розмові. До незворотних порушень відносяться збої в роботі системи релейного захисту, що призводять до відключення навантаження.

1 ОСНОВНІ ТЕРМІНИ І ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ

1.1 Електромагнітна сумісність технічних засобів – це спроможність технічного пристрою функціонувати із заданою якістю в даній електромагнітній обстановці і не створювати неприпустимих електромагнітних завад іншим технічним засобам.

1.2 Електромагнітна обстановка – це сукупність електромагнітних явищ, процесів у даній ділянці, частотному та часовому діапазонах.

1.3 Електромагнітна завада – електромагнітне явище або процес, які можуть погіршити якість функціонування технічного засобу.

1.4 Допустима завада – електромагнітна завада, при дії якої якість функціонування технічного засобу зберігається на заданому рівні.

1.5 Вплив завади – зниження показників функціонування технічного засобу під дією електромагнітної завади.

1.6 Рівень завади – величина електромагнітної завади, виміряна в регламентованих умовах.

1.7 Норма на заваду – регламентований максимально допустимий рівень завади.

1.8 Джерело завади – джерело штучного або природного походження, що створюють електромагнітну заваду.

1.9 Рецептор – технічний засіб, який реагує на електромагнітний сигнал.

1.10 Електромагнітна емісія – це генерування джерелом завад електромагнітної енергії.

1.11 Рівень емісії – величина електромагнітної завади, виміряної в регламентованих умовах.

1.12 Електромагнітне випромінювання – процес випромінювання електромагнітних хвиль джерелом в простір.

1.13 Рівень випромінювання – рівень електричного або магнітного поля або щільності потоку потужності, що його випромінює технічний пристрій, який виміряний в регламентованих умовах.

1.14 Електромагнітна кондукція – явище або процес, при якому завада розповсюджується від джерела кондуктивним шляхом в провідному середовищі.

1.15 Зона впливу – ділянка простору, в межах якої рівень електромагнітної завади перевищує допустимий.

1.16 Поріг чутливості – мінімальна величина електромагнітної завади, на яку реагує рецептор.

1.17 Завадозахищеність – спроможність послаблювати вплив електромагнітної завади за допомогою засобів захисту від завад.

1.18 Електростатична завада – завада обумовлена електризацією у вигляді імпульсних струмів накопичених електростатичних розрядів.

1.19 Кондуктивна завада – електромагнітна завада, що розповсюджується по проводах.

1.20 Комутаційна завада – індустріальна завада, яка виникає при комутаціях струму та напруги.

1.21 Контактна завада – електромагнітна завада обумовлена випромінюванням струмопровідних контактів і середовища з нелінійною провідністю при дії на них електромагнітного поля.

1.22 Індустріальна завада – електромагнітна завада, створювана технічними засобами.

1.23 Аналізатор завад – прилад, що містить систему часової селекції.

1.24 Вимірювач завад – селективний мікровольтметр з регламентованою величиною відношення синусоїдальної напруги до спектральної щільності напруги імпульсів на вході, що призводить до однакового показника вимірювального приладу, який містить інерційні детектори.

2 ВІДНОСНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА РІВНІ ЗАВАД

Для кількісної оцінки електромагнітної сумісності застосовують логарифмічні масштаби, які дозволяють наглядно показати співвідношення величин, що відрізняються на декілька порядків. Є два види логарифмічних співвідношень – рівень і ступень передачі.

Рівень визначає відношення величини до базового значення. Ступень передачі визначає відношення вхідних і вихідних величин системи та є характеристикою її трансляційних (передаточних) властивостей.

2.1 Логарифмічні відносні характеристики. Рівні завад

За допомогою десятичного логарифму визначають рівні завад, які вимірюються в децибелах:

- напруга: $u_{\text{дБ}} = 20 \lg (u_x / u_o)$, де $u_o = 1 \text{ мкВ}$;
- струм: $i_{\text{дБ}} = 20 \lg (i_x / i_o)$, де $i_o = 1 \text{ мкА}$;
- напруженість електричного поля: $E_{\text{дБ}} = 20 \lg (E_x / E_o)$, де $E_o = 1 \text{ мкВ/м}$;
- напруженість магнітного поля: $H_{\text{дБ}} = 20 \lg (H_x / H_o)$, де $H_o = 1 \text{ мкА/м}$;
- потужність: $P_{\text{дБ}} = 20 \lg (P_x / P_o)$, де $P_o = 1 \text{ мкА/м}$.

У цих співвідношеннях введений множник 20, який забезпечує простий вираз потужності у відносних логарифмічних одиницях.

Знайдемо вираз $P_{\text{дБ}}$ через $u_{\text{дБ}}$ і $i_{\text{дБ}}$: $u_{\text{дБ}} = 20 \lg (u_x / u_o)$, звідки $u_x = u_o \cdot 10^{u_{\text{дБ}} / 20}$. Аналогічно: $i_x = i_o \cdot 10^{i_{\text{дБ}} / 20}$.

Окрім десятичних використовують також натуральні логарифми – при цьому рівень завад вимірюється в неперах.

- напруга: $u_{\text{Нп}} = \ln (u_x / u_o)$, де $u_o = 1 \text{ мкВ}$;
- струм: $i_{\text{Нп}} = \ln (i_x / i_o)$, де $i_o = 1 \text{ мкА}$;
- напруженість електричного поля: $E_{\text{Нп}} = \ln (E_x / E_o)$, де $E_o = 1 \text{ мкВ/м}$;
- напруженість магнітного поля: $H_{\text{Нп}} = \ln (H_x / H_o)$, де $H_o = 1 \text{ мкА/м}$;
- потужність: $P_{\text{Нп}} = 0,5 \ln (P_x / P_o)$, де $P_o = 1 \text{ пВт}$.

Між децибелом і непером існує співвідношення: $1 \text{ дБ} = 0,115 \text{ Нп}$.

Значення дБ, які часто використовують, та відповідні їй відношення, що стоять під знаком логарифму:

$$10:1 = 20 \text{ дБ}; \quad 100:1 = 40 \text{ дБ}; \quad 1000:1 = 60 \text{ дБ}; \quad 10000:1 = 80 \text{ дБ}.$$

Таким чином, рівень завад збільшується на одну і ту величину з кожним наступним порядком.

Поняття «придушення» завад слугує для характеристик захисної дії засобів захисту від завад. Ступінь придушення завад залежить від їх частоти. В якості однієї кількісної характеристики ступені придушення завад на тій чи іншій частоті служить логарифм відношення напруги на вході U_1 та виході U_2 фільтра, який називається коефіцієнтом затухання a_ϕ , або коефіцієнтом екранування a_ϵ поля в точках простору перед екраном – H_o та за ним – $H_{\text{ет}}$.

2.2 Основні типи та діапазони електромагнітних завад

Вузькосмугові та широкосмугові процеси.

Завади, які створюються джерелами (напруг, струмів, електричних і магнітних полів), можуть виникати як у вигляді періодично повторюваних,

так і у випадково зосереджених в часі величин. В обох випадках мова йде про вузькосмугові, або і широкосмугові процеси.

Процес називається вузькосмуговим, якщо енергія спектру зосереджена у відносно вузькій полосі частот біля деякої фіксованої частоти ω_0 , або широкосмуговим, – якщо вказана умова не виконується.

При систематизації, в першому наближенні, незважаючи на безкінечну кількість варіантів, розрізняють чотири типи завад. Характерні приклади наведені на рисунку 2.1.

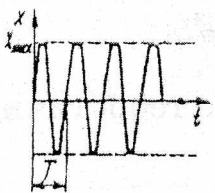
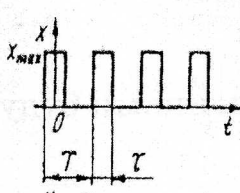
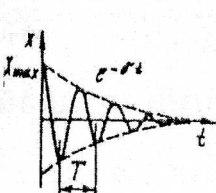
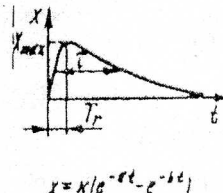
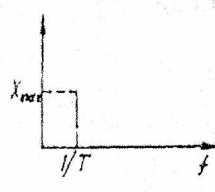
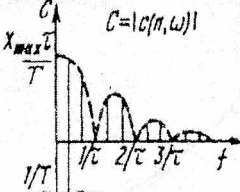
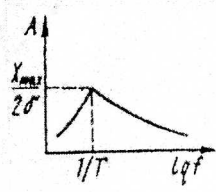
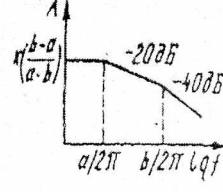
Періодичні завади		Неперіодичні, випадкові завади	
Вузькосмугові	Широкосмугові	Вузькосмугові	Широкосмугові
Часова ділянка зміни завад в часі			
			
$x = X_{max} \sin \omega_p t$ $\omega_p = 2\pi/T$	$y = \frac{X_{max}\tau}{T} \sum_{n=1}^{\infty} c(n, \omega) \cos(n\omega t)$ $\omega_p = 2\pi/T$	$x = X_{max} e^{-\sigma t} \cos \omega_p t$ $\omega_p = 2\pi/T$	$x = K(a e^{-\sigma t} - e^{-b t})$ $K = f_1(X_{max}, T_r, \tau)$ $a = f_2(T_r, \tau)$ $b = f_3(T_r, \tau)$
Частотна ділянка, амплітудні спектри			
			
C – амплітудний спектр		A – спектр амплітудної щільності	

Рисунок 2.1 – Типи електромагнітних завад

Виокремлюють такі типи завад:

– синусоїдальна, – постійно діюча періодична завада частотою 50 Гц, яка проникає із системи живлення, або височастотна несуча хвиля. Ця завада має спектральну щільність, яка характеризується двома лініями виду

$$X(\omega) = X_{max} (\delta(\omega - \omega_0) + \delta(\omega + \omega_0)) \quad (2.1)$$

і становить вузькосмуговий процес;

– послідовність прямокутних імпульсів, яка може виражатися у формі ряду Фур'є, і є прикладом широкосмугового процесу з дискретним спектром;

- періодичні одноразові затухаючі імпульси, що виникають в системі електрозабезпечення та являють собою вузькосмуговий процес;
- імпульси, утворені двома експонентами (наприклад, атмосферні або електростатичні розряди) і є широкосмуговим процесом.

2.3 Синфазні та протифазні завади

Синфазні напруги завад виникають між кожним проводом і землею (u_{c1} , u_{c2} , (рис. 2.2)) і діють на ізоляцію проводів відносно землі. Синфазні завади обумовлені в основному різницею потенціалів в ланцюгах заземлення пристрою, та при аварійних замикань високовольтних ліній на землю робочими, або струмами блискавки.

Протифазні напруги завад u_d (рис. 2.2) виникають між проводами двохпроводної лінії. Протифазні завади виникають через гальванічні або польові зв'язки, або ж перетворюються із синфазних завад в системах. Протифазні напруги завад накладаються на корисні сигнали в сигнальних ланцюгах, або на напругу живлення в мережах електрозабезпечення та можуть бути прийняті як корисні сигнали в пристроях автоматизації і спровокувати збій в роботі системи.

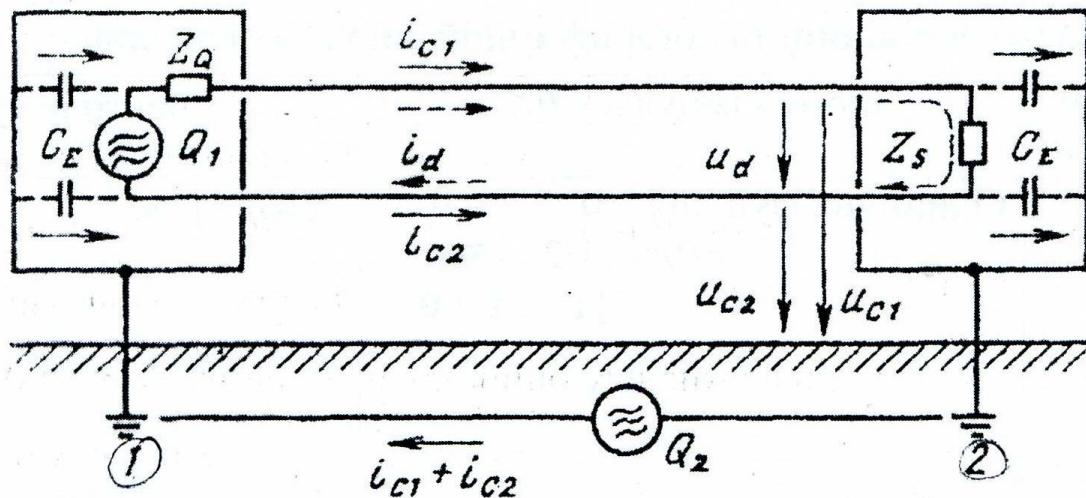


Рисунок 2.2 – Завади, пов'язані з передачею сигналів по проводам:
 C_E – паразитні ємності відносно заземленого корпусу; Q_1 – джерело протифазних завад; Q_2 – джерело синфазних завад;

i_{c1} , i_{c2} – синфазні струми;

i_d – протифазний струм; u_{c1} , u_{c2} – синфазні напруги завад; u_d – протифазна напруга завад; $Z_{Q,S}$ – повні опори джерела і приймача завад

2.4 Поняття « земля і маса »

Необхідно чітко розділяти поняття заземлення – для захисту персоналу від неприпустимо високих напруг на корпусах обладнання при пробі ізоляції та маси – системи опорного потенціалу електричних контурів. Земля і маса, звичайно в одній точці гальванічно з'єднані, але вони відрізняються тим, що проводи заземлення проводять струм тільки при аварії, а «нульові проводи» – в нормальній робочій ситуації і часто представляють собою загальний зворотній провід декількох сигнальних контурів, що ведуть до джерела.

Таким чином вони характеризуються такими поняттями:

Земля	Маса
Заземлення	Маса схеми
Захисний провід	Нейтральний провід
Заземлений корпус	Нульова точка
Захисне заземлення	Сигнальна маса

Отже, захисний заземлюючий провід в нормальному режимі струму не проводить і його потенціал дорівнює потенціалу землі.

По нейтральному проводу в нормальному режимі протікає зворотній струм електроприймачів і його потенціал, внаслідок падіння напруги на його опорі, відрізняється від потенціалу землі (рис. 2.3).

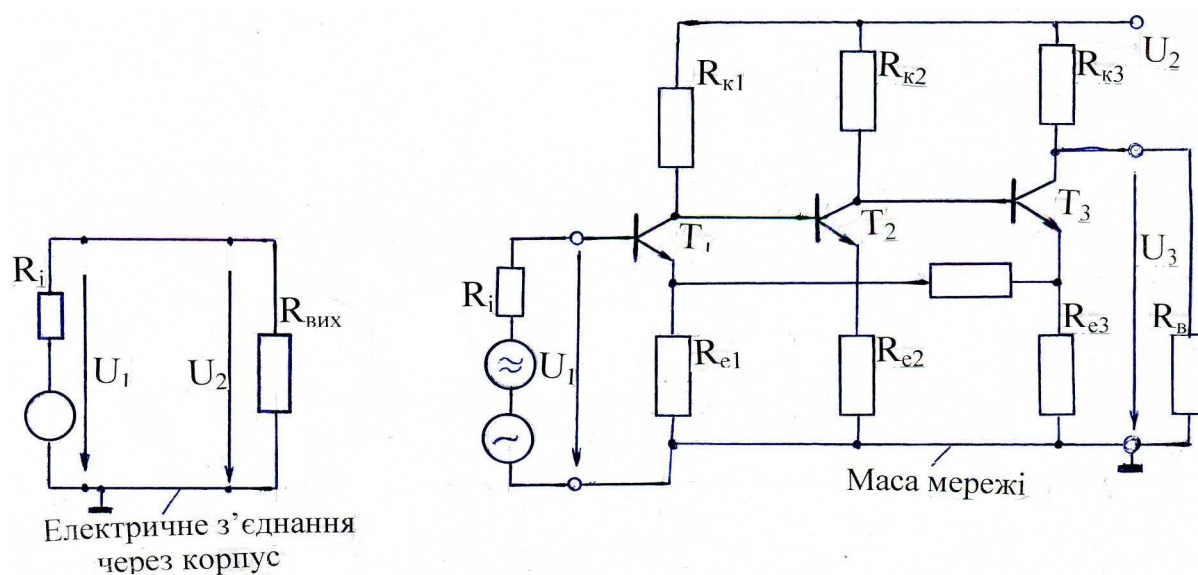


Рисунок 2.3 – Поняття «маси» електричного контуру

2.5 Типи й основні параметри завод

Завади можуть бути описані як в часовому, так в частотному вимірах. Для періодичних завод основними параметрами є частота (f) і

амплітуда (X). Ці параметри визначають амплітуду напруги завади у вторинних контурах (U_{max}) (рис. 2.4).

Для неперіодичних завад основними параметрами є :

- швидкість зміни ($\Delta x / \Delta t$) (швидкість наростання або спаду), що визначає максимальну напругу завади (U_{smax}) у вторинному ланцюгу;
- інтервал часу (Δt), на протязі якого завада X має максимальну швидкість зміни амплітуди;
- максимальне значення зміни амплітуди (Δx), пропорційне інтегралу напруги завади у вторинному ланцюгу по часу (площа імпульсу завади).

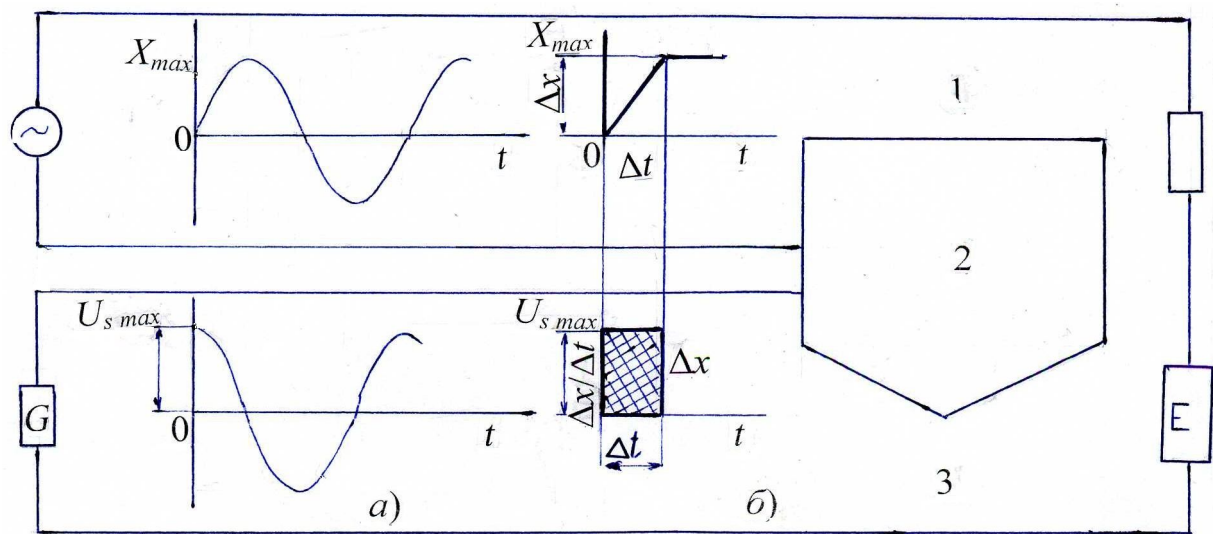


Рисунок 2.4 – Параметри періодичних (а) і неперіодичних перехідних (б) завад: E – приймач сигналів; G – джерело сигналів; x – завада; u_s – напруга завади; 1 – впливаючий контур; 2 – гальванічний, ємнісний або індуктивний зв'язок; 3 – контур, на який йде вплив

При періодичних завадах використовують поняття амплітудний спектр, а при імпульсних – спектр амплітудної щільності. Ці представлення забезпечують:

- оцінку впливу завади на систему;
- розрахунок впливу, обумовлений заданим зв'язком;
- вибір параметрів засобів придушення завад (наприклад, фільтрів);
- визначення граничних меж (максимально можливого або допустимого випромінювання завад або границь завадостійкості);
- отримання уяви про вплив завад при випробуваннях згідно норм ЕМС.

Передавальні властивості шляхів зв'язку та засобів придушення завад зручно представляти в частотному вигляді, тоді таке представлення

використовують і для опису завад. Перерахунок періодичних процесів із часової форми в частотну здійснюють за допомогою ряду Фур'є, а перерахунок однократних імпульсних процесів – за допомогою інтеграла Фур'є.

3 КЛАСИФІКАЦІЯ ДЖЕРЕЛ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЗАВАД

3.1 Опис періодичних завад у частотній та часовій формі

Синусоїдальні та косинусоїдальні завади можуть бути представлені як в часовому, так і частотному вигляді (рис. 3.1). В частотному вигляді завада характеризується кутовою частотою ω і частотою коливань $f = \omega / 2\pi$.

Несинусоїдальні періодичні функції (пилкоподібні, або прямокутної форми імпульси струму або напруги) можуть бути представлені в частотному вигляді – як нескінченної суми синусоїдальних і косинусоїдальних коливань – тобто рядом Фур'є.

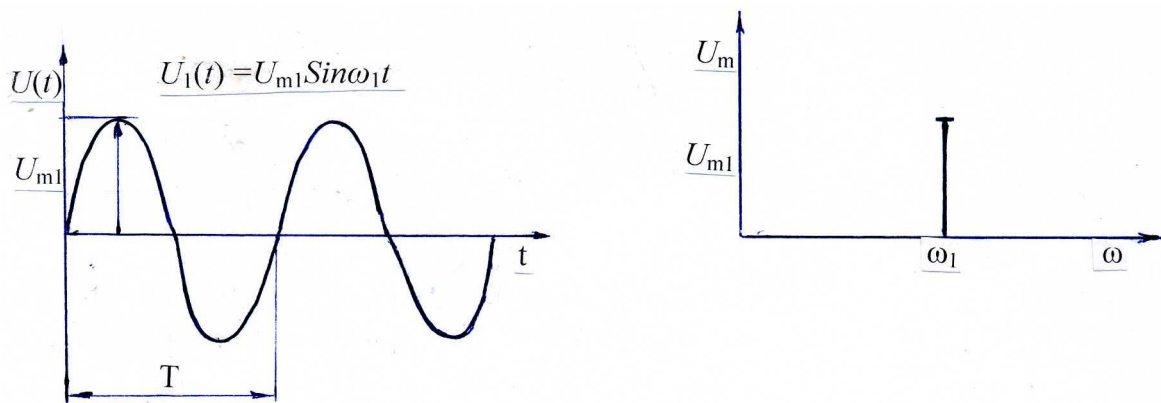


Рисунок 3.1 – Представлення синусоїдальної завади у часовій та частотній формі

Несиметричну напругу прямокутної форми можна представити у вигляді накладання основного коливання u основної частоти $f = 1/T$ і нескінченної кількості гармонічних коливань u_n з частотами nf_1 . Залежність амплітуд окремих коливань від частоти являє собою дискретний лінійчастий спектр (рис. 3.2). Найменша з частот спектра – це основна частота, а інші частоти – кратні основній частоті (напр. $f_3 = 3 f_{(1)}$).

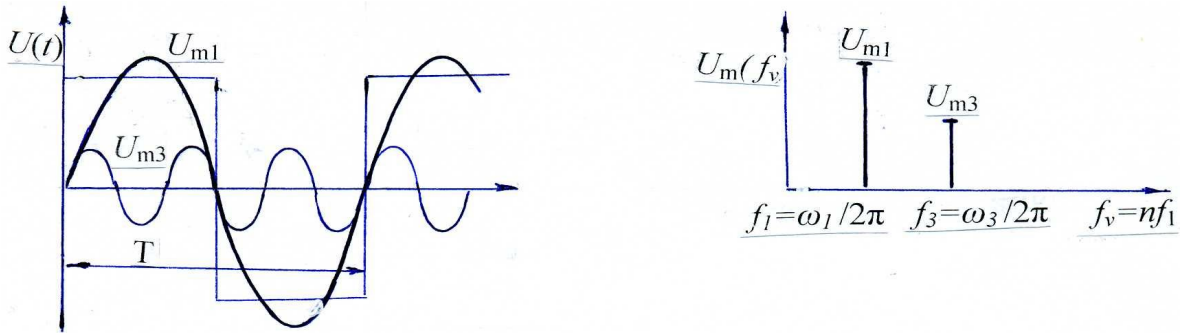


Рисунок 3.2 – Представлення періодичної несинусоїдальної функції

Аналітично ряд Фур'є функції часу може бути записаний в різних формах

$$\text{Нормальна: } u(t) = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (U'_n \cos n\omega t + U''_n \sin n\omega t), \quad (3.1)$$

$$\text{де } U'_n = 2/T \int_0^T u(t) \cos(n\omega_1 t) dt, \quad U''_n = 2/T \int_0^T u(t) \sin(n\omega_1 t) dt, \quad U_0 = 1/T \int_0^T u(t) dt.; \quad (3.2)$$

U'_n , U''_n – амплітуди окремих коливань, а U_0 – відповідає середньому арифметичному функції часу (стала складова).

Амплітудно-фазова. Оскільки синусоїдальні коливання можна представити і як косинусні ($\sin(90^\circ \pm \alpha) = \cos \alpha$), то замість нормальної форми застосовують і амплітудно-фазову

$$u(t) = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} U_n \cos(n\omega_1 t + \varphi_n), \quad (3.3)$$

$$\text{де } U_n = \sqrt{U_n'^2 + U_n''^2}; \quad \varphi_n = -\arctan(U_n''/U_n').$$

Комплексна.

Доповнюючи ці рівняння уявною частиною і замінюючи тригонометричні функції за формулою Ейлера: $\cos x + j \sin x = e^{jx}$ експоненціальними функціями, отримаємо рівняння в комплексній формі

$$u(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \dot{C}_n e^{jn\omega_1 t} = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (\dot{C}_{+n} + \dot{C}_{-n} e^{-jn\omega_1 t}), \quad (3.4)$$

$$\text{де } \dot{C}_n (\pm n\omega_1) = 1/T \int_0^T u(t) e^{-jn\omega_1 t} dt = |\dot{C}_n| e^{j\varphi_n} = C_n e^{j\varphi_n}, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Оскільки функція $u(t)$ будучи представлена комплексним рядом Фур'є (3.4), залишається дійсною, то у правій частини вводять від'ємні частоти, що призводить до двохстороннього спектра (рис. 3.3), тоді:

$$|C_{+n}| = |C_{-n}| = U_n, \quad C_0 = U_0. \quad (3.5)$$

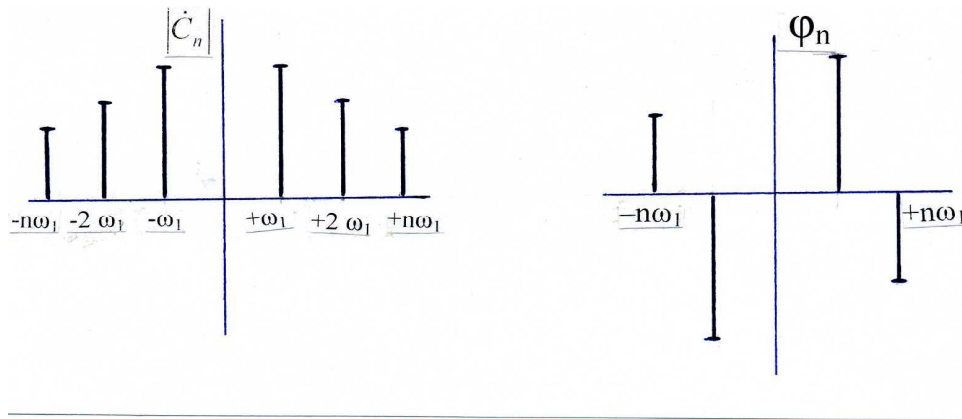


Рисунок 3.3 – Амплітудний і фазовий спектр комплексного ряду Фур'є

На практиці замість двохстороннього спектра $\dot{C}_n = f(\pm n \omega_1)$, розраховують односторонній спектр тільки для позитивних n , амплітуди яких відрізняються на 2 від амплітуд двохстороннього спектра $2|\dot{C}_n| = f(\pm n \omega_1)$. Амплітуди вищих гармонік з'являються з однаковим інтервалом:

$\Delta f = f_1 = 1/T$, а їх частоти кратні основній частоті $f_1 = n f_1$.

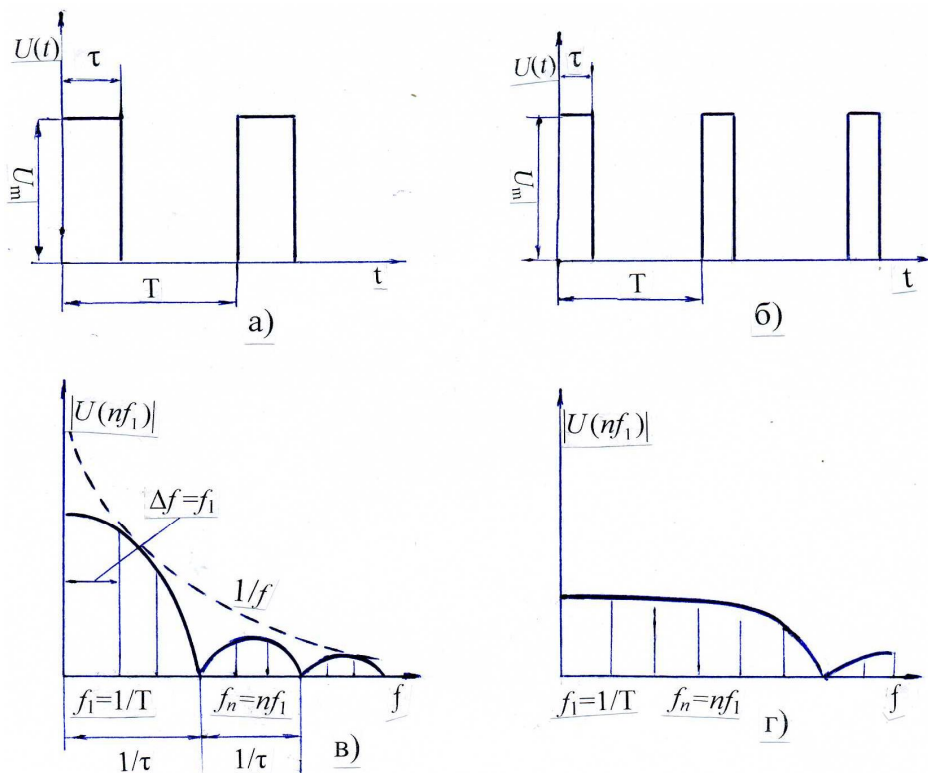


Рисунок 3.4 – а – лінійчаті спектри двох періодичних прямокутних імпульсів із скважністю (1: 2); б – функція $Si(x)$, – огинаюча спектральних амплітуд (суцільна лінія); функція $1/f$ – огинаюча функції $Si(x)$ (пунктирна крива)

Ряд Фур'є для послідовності прямокутних імпульсів має вигляд

$$U(t) = U_m \frac{\tau}{T} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{T}{2n\pi\tau} \left(\sin \frac{2n\pi\tau}{T} \cos n\omega_1 t + (1 - \cos \frac{2n\pi\tau}{T}) \right) \sin n\omega_1 t \right]. \quad (3.6)$$

Коефіцієнти (спектральні амплітуди) визначаються за формулою

$$U_n = 2U_m \frac{\tau}{T} \frac{\sin(n\pi\tau/T)}{(n\pi\tau/T)} \quad (3.7)$$

Огинаюча спектральних амплітуд відповідає функції $Si(x) = \sin(x)/x$.

3.2 Представлення неперіодичних функцій часу у частотній формі

До неперіодичних процесів відносять комутаційний (блискавка або розряд статичної електрики). Для визначення спектру неперіодичної імпульсної функції зробимо граничний перехід за допомогою комплексної форми запису ряду Фур'є для періодичних функцій в межах інтегрування: $-T/2$ і $+T/2$

$$u(t)_{\text{пер}} = \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} C_n e^{jn\omega_1 t} = \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \left[\frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} u(t) e^{-jn\omega_1 t} dt \right] e^{jn\omega_1 t}. \quad (3.8)$$

Оскільки в лінійчастому спектрі ряду Фур'є відстань між спектральними лініями $\Delta f = \Delta\omega/2\pi = f_1 = 1/T$, то можемо записати

$$u(t)_{\text{пер}} = \frac{1}{2\pi} \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \left[\Delta\omega \int_{-T/2}^{+T/2} u(t) e^{-jn\omega_1 t} dt \right] e^{jn\omega_1 t}. \quad (3.9)$$

Далі виконуємо граничний перехід при $T \rightarrow \infty$, $\Delta\omega \rightarrow 0$, при якому відстань між спектральними лініями $\Delta\omega$ за знаком суми стає нескінченно малою $d\omega$, дискретна змінна $n\Delta\omega$ переходить в безперервну змінну ω , а сума – в інтеграл. Отже, отримуємо інтеграл Фур'є для неперіодичної функції

$$u(t)_{\text{непер}} = \lim u(t)_{\text{пер}} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\int_{-\infty}^{+\infty} u(t) e^{j\omega t} dt \right) e^{-j\omega t} d\omega. \quad (3.10)$$

Вираз під інтегралом $\dot{X}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} u(t) e^{-j\omega t} dt$ є перетворенням Фур'є функції $u(t)$, яка називають спектральною щільністю $u(t)$.

Для неперіодичній функції $u(t)$ зворотне перетворення Фур'є має вигляд

$$u(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \dot{X}(\omega) e^{j\omega t} d\omega . \quad (3.11)$$

Таким чином, перетворення Фур'є та його обернення – взаємозворотні з точністю до множника $1/2\pi$.

Оскільки спектральна функція $\dot{X}(\omega)$ ідентична лінійчатому спектру \dot{C}_n , віднесеному до відстані між сусідніми частотами : $T = 1/\Delta f = 2\pi/\Delta\omega$, – тому вона отримала назву спектральної щільності.

$$\dot{C}_n = \Delta f \int_{-T/2}^{+T/2} u(t) e^{-j\omega_n t} dt . \quad (3.12)$$

Спектральну щільність отримаємо, якщо віднести амплітуди \dot{C}_n до Δf і утворити граничне значення для $T \rightarrow \infty$ (відповідно $\Delta f \rightarrow 0$), отримаємо.

$$\lim_{\Delta\omega} \frac{\dot{C}_n}{\Delta\omega} = \int_{-\infty}^{+\infty} u(t) e^{j\omega t} dt = \dot{X}(\omega) , \quad (3.14)$$

– тобто спектральну щільність.

Якщо лінійчастий спектр \dot{C}_n вимірюється у вольт-секундах, то спектральна щільність $\dot{X}(\omega)$ порівняного однократного процесу вимірюється в В/Гц. Неперіодичні процеси також можуть бути представлені як накладання синусоїдальних або косинусоїдальних коливань, але в цьому випадку тут присутні усі частоти від $-\infty$ до $+\infty$.

Відношення енергії імпульсу до частоти дає спектральну щільність, граничне значення якої при $\Delta f \rightarrow \infty$ відповідає перетворенню Фур'є.

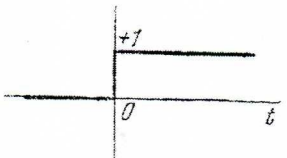


Таблиця 3.1 – Діапазони значень параметрів електромагнітних завад

Параметр	Позначення	Величина
Частота, Гц	f	$0-10^{10}$
Максимальна напруга, В	U_{max}	$10^{-6}-10^6$
Швидкість зміни напруги, В/с	du/dt	$0-10^{12}$
Напруженість електричного поля, В/м	E	$0-10^5$
Максимальна величина струму, А	I_{max}	$10^{-9}-10^5$
Швидкість зміни струму, А/с	di/dt	$0-10^{11}$
Напруженість магнітного поля, А/м	H	$10^{-6}-10^8$
Час наростання імпульсу, с	T_r	$10^{-9}-10^{-2}$
Тривалість імпульсу, с	τ	$10^{-8}-10$
Енергія імпульсу, Дж	W	$10^{-9}-10^7$

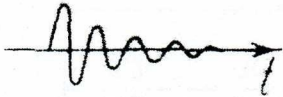
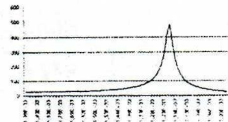
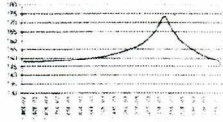
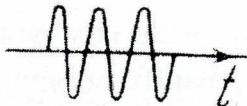
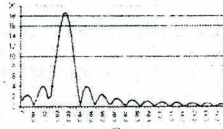
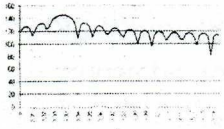
3.3 Спектри періодичних і імпульсних процесів

В таблиці 3.2 приведені «фізичні» спектральні щільності $2|\dot{X}(\omega)|$ деяких імпульсних процесів та графіки «фізичних» спектральних щільностей в лінійній та логарифмічній системі координат.

Таблиця 3.2 – Спектральні щільності деяких характерних процесів

№ п.п.	Форма імпульсу $f(t)$	Спектр імпульсу $2 \dot{X}(\omega) $	
1	<p>Одинична функція $\begin{cases} 0 & t < 0 \\ \sigma(t) = \begin{cases} 1/2 & t = 0 \\ 1 & t > 0 \end{cases} \end{cases}$</p> 	$ \dot{X}(\omega) = 1/j\omega,$ Рівень(В/Гц)	$2 \dot{X}(\omega) = 2/\omega$ Рівень(ДБ)
2	<p>Одинична імпульсна функція $\begin{cases} 0 & t < 0 \\ \delta(t) = \begin{cases} \infty & t = 0 \\ 0 & t > 0 \end{cases} \end{cases}$ $\int_0^\infty \delta(t) dt = 1$</p>	$\dot{X}(\omega) = 1$ Рівень(В/Гц)	$2 \dot{X}(\omega) = 2$ Рівень(ДБ)
3	<p>Прямокутний імпульс $u(t) = h(\sigma(t + \tau/2) - \sigma(t - \tau/2))$</p>  <p>$h = 1; \quad \tau = 0,628$</p>	$\dot{X}(\omega) = 2h \frac{\sin(\omega\tau/2)}{\omega}$ $2 \dot{X}(\omega) = 4h \left \frac{\sin(\omega\tau/2)}{\omega} \right $ Рівень(В/Гц)	Рівень(ДБ)
4	<p>Експоненційний імпульс $u(t) = e^{\beta t} \sigma(t)$ $\beta = -1$</p> 	$\dot{X}(\omega) = 1./(\beta + j\omega)$ $2 \dot{X}(\omega) = 2 \sqrt{\frac{1}{\beta^2 + \omega^2}}$ Рівень(В/Гц)	Рівень(ДБ)

Закінчення таблиці 3.2

5	<p>Затухаюча синусоїда $u(t) = e^{-\alpha t} \sin(\omega_1 t) \sigma(t)$ $\alpha = 0,04; \quad \omega_1 = 0,0314$</p> 	$\dot{X}(\omega) = \omega_1 / (\alpha^2 - \omega^2 + \omega_1^2 + 2j\alpha\omega)$ $2 \dot{X}(\omega) = 2\omega_1 \sqrt{\frac{1}{(\alpha^2 - \omega^2 + \omega_1^2)^2 + 4\alpha^2\omega^2}}$ <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>Рівень(В/Гц)</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>Рівень(ДБ)</p>  </div> </div>
6	<p>Імпульс в формі відрізка синусоїди $u(t) = (\sigma(t+nT/2) - \sigma(t-nT/2)) \sin \omega_0 t$ $n=3; \quad \omega_0 = 0,0314$</p> 	$\dot{X}(\omega) = (1)^n \frac{2j\omega_0}{\omega_0^2 - \omega^2} \sin n\pi \frac{\omega}{\omega_0}$ $2 \dot{X}(\omega) = 2 \left (-1)^n \frac{2j\omega_0}{\omega_0^2 - \omega^2} \sin n\pi \frac{\omega}{\omega_0} \right $ <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>Рівень(В/Гц)</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>Рівень(ДБ)</p>  </div> </div>

3.4 Шляхи передачі електромагнітних завад

Усі елементи технічних пристроїв розділяють на дві основні групи: нелінійні неінерційні і лінійні інерційні (динамічні). Будь-який елемент електротехнічного пристрою можна розглядати як нелінійний інерційний.

Лінійна інерційна система характеризується тим, що величина $y(t)$ отримується суперпозицією (складанням) усіх значень $x(t)$, кожне з яких помножується на ваговий коефіцієнт $h(t, \tau)$, який залежить, як від моменту прикладання процесу до входу, так і от моменту спостереження t процесу на виході системи. Якщо в процесі спостереження параметри системи залишаються незмінними, то значення вагового коефіцієнта $h(t, \tau)$ залежить лише від різниці $t - \tau$. Отже, значення процесу на виході системи $y(t)$ залежить від процесу на вході $x(t)$ таким чином

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t - \tau) x(\tau) d\tau. \quad (3.15)$$

Функція $h(t, \tau)$ – це імпульсна перехідна функція, яка є реакцією системи на її виході при дії на вході одиничної імпульсної функції $\delta(t)$.

При аналізі лінійної інерційної системи в частотному діапазоні використовують передаточну функцію $\dot{k}(\omega)$, яка являє собою перетворення Фур'є від $h(t, \tau)$

$$\dot{k}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(u) e^{-j\omega u} du, \quad (3.16)$$

де $u = t - \tau$.

Імпульсна перехідна функція лінійної системи з постійними параметрами зв'язана з передаточною функцією зворотним перетворенням Фур'є

$$h(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \dot{k}(\omega) e^{j\omega t} d\omega. \quad (3.17)$$

Модуль і аргумент передаточної функції $k(j\omega)$ називають частотною $|C(\omega)|$ і фазовою $\varphi(\omega)$ характеристиками лінійної системи

$$\dot{k}(\omega) = C(\omega) e^{j\varphi(\omega)} \quad (3.18)$$

Ширина полоси пропускання частотної характеристики визначається як ширина основи прямокутника, висота якого дорівнює максимальній ординаті $C^2(\omega_0)$, а площа – площі під кривою квадрату частотній характеристиці

$$\Delta_c = \frac{\int_0^{\infty} C^2(\omega) d\omega}{C^2(\omega_0)} \quad (3.19)$$

Якщо частотна характеристика має різко виражену ділянку резонансу близько до частоти ω_0 , і при цьому $\omega_0 \Delta$, то лінійну систему такої характеристики називають вузькосмуговою.

Спектральна щільність процесу на виході системи при відомій спектральній щільності на вході визначиться за допомогою передаточної функції лінійної інерційної системи

$$\dot{X}_2(\omega) = \dot{k}(\omega)' \dot{X}_1(\omega) \quad (3.19)$$

Якщо перемножити спектральну щільність на вході джерела завад $\dot{X}_d(\omega)$ з передаточною функцією каналу передачі $\dot{k}_{\kappa\pi}$ і передаточною

функцією приймача завади \dot{k}_{np} , то отримаємо спектральну щільність завади в приймачеві

$$\dot{X}_{np}(\omega) = \dot{X}_d(\omega) \dot{k}_{kn}(\omega) \dot{k}_{np}(\omega). \quad (3.20)$$

Оскільки в логарифмічному масштабі множення відповідає складанню, то при складанні кривої щільності розподілу амплітуд вхідної завади з амплітудно-частотною характеристикою каналу передачі (наприклад, з кривою затухання фільтра), то отримаємо графік щільності розподілу амплітуд завади після фільтра. Отже, вимірювання спектру завад дає змогу розрахувати відповідні параметри фільтрів, екранів та ін.

4 ДЖЕРЕЛА ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЗАВАД

Джерела завад поділяються на функціональні і не функціональні. Функціональні – це, насамперед, радіо- і телепередавачі, генератори ВЧ коливань, промислові і медичні мікрохвильові печі, радіокеруючі пристрої.

Не функціональні – це розрядні лампи, електричний транспорт, комутаційні процеси в лініях ВН, контактні та безконтактні перемикачі, атмосферні та коронні розряди, розряди статичної електрики, використання потужних імпульсів в технологічних процесах та ін.

Досягнення ЕМС функціональних джерел завад закладено в їх конструкції, в той час, як для не функціональних джерел – ця проблема набагато складніша.

Основною задачею є, насамперед, виявлення джерел завад та визначення їх параметрів і механізмів зв'язків, що дозволить забезпечити електромагнітну сумісність.

4.1 Класифікація джерел електромагнітних завад

Джерела електромагнітних завад класифікуються по їх спектру випромінювання – на вузько – та широкосмугові. Для кількісної оцінки визначення цих спектрів вводять поняття енергетичного спектра імпульсного або періодичного процесу.

Для імпульсного процесу енергетичний спектр визначається

$$F(\omega) = \frac{2}{T} |\dot{X}(\omega)|^2 \quad (T - \text{тривалість імпульсу}) \quad (4.1.)$$

Для періодичного процесу

$$F(\omega) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\varepsilon}{2} |\dot{C}_n|^2 \delta(\omega - n\omega_0), \quad (4.2)$$

де $\varepsilon = 2$ при $n = 0$ і $\varepsilon = 1$ при $n > 1$.

Якщо енергетичний спектр має максимум $F(\omega_o)$ при частоті ω_o – тоді шириною полоси енергетичного спектру називають площу під кривою спектра, віднесеною до величини енергетичного спектра на частоті ω_o :

$$\Delta_{\Pi} = \frac{1}{2\pi F(\omega_o)} \int_0^{\infty} F(\omega) d\omega. \quad (4.3)$$

Це можна трактувати як ширину рівномірного в смузі Δ_{Π} енергетичного спектра процесу, еквівалентного даному по середній потужності.

Тоді умова вузькосмуговості процесу визначається кількісно, як $\omega_o \gg \Delta_{\Pi}$.

Широкосмугові завади мають спектр з щільно розташованими спектральними лініями (безперервний спектр). Джерела широкосмугових завад поділяють на джерела шумових і перехідних завад.

Шумові завади складаються з багатьох щільно розташованих імпульсів різної амплітуди, які неможливо розділити (рис. 4.1).

Перехідні завади чітко відрізняються одна від одної, мало повторюються і мають вигляд імпульсів.

Широкосмугові сигнали розрізняються і по когерентності. При когерентних широкосмугових сигналах реакція приймача пропорційна ширині його смуги, в той час для некогерентних сигналів, спектральні складові яких співвідносяться довільно, реакція приймача пропорційна квадратному кореневі ширини його смуги.

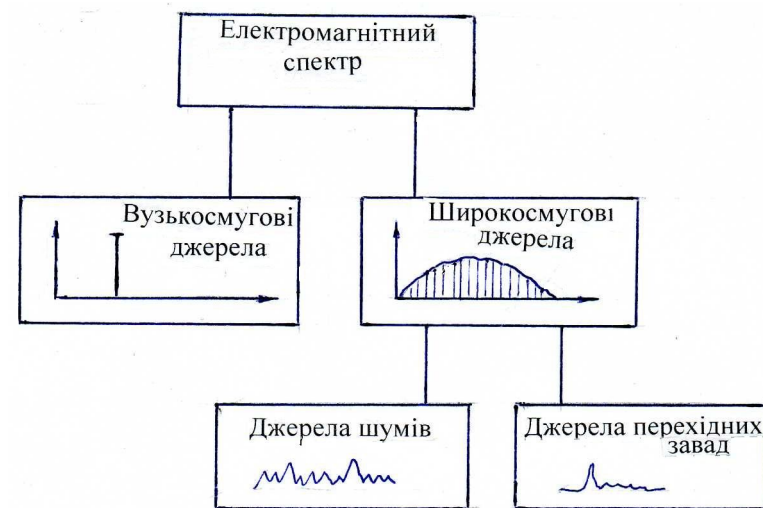


Рисунок 4.1 – Розподіл передавачів на вузько смугові та широкосмугові

4.2 Джерела вузькосмугових завад

Вузькосмугові завади є зазвичай штучно створеними – це, наприклад, радіопередавачі, які на відповідних частотах випромінюють

великі потужності. Вони випромінюють вищі гармоніки завдяки нелінійності елементів передавачів, (медичні і промислові ВЧ генератори, або просто мережа частотою 50 Гц). Такі джерела характеризуються амплітудою або діючою величиною завади на відповідній частоті.

Передавачі зв'язку генерують електромагнітну енергію з метою передачі або отримання інформації і випромінюють її в навколишній простір. Передавачі зв'язку поділяють на п'ять груп (рис. 4.2).

Дозволені потужності передач на відповідних частотах встановлені в залежності від регіонального розташування та часу направленості передач за погодженням з Міжнародною телекомунікаційною спілкою (ITU). У передавачів, що працюють на однаковій частоті, ЕМС досягається просторовим віддаленням або обмеженням радіусу дії. При вводі в дію нового передавача необхідний дозвіл влади, виданий на основі перевірки та доказу про його ЕМС. Випромінювання передавачів зв'язку зазвичай вузько смугові і часто містять несучу частоту, бокові смуги а також гармонічні і негармонічні вищі складові.

Діапазон роботи передавачів зв'язку – від декількох десятків Гц, до декількох сотен ГГц.

Комерческі передавачі	Радіотелефони	Направлений радіозв'язок	Навігація	Локатори
Радіо АМ	Автомобільні радіотелефони	Супутниковий радіозв'язок	Повітряне сполучення	Повітряне сполучення
Радіо ЧМ	Радіополіція	Наземні релейні станції	Судноплавство	Судноплавство
Телебачення ВЧ	Радіо СВ		Радіоточка	Транспортні локатори
Телебачення У КВ	Аматорські радіо-передавачі		LORAN	Контроль повітряного транспорту
	Виробничі радіотелефони			

Рисунок 4.2 –Класифікація передавачів зв'язку

Генератори високої частоти. В промисловості, медицині, домашньому господарстві та науці використовують значну кількість ВЧ генераторів великої та середньої потужності для індукційного нагріву, плавлення, електротерапії, прискорення елементарних часток (циклотрони, синхротрони) та ін.

Усі ці прилади виробляють високочастотну енергію для отримання локального електрофізичного ефекту, тому вони відносяться до групи функціональних передавачів.

Більшість ВЧ пристроїв функціонують на дозволених частотах в діапазоні від 1 до 200 МГц при достатньому екрануванні. Крім того, при наявності випромінювання, необхідно забезпечити ЕМС установки з середовищем знаходження людей.

Радіоприймачі. Комп'ютери. Комутаційні пристрої. Всі розглянуті прилади для виконання своїх функцій мають особисті генератори, які через вхідні і вихідні проводи, шасі і корпуси випромінюють електромагнітну енергію в зовнішнє середовище. Діапазон робочих частот – від сотні кГц до декілька десятків МГц.

В радіо- та телеприймачах частоту вхідного ВЧ сигналу змішують з частотою гетеродіну, утворюючи проміжну частоту, внаслідок чого випромінюється як частота гетеродина, так і постійна проміжна частота разом з вищими гармоніками. Проміжна частота при амплітудній модуляції складає 455 кГц, при частотній модуляції 10,7 МГц.

Комп'ютери випромінюють завади від таймера центрального процесора, а також периферійних приладів (принтери, термінали).

Комутаційні пристрої генерують завади при частотах, більших за 16 кГц в результаті випромінювання як на основній частоті, так і гармоніках.

Випромінювання перелічених приладів не повинне перевищувати допустимі рівні радіоперешкод, згідно нормативних документів. Це досягається шляхом збільшення відстані та просторової орієнтації їх компонентів.

4.3 Вплив завад на мережі електропередач

Вплив на мережу проявляється у появі вищих гармонік напруги та її коливань за рахунок електричного обладнання з нелінійною вольт-амперною характеристикою. Трансформатори і електродвигуни з великим індуктивним навантаженням, вентильні перетворювачі струму, розрядні лампи, телеприймачі при синусоїдальному живленні мережі продукують не синусоїдальні струми, які на шляху до електрообладнання утворюють на повних опорах мережі не синусоїдальні падіння напруги. Падіння напруги, створювані струмами споживачів, призводять до викривлення синусоїдальної форми напруги мережі 50 Гц та до появи гармонік.

Субгармоніки, спричинені дуговими печами і електрозварювальними апаратами, призводять до періодичних і неперіодичних коливань напруги.

Вищі гармоніки та коливання напруги можуть призвести до пошкодження технічних пристроїв, електричним і термічним перевантаженням конденсаторів і електродвигунів, відмов у функціонуванні систем контролю, вимірювання, регулювання ліній

передачі даних і т.п. Це впливає також на психофізіологічний стан персоналу.

До впливу на мережі відносять також асиметрію, обумовлену ввімкненими між фазами однофазними споживачами (зварювальними апаратами, або дуговими електропечами).

Вплив ліній електрозабезпечення. Якщо повітряні ЛЕП ВН з частою 50 Гц і 16,66 Гц і лінії зв'язку телеуправління газовими мережами і нафтопроводами розташовані паралельно на протяжних ділянках, то внаслідок омичного, індуктивного та ємнісного зв'язку виникає шкідливий вплив на лінії передачі даних, а також пристрої катодного захисту від корозії трубопроводів. Вплив мережі може бути довготривалим, короткотривалим і імпульсним.

Довготривалий – це робочі струми при нормальній роботі лінії, струми заземлення в мережах з компенсованою нейтраллю, а також проводах ВН, що мають велику ємність відносно землі.

Джерелом короткотривалого впливу є струми КЗ і струми замикання двох фаз на землю тривалістю декілька десятих секунди.

Імпульсний вплив виникає при перенапругах і перемиканнях.

Проблеми впливу ліній вирішуються шляхом симетричного розташування проводів трифазної системи у вигляді рівностороннього трикутника, скручуванням несиметрично розташованих проводів, резонансним заземленням нейтралі (малі струми замикання фаз на землю) а також заземленням нейтралі мереж 220 і 380 кВ.

4.4 Джерела широкосмугових імпульсних завад

В містах спостерігається високий рівень широкосмугових завад, обумовлений міськими транспортними магістралями, системами запалювання автотранспорту, домашніх електроприладів, розрядних ламп, приладів цифрової техніки. В національних стандартах наведені рівні завад, які відрізняються на 20÷40 дБ, в залежності від виду транспорту та рівня загальної щільності руху.

Прикладом типових джерел широкосмугових завад є автомобільні пристрої запалювання, у яких при перериванні первинного струму $i_1(t)$ в котушці запалення виникає зміна струму $di_1(t)/dt$. При цьому у вторинній обмотці, за рахунок зміни магнітного потоку $d\Phi(t)$, індукується високовольтний імпульс $u_2(t)$, який призводить до швидкої зміни напруги на проводах запалення $u(t)/dt$. Струм зміщення $i_{зм} = C_{нар} du_2(t)/dt$ через паразитні ємності наводить в сусідніх контурах і провідниках напругу завади.

При розриві струму розподільвачем в ланцюгах запалення, завдяки розряду ємності вторинної обмотки, знову виникає швидка зміна напруги і

струму, яка за рахунок індукції і взаємного впливу створює завади. Типові щільності амплітуд завад по напруженості електричного поля поблизу міських вулиць знаходяться в межах -20 і $+20$ дБ (мкВ/м/кГц). Частоти завад досягають гігагерцового діапазону.

Іншим широко розповсюдженим джерелом імпульсних завад є розрядні лампи, які запалюються за допомогою спеціального пуско-регулюючого апарату (ПРА), який містить індуктивність і комутуючий пристрій. (рис. 4.3). В момент розриву ланцюга струму, в котушці індуктивності виникає напруга самоіндукції $L di(t)/dt$ у декілька кіловольт, яка запалює розряд в лампі. Причому, завади створюються не тільки в момент запалювання розряду, але і в процесі роботи лампи внаслідок її періодичного погасання і знову запалення з частотою 50 Гц, створюючи завади радіоприйому в діапазоні середніх і довгих хвиль.

Електронні ПРА містять генератор ВЧ ($30 \div 50$ кГц), робота якого супроводжується присутністю вищих гармонік струму живлення: 90% – третя, 75% – п'ята, 60% – сьома гармоніка які, згідно вимогам стандарту, повинні зменшуватися шляхом фільтрації до допустимих значень.

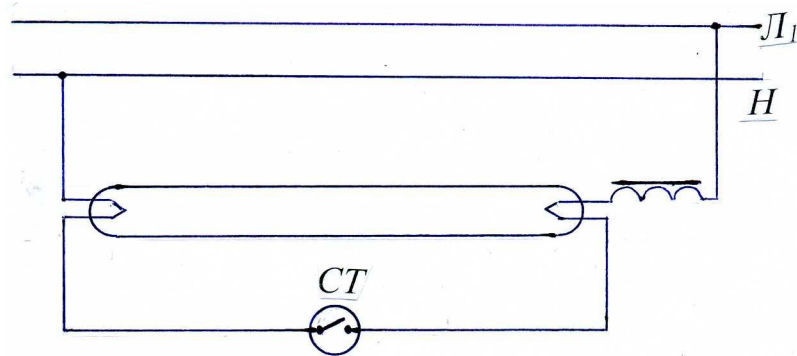


Рисунок 4.3 – Схема ввімкнення люмінесцентної лампи з котушкою індуктивності і стартером тліючого розряду

Розрядні лампи високого тиску створюють значні завади в діапазоні високих і надвисоких частот завдяки швидкому пробію розрядного проміжку при високому тиску і малими відстанями між електродами.

У електричних колекторних двигунів в обмотках і провідниках відбувається швидка зміна струмів. При відході щітки від краю колекторної пластини струм підтримується через електричну дугу (іскріння щіток), при обриві якої, відбувається швидка зміна струму $di(t)/dt$, яка індукує в котушках індуктивності напругу самоіндукції $L di(t)/dt$, а також у сусідніх проводах напругу взаємної індукції $M di(t)/dt$.

Для локального обмеження завад вмикають послідовно котушки індуктивності, які індукують в обмотках якоря протидіючу напругу, а паралельно щіткам – конденсатори.

Повітряні лінії високої напруги.

На поверхні проводів ліній високої та надвисокої напруги напруженість електричного поля може перевищувати на деяких ділянках величину електричної міцності повітря, внаслідок чого виникають часткові розряди (ЧР), які утворюють поблизу проводу коронний розряд. ЧР супроводжуються імпульсами струму з тривалістю зростання та спаду в декілька пікосекунд, що призводить до розповсюдження вздовж проводів електромагнітних хвиль. Імпульси цих розрядів утворюють джерело шумових завад, які призводить до порушення радіозв'язку в діапазоні до ультрависоких частот.

Іншим джерелом завад є іскрові розряди між нещільно приєднаними металевими частинами обладнання, або металевими частинами і поверхнею ізолятора. Спектр таких іскрових розрядів досягає надвисоких частот і заважає, насамперед, роботі телеприймачів.

Радіоперешкоди ЛЕП ВН сильно залежать від погоди і форми верхньої частин опор.

4.5 Джерела широкосмугових перехідних завад

Розряди статичної електрики. При імпульсному розряді статичної електрики у вигляді іскри, виникають перехідні напруги і струми, обумовлені перехідними електричними і магнітними полями, які призводять до виникнення функціональних завад в комп'ютерах, телефонах і інших електронних приладах, а також можливим пошкодженням напівпровідникових елементів електронних систем. Джерелом завад можуть бути люмінесцентні лампи низької напруги, що використовуються в домашньому побуті.

Електростатичні заряди виникають при доторканні до пластмасового елемента, завихренні пилу, терті повітря з літаючим об'єктом, ходьбі по синтетичному покриттю, вставанні зі стільця та ін. Зазвичай, при ходьбі по ковдрам потенціали досягають величини $5 \div 15$ кВ (рис. 4.4).

В залежності від типу матеріалу діелектрика, заряди мають позитивний або негативні знак, а в залежності від взуття, покриття полу, вологості повітря людина може заряджатися до 30 кВ, що призводить до виникнення розрядів між об'єктом і людиною,— а це висуває відповідні вимоги до ЕМС. Накопичена енергія, в залежності від ємності зарядженого тіла ($50 \div 150$) пФ може складати декілька десятих частин Дж.

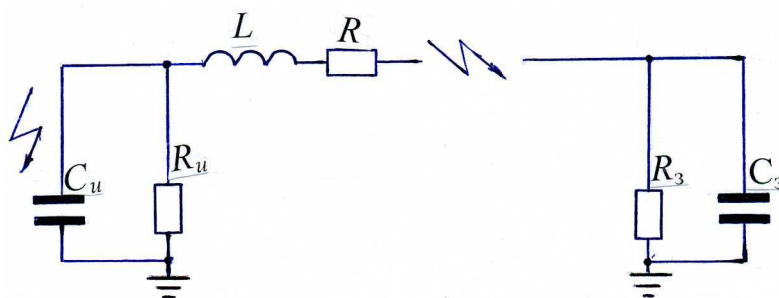


Рисунок 4.4 – Схема заміщення ланцюгу розряду тіла людини через зарядженого провідного предмета: C_u , R_u – еквівалентні параметри статично зарядженого тіла; R – послідовний опір; C_3 , R_3 – ємність і опір по відношенню до землі об'єкта, через який здійснюється розряд

Опір R залежить від джерела завад і дорівнює для людини ~ 1 кОм, а для меблі – від 10 до 50 Ом. При $C_3 \rightarrow \infty$, $R_3 \rightarrow 0$, (розряд біля землі), а індуктивність ланцюгу розряду 1 мкГн/м, то отримаємо: $R_n \gg \omega L$, тобто розряд затухає аперіодично з постійною часу $T = C_u$, R_n .

При умові $R_n \ll \omega L$, відбувається коливальний розряд з частотою $f = 1/2\pi\sqrt{LC_u}$ (рис. 4.5).

Найбільші проблеми виникають при швидкому імпульсному розряді між зарядженими тілами зі швидкістю наростання в наносекундному або субнаносекундному діапазоні. Саме імпульсні розрядні струми і виникаючі при цьому змінні магнітні поля, призводять до шкідливих електромагнітних впливів. Час зростання струму оцінюють постійною часу L/R_n , а крутизна фронту струму досягає декількох десятків ампер в наносекунду при амплітудах струму $2 \div 50$ А.

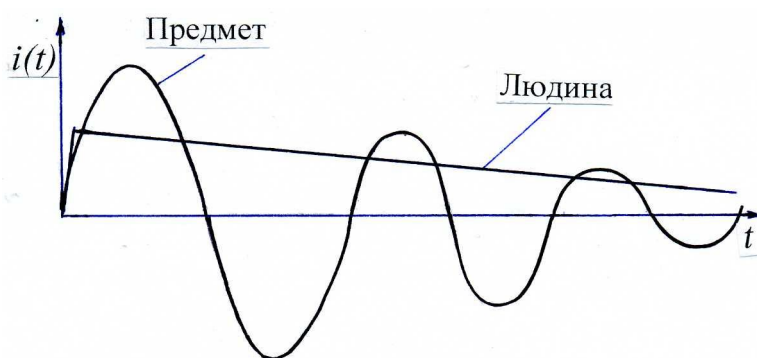


Рисунок 4.5 – Крива зміни струму при розряді тіла людини

При розряді з тіла людини інтенсивність іскри залежить від площі (пальця або більшої частини тіла). Іскра має сильні нелінійні властивості і в деяких випадках (потенціалі, нижчим за 8 кВ) переривається на короткий час, а потім знову запалюється внаслідок притоку енергії із сусідніх ділянок. При цьому форма кривих струму має складний характер, тобто містить безліч гармонік.

4.6 Комутація струму в індуктивних ланцюгах

При відключенні котушок індуктивності, які широко використовуються в пристроях автоматичного керування і контролю (котушки реле і котушки контакторів), виникають високі перехідні перенапруження, які можуть призвести до їх повторного включення, пробоя ізоляції, а також до електромагнітних впливів на компоненти мереж. Причому механізм виникнення завад при вимиканні і вмиканні – різний. При розмиканні індуктивного ланцюга зі струмом розводящі контакти призводять до зміни струму – di/dt , що пов'язано зі зміною магнітного потоку – $d\Phi/dt$, який в результаті самоіндукції індукує напругу в ланцюгу струму. Ця напруга прикладена до контактів і підтримує комутаційну дугу.

Найбільший вплив виникає внаслідок обриву струму, коли розпад дуги і швидке зростання напруги на проміжку при розведених контактах примушує струм падати до нуля з великою крутизною di/dt . В результаті ЕРС самоіндукції досягає навіть у контактів низької напруги декількох кіловольт.

При ввімкненні індуктивних ланцюгів, коли контакти наблизились на відповідну відстань, відбувається пробій газового проміжку, який при вібрації контактів багатократно повторюється. Заваду створює не сама іскра, а її зникнення (обрив струму) або поява (електричний пробій з повторним запаленням дуги), що супроводжується крутими фронтами зміни струму.

Магнітна енергія накопичується в індуктивності L до початку відключення і дорівнює: $W_m = \frac{1}{2}LI^2$. При розімкненому вимикачеві струм котушки L замикається через ємність котушки $C_{\text{пар}}$ (рис.4.6). Ця енергія переходить з індуктивності в ємність і знову в індуктивність. Приблизну максимальну напругу отримаємо з формули:

$$W = \frac{1}{2}C_{\text{пар}}U_{\text{max}}^2 = \frac{1}{2}LI^2. \quad (4.1)$$

Перенапруження в які комутуються індуктивних ланцюгах є найбільш розповсюдженою причиною завад в електронних пристроях управління.

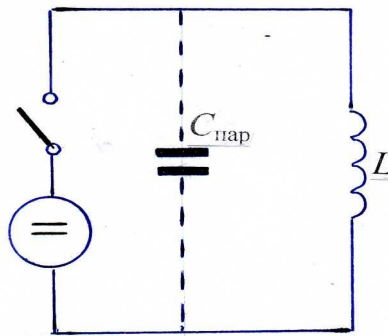


Рисунок 4.6– Визначення максимальної величини напруги самоіндукції в індуктивному ланцюгу з врахуванням паразитної ємності котушки

4.7 Перехідні процеси в мережах електропередач

Перехідні процеси в мережах низької напруги. Перенапруження виникають зазвичай при ввімкненнях індуктивних споживачів, а також при включенні ємнісного навантаження, і при спрацьовуванні вимикачів захисту і запобіжників, при КЗ, перемиканнях в навантажених мережах та атмосферних розрядів.

Завдяки різним типам і внутрішнім опорам мереж максимальна (амплітудна, пікова) величина напруги U , крутизна dU/dt і кількість енергії в заваді коливаються в широких межах. При повному опорі енергія завади розраховується за формулою:

$$W = \int \frac{U_{\Pi}^2}{R} dt. \quad (4.2)$$

Високі перенапруження в проводах низької напруги швидко згасають по амплітуді і по крутизні, що суттєво зменшує їх негативний вплив.

Перехідні процеси в мережах високої напруги. В розподільних пристроях при замиканні і розмиканні роз'єднувачів виникають численні повторні запалення, які можуть створити у вторинних пристроях перенапруження до 20 кВ, що може призвести до спрацьовування захисту, або пошкодження елементів мереж.

Швидкі позитивні і негативні зміни потенціалу ділянки лінії визивають струми зміщення через паразитні ємності відносно сусідніх проводів $i = C_{\text{нар}} dU/dt$, максимальна величина яких внаслідок великої крутизни зміни напруги може приймати великі значення. Обумовлені струмом заряду лінії і струмом зміщення магнітні поля індуктують в сусідніх контурах напругу завад. Якщо час пробігу хвилі в розімкненій лінії більший, за час розвитку повторних запалювань, то при кожному пробії виникають хвилі напруги і струму, які відбиваються на кінці лінії і наводять в паралельних проводах напруги і струми завад.

При розмиканні роз'єднувачів відбуваються аналогічні процеси, але амплітуда зміни потенціалу або хвиль при збільшенні відстані між контактами може набути подвійного максимального значення.

Комутаційні процеси в елегазових розподільних пристроях супроводжуються хвилями, які внаслідок нерівномірності хвильового опору частково відбиваються і навіть можуть виходити зовні (рис. 4.8). При підключенні короткої ненавантаженої лінії до загальної шини при зближенні контактів, відбувається першій пробій, і лінія набуває потенціалу шини. Якщо струм зменшився, то дуга обривається, але ділянка лінії зберігає свій потенціал, тому відбувається другий пробій, якщо миттєве значення змінної напруги шини відрізняється від лінії на величину пробією. Процес буде повторюватись до повного з'єднання контактів.

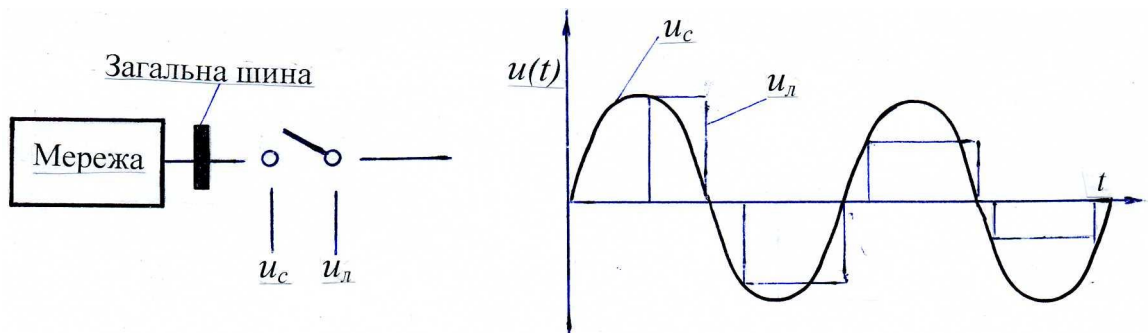


Рисунок 4.7– Виникнення перенапруг при включенні короткої невантаженої лінії

Електромагнітний імпульс блискавки. Блискавка і пов'язані з нею перехідні поля викликають сильний електромагнітний вплив поблизу місця удару. Максимальні параметри струму блискавки:

- максимальний струм $I_{max} = 200$ кА;
- крутизна зростання струму за 100 нс $di/dt = 300$ кА/мкс;
- крутизна зростання струму за 1 мкс $di/dt = 150$ кА/мкс;
- заряд $Q = \int di/dt = 500$ Кл;
- інтеграл квадрата струму $\int i^2 dt = W/R = 10^7$ А²/с.

Для внутрішнього захисту від блискавки згідно рівнянь Максвелла можна розрахувати електричні і магнітні поля, обумовлені струмом блискавки або її частковими струмами в заземленні, а також індуктовані ними струми у вторинних ланцюгах з врахуванням ряду факторів: віддалення від місця удару, характеристики споруд та ін.

4.8 Класи навколишнього середовища

Клас 1 – дуже низький рівень завад (приклад: приміщення для ПК):

- лінії сильного струму і управління прокладені окремо від установок більш високого класу;
- лінії живлення на обох кінцях мають заземлені екрани і мережні фільтри;
- комутаційні перенапруження в ланцюгах управління «придушені» відповідними ланцюгами;
- наявність люмінесцентних ламп.

Клас 2 (низький рівень завад) (Контрольно-вимірювальні щити на станціях):

- наявність люмінесцентних ламп;
- комутаційні перенапруження при вимиканнях реле частково обмежені, контактори відсутні;
- лінії сильного струму і управління прокладені окремо від установок більш високого класу;

- роздільна прокладка неекраниваних ліній живлення і ліній управління.

Клас 3 (рівень промислових завод) (Щити управління електростанцій):

- релейні котушки не мають обмежуючих ланцюгів, немає контакторів;
- лінії живлення прокладені окремо від ліній управління, сигнальних і телефонних;
- не обов’язково розділення ліній сильного струму і управління від елементів установки з більш високим рівнем завод;
- не обов’язкове розділення ліній управління, сигнальних і телефонних одне від одної;
- можливе використання загальної системи заземлення.

Клас 4 (високій рівень промислових завод) (Установки відкритого типу електростанцій і пристрої керування технологічними процесами):

- реле і контактори, які не мають обмежувальних ланцюгів;
- сумісне прокладання ліній управління, сигналізації та телефонних;
- використання багатожильних кабелів для ліній управління і сигнальних;
- не обов’язкове відділення проводів від часток установки з різним рівнем завод.

Клас X (екстремальний рівень завод). Розташування приладів в безпосередній близькості до джерела екстремальних завод. Споживачем повинні запроваджуватись додаткові заходи для зменшення рівня завод.

Клас 1: низький рівень електромагнітного випромінювання (місцеві радіо- і телестудії на відстані ближче 1 км.

Клас 2: середня інтенсивність електромагнітного випромінювання. Радіотелефони повинні розташовуватись на відстані більше 1 м від чутливих пристроїв.

Клас 3: дуже сильне електромагнітне випромінювання, обумовлене приладами радіотелефонії великої потужності розташовані безпосередньо біля пристроїв.

Клас 4: дуже сильне випромінювання. Ступень контролю повинна узгоджуватись між сторонами.

Вибраний клас середовища встановлює норми контролю: – амплітуди випробувальних напруг і струмів, які, наприклад, повинні в 2 рази (або на 6 дБ) перевищувати рівень завод, характерних для відповідних класів навколишнього середовища.

При виборі засобів для забезпечення ЕМС необхідно на основі мінімального ризика визначити імовірність виникнення завод, кошторис на заходи захисту від можливих завод в даному класі середовища.

5 МЕХАНІЗМИ ВИНЕКНЕННЯ ТА ВПЛИВ ЗАВАД

5.1 Механізми передачі завад

На рисунку 5.1 наведені 4 способи впливу контуру, що є джерелом завад Q до іншого S , який є їх приймачем. Такий вплив може здійснюватись по проводам, або через поле. В першому випадку – це гальванічний зв'язок, а в другому – внутрішній або зовнішній ємнісний зв'язок (якщо переважає електричне поле), або індуктивний (якщо переважає магнітне поле). Також використовують поняття електромагнітного зв'язку, при якому між напруженістю електричного і магнітного полів існує співвідношення $E/H = 377 \text{ Ом}$.

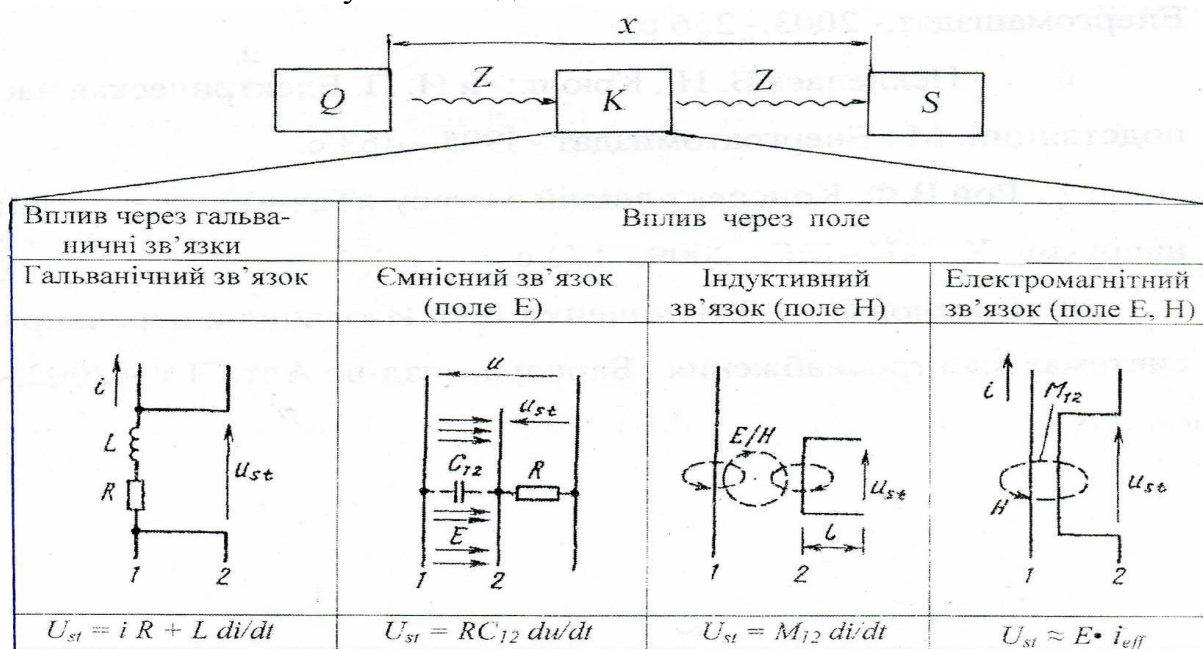


Рисунок 5.1 – Механізми впливу джерела завад між контурами:
1, 2 – контури спливаючій і приймаючій i_{eff} – ефективна довжина антени;
 u_{st} – напруга завади

5.2 Гальванічний вплив завад

Гальванічний вплив може здійснюватись через загальні повні опори, через опори мережевих проводів або через систему захисних і заземлюючих проводів.

На рис. 5.2 показана схема живлення постійною напругою логічних модулів, в якій при зміні стуму одного з них (di/dt) генерується напруга завади u_{st} , завдяки падінню напруги на R і L , яка накладається на напругу живлення. При цьому величина напруги завади

$$u_{st} = R \Delta i + L \Delta i / \Delta t. \quad (5.1)$$

Ця напруга при заданих Δi і $\Delta i / \Delta t$ тим нижча, чим менші параметри повних опорів загальних ланцюгів і зазвичай складає вольти або мілівольти.

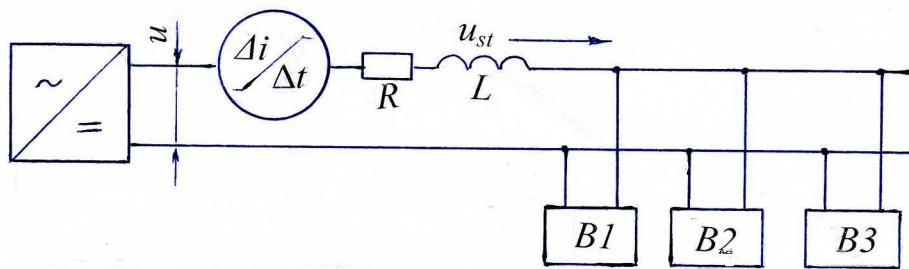


Рисунок 5.2 – Приклад гальванічного зв'язку в ланцюгу електроживлення:
 R – активний опір провідника; L – індуктивність мережі

Оскільки активний опір провідника дорівнює

$$R = l / \rho F, \quad (5.2)$$

де l – довжина провідника; F – площа поперечного перерізу; ρ – питома електрична провідність, тому провідники необхідно вибрати найбільш короткими, а їх переріз – по можливості більшим.

Якщо для провідника з незмінною площею перерізу змінювати відношення ширини a до товщини b , то на ділянці високих швидкостей зміни струму di/dt буде спостерігатися залежність, обумовлена поверхневим ефектом. Більш важливе – не стільки збільшення опору, а суттєве (десятикратне) зниження напруги завад, обумовлене зменшенням індуктивності.

Активний опір за поверхневого ефекту на ВЧ може зрости в $10 \div 1000$ раз, але активна складова напруженості завади $u_{ntr} = \Delta R \cdot i$ при відповідному виборі перерізу провідника залишається порівняно малою (мілівольти) по відношенню до індуктивної складової:

$$u_{ntr} = L \Delta i / \Delta t \quad (5.3)$$

При заданому $\Delta i / \Delta t$ індуктивність лінії з провідником циліндричної форми дорівнює:

$$L = l(\mu_0 / \pi) \ln(2d/D). \quad (5.4)$$

Отже, для зменшення L і, тим самим, u_{tr} необхідно скорочувати довжину проводів круглого перерізу для заданого діаметру, а також скорочувати до мінімуму відстань між ними, а для провідників

прямокутного перерізу – збільшувати відношення a/b , яке може досягати десяти і більше. Тому лінія з плоскими проводами має набагато меншу індуктивність згідно виразу:

$$L = l \cdot (2\mu_0/\pi) \ln\left(1 + \frac{1}{1+a/b}\right). \quad (5.5)$$

Для зниження гальванічного впливу у з'єднувальних проводах ланцюгів живлення і сигнальних контурах застосовують наступні рекомендації:

- з'єднання двох контурів необхідно виконувати з найменшим повним опором і індуктивністю, що досягається використанням проводів великого перерізу, по-можливості меншої довжини, мінімальної відстані між проводами ланцюгів живлення, розташування прямого і зворотного проводів рядом, виконання системи опорного потенціалу у вигляді плоских шин.

- ефективним є також виконання з'єднань шин опорного потенціалу у вигляді багатьох паралельних кабелів, завдяки чому одночасно компенсуються як ємнісний, так і індуктивний вплив;

- гальванічна розв'язка повинна здійснюватись відмовою від загальних зворотних провідників в ланцюгах передачі сигналів, від використання проводів заземлення, використання корпусів приладів та машин в якості проводів сигнальних ланцюгів; необхідно роздільно жити потужні електричні і аналогові, дискретні функціональні елементи з метою усунення впливу внутрішнього опору живлячої мережі;

- розділення потенціалів, тобто усунення будь-яких гальванічних контактів між контурами;

- вибір швидкості зміни струму $\Delta i / \Delta t$ не більшої, ніж необхідна за умовами функціонування.

Гальванічний вплив по контурам заземлення.

Маємо два рознесені в просторі прилади, $G1$ і $G2$, які за вимогами техніки безпеки повинні бути заземлені (рис. 5.3).

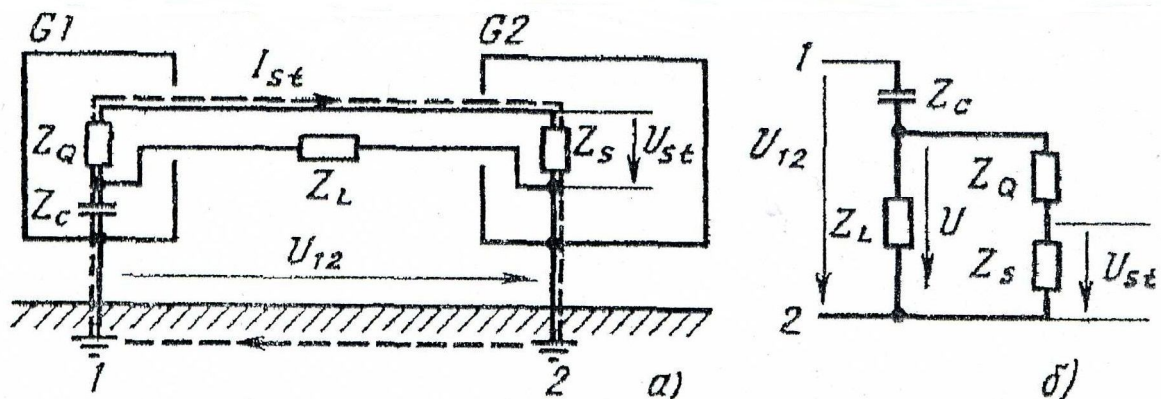


Рисунок 5.3 – Гальванічний вплив через замкнену петлю заземлення:

а) – схема пристрою; б) – схема формування напруги завади

Контур корисного сигналу також заземлений у двох місцях приладу. Між точками 1 і 2 може виникнути різниця потенціалів, обумовлена струмом в контурі заземлення. Ця різниця потенціалів U_{12} створює струм завади I_{zt} , внаслідок чого на внутрішньому опорі входу приладу Z_3 виникає напруга завади U_{zt} , що накладена на вхідний сигнал. При синусоїдальній формі напруги мережі напруга завади розраховується за припущенням, що повний опір лінії Z_L набагато менший, ніж опір Z_3

$$U_{zt} = U_{12} \frac{Z_3}{Z_3 + Z_Q}. \quad (5.6)$$

Якщо $Z_3 \gg Z_Q$, то $U_{zt} \approx U_{12}$, а при $Z_3 = Z_Q$ $U_{zt} = 0,5 U_{12}$.

Для зменшення впливу по ланцюгам заземлення необхідно знижувати різницю потенціалів U_{12} за рахунок зменшення опору між точками 1 і 2.

Цього можна досягнути зробивши підлогу провідною, або з'єднуючі прилади масивними провідниками, або ж екрануванням сигнальних ліній з заземленням екранів з обох кінців, а також зменшенням струму I_{zt} . Останнє можливе розділенням контурів заземлення приладу $G1$ (рис. 5.3). Але в цьому випадку між сигнальним контуром і корпусом приладу залишається ємнісний зв'язок Z_c , внаслідок чого виникає напруга завади:

$$U_{zt} \approx U_{12} \frac{Z_3}{Z_3 + Z_Q} \frac{Z_L}{Z_L + Z_c}. \quad (5.7)$$

Оскільки при $f \rightarrow \infty$; $Z_c \rightarrow 0$ і $U_{zt} = U_{12} \cdot Z_3 / (Z_3 + Z_Q)$, а при $f = 0$, $Z_c = \infty$ і $U_{zt} = 0$, тобто при високих частотах напруга завади завелика, а захист ефективний лише при постійній напрузі або низьких частотах. При високих частотах петля заземлення практично замкнена, тому ситуація відповідає рисунку 5.3.

5.3 Ємнісний вплив

Ємнісний вплив може бути пов'язаний з паразитними ємностями між проводами або провідниковими предметами, що належать до різних струмових контурів. Розглянемо наступні випадки:

- контур впливу і підлягаючий впливу контури гальванічно розділені;
- контури мають загальний провід системи опорного потенціалу;
- проводи струмового контуру мають велику ємність відносно землі.

Гальванічно розділені контури. На рис.5.4 наведена спрощена модель ємнісного впливу при умові, що довжина контуру l мала порівняно з довжиною хвилі найбільш високої частоти.

Система провідників 1, 2 належить до контуру впливу, а провідники 3, 4 утворюють контур, що відчуває цей вплив.

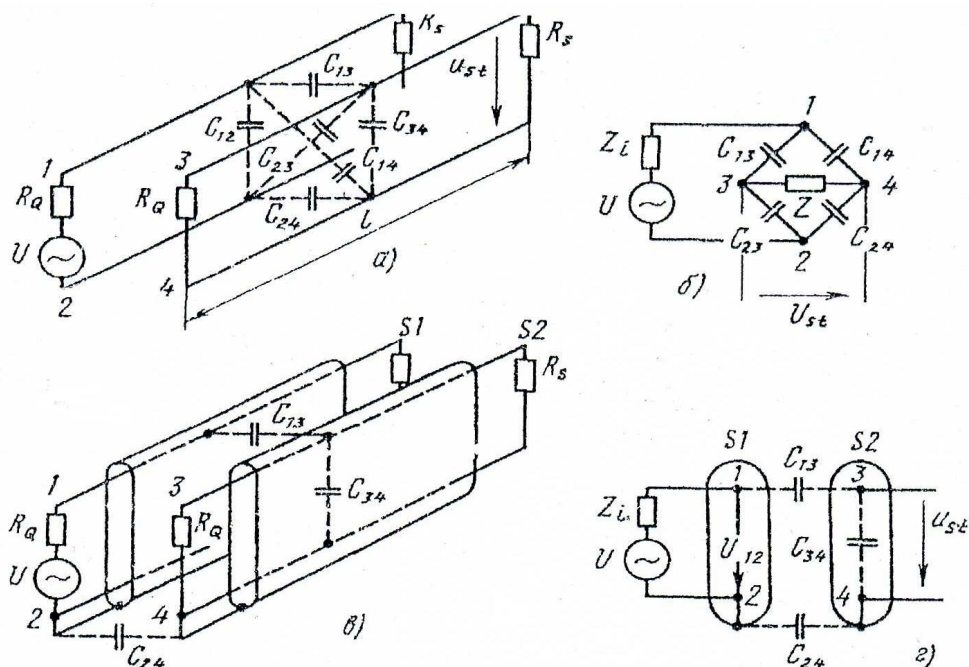


Рисунок 5.4 – Ємнісний вплив між гальванічно розділеними контурами:
а) – схема впливу; б) – схема заміщення; в) – схема впливу при екрануванні обох контурів; г) – схема заміщення при наявності екранів

Елементи контуру впливу R_Q , R_3 і C_{12} утворюють повний опір Z_1 , а елементи R_Q , R_3 і C_{34} – повний опір Z_2 контуру, який підлягає ємнісному впливу. Отже, напруга завади U_{st} дорівнює нулю, якщо виконується умова симетрії

$$C_{12}/C_{23} = C_{14}/C_{24}. \quad (5.8)$$

Ця умова може бути виконана попарним скручуванням проводів (провода 1 з проводом 2, провода 3 з проводом 4), а в деяких випадках – включенням симетрируючих конденсаторів.

Іншою можливістю зменшення ємнісного впливу є застосування екранірованих проводів (рис. 5.4) з екранами S_1 і S_2 з добре провідного матеріалу, які зазвичай з'єднуються з одного боку з проводом системи опорного потенціалу. Завдяки цьому збільшується ємність зв'язку C_{13} . В ненавантаженому стані для контуру, який підлягає впливу запишемо:

$$U_{st}/U_{12} = 1/(1 + C_{34}/C_{13} + C_{34}/C_{24}), \quad (5.9)$$

звідки витікає, що екрануюча дія тим краща, чим більша ємність C_{34} провідника відносно екрана порівняно з ємностями C_{13} і C_{24} .

Контури із загальним проводом опорного потенціалу. Ці контури є типовими для аналогових і цифрових схем. На рисунку 5.5 наведена логічна схема, в якій можлива самовільна зміна стану перемикаючого елемента при зміні сигналу на виході елемента A внаслідок паразитної ємності C_{13} .

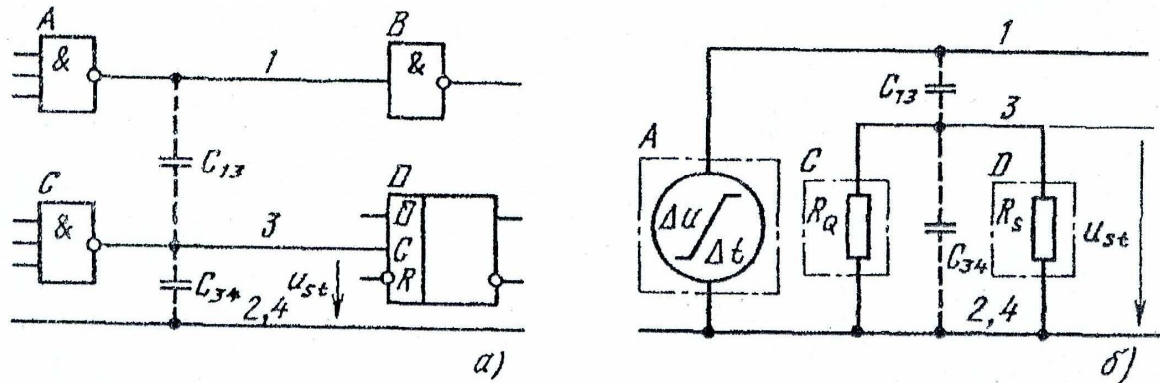


Рисунок 5.5 – Ємнісний вплив контурів із загальним проводом системи опорного потенціалу 2, 4: а) – схема з елементами логіки; б) – схема заміщення; 1, 2 – контур впливу; 3, 4 – контур що підлягає впливу; C_{13} – паразитна ємність зв'язку

При умові $R_3 \gg R_Q$, отримаємо напругу завади в операторній формі:

$$u_{st}(p) = \left[\left(\frac{\Delta u}{\Delta t} \right) \frac{1}{p^2} \right] \frac{p C_{13} R_Q}{1 + p R_Q (C_{13} + C_{34})}. \quad (5.10)$$

Рішення цього рівняння має вигляд:

$$u_{st} = R_Q C_{13} \left(\frac{\Delta u}{\Delta t} \right) (1 - e^{-t / R_Q (C_{13} + C_{34})}). \quad (5.11)$$

Якщо постійна часу $R_Q \cdot (C_{13} + C_{34}) \ll \Delta t$, то максимальна напруга завади

$$u_{stmax} = R_Q \cdot C_{13} \left(\frac{\Delta u}{\Delta t} \right). \quad (5.12)$$

Ємність зв'язку C_{13} визначається геометричними розмірами і топологією провідників, і при діаметрі D і довжини l , розташовані паралельно на відстані d (рис. 5.6) мають ємність зв'язку:

$$C_{13} = \frac{\pi \epsilon_0 \epsilon_r l}{\ln \left[\frac{d}{D} + \sqrt{\left(\frac{d}{D} \right)^2 - 1} \right]}. \quad (5.13)$$

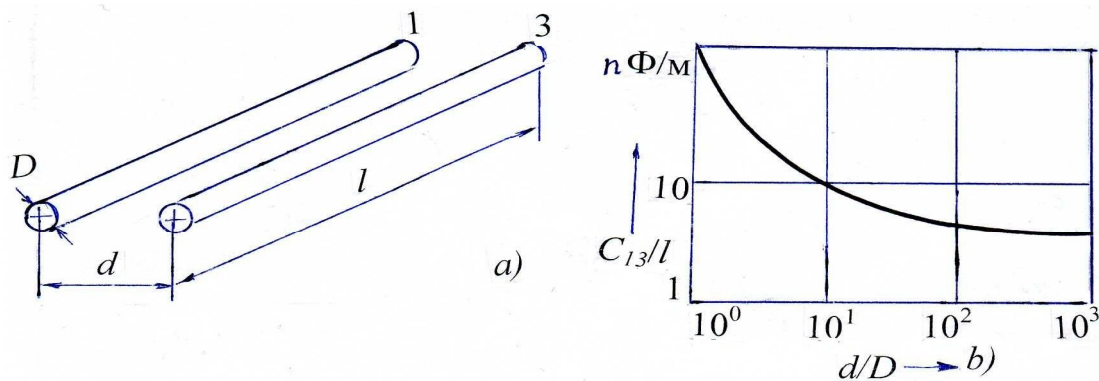


Рисунок 5.6 – Паралельно прокладені провідники – (а), і залежність погонної індуктивності C_{13}/l від відношення d/D – (б)

Реальні значення ємності складають зазвичай від 5 до 100 пФ/м.

Для зменшення ємнісного впливу контурів з загальним проводом системи опорного потенціалу розроблені наступні рекомендації:

- забезпечення малого зв'язку C_{13} досягається зменшенням довжини проводів, зменшенням діаметра проводу D , збільшенням відстані d між проводами 1 і 2, виключенням їх паралельної прокладки, застосуванням ізоляції проводів і печатних плат з малою діелектричною проникністю;

- збільшенням ємності C_{34} шляхом розміщення сигнальних проводів між провідниками системи опорного потенціалу, використання вільних жил кабелю в якості проводів системи опорного потенціалу;

- виконання максимально низькоємних струмових контурів впливу;

- обмеження швидкості зміни напруги $\Delta u/\Delta t$;

- екранування проводів і контурів, які чутливі до впливу завад (під впливом екрану зменшується ємність C_{13} , а ємність C_{34} збільшується, що призводить згідно (5.11) і (5.12) при незмінній швидкості зміни напруги $\Delta u/\Delta t$ до зниження напруги завади.

5.4 Екранування ліній

Екрани виготовляють з добре провідного матеріалу, щоб на його опорі R і індуктивності L (рис.5.7,б) не було падіння напруги, яка б накладалася на корисний сигнал в захищеному корпусі. Екран в джерелі живлення необхідно з'єднувати з проводом системи опорного потенціалу.

Двохстороннє приєднання екрану до системи опорного потенціалу (рис. 5.7, г) доцільно, якщо екран повин послабити дію магнітного поля.

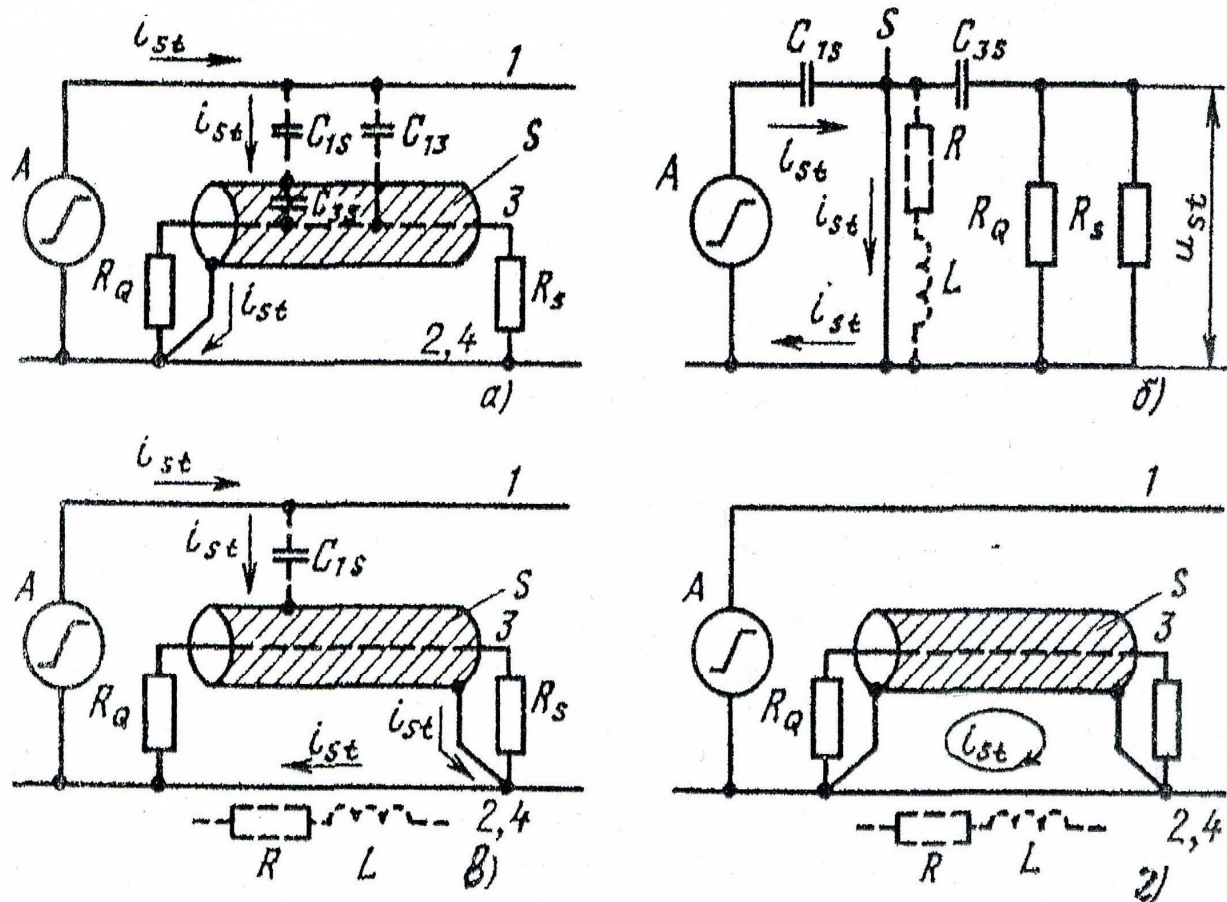


Рисунок 5.7 – Приклади екранування лінії: а) – з'єднання екрану S з системою опорного потенціалу 2, 4; б) – схема заміщення; в) – не вірне з'єднання екрану з системою опорного потенціалу; г) – двохстороннє з'єднання екрану; A – джерело завад $\Delta u/\Delta t$; R_Q – вихідний опір джерела завад; R_S – вхідний опір в екранованому контурі

При цьому струм i_{st} в контурі, створеному екраном S і проводом опорного потенціалу не повин створювати в проводах 2, 4 неприпустимих напруг завади, що попадають в захищений контур.

Струмові контури з великою ємністю. В довгих заземлених з одної сторони сигнальних лініях при появі напруги $\Delta u/\Delta t$ виникає струм завади i_{zb} , обумовлений ємностями C_1 і C_2 . Внаслідок не симетрії відносно землі частина синфазної напруги Δu перетворюється в протифазну напругу u_{st} , яка складається з напругою корисного сигналу (рис. 5.8, а). Для синусоїдальної мережної напруги Δu напруга завади становить:

$$U_{st} = \Delta U / \sqrt{1 + 1/(2\pi f C_1 R_Q)^2}. \quad (5.14)$$

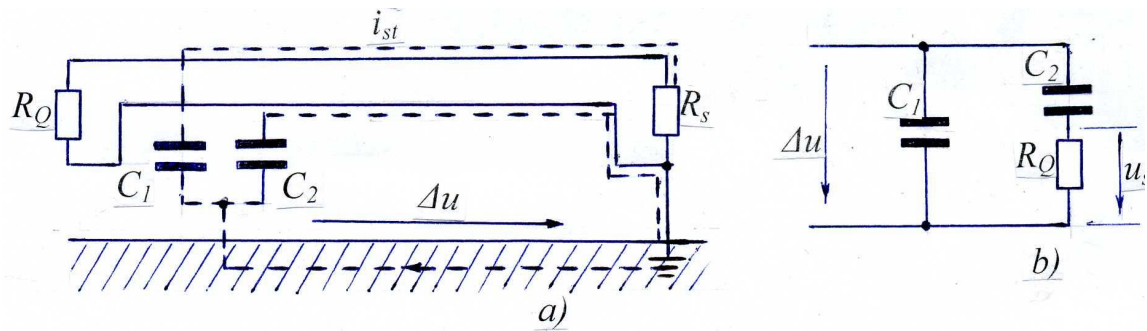


Рисунок 5.8 – Одностороннє заземлена лінія з великими ємностями на землю C_1 і C_2 (а), та її схема заміщення при $R_s \ll R_Q$ (б)

Для усунення завад рекомендують:

- усунення гальванічного зв'язку між системою опорного потенціалу і корпусом приладу;
- виконання сигнального контуру максимально низькоємним (малі величини R_Q і R_s);
- екранування сигнальної лінії, в результаті чого напруга завади знизиться до величини

$$U_{zt}^* = \Delta U' / \sqrt{1 + 1/(2\pi f C_{zt} R_Q)^2} . \quad (5.15)$$

При заземленні екрану (рис. 5.9, в) можливе збільшення ємності проводу відносно землі $C_{SL} > C_1$), що призводить до збільшення напруги завади, – чим без екрану.

Ефект зниження напруги завад можна отримати:

- при симетричному відносно землі розташування ліній передачі сигналів (рис. 5.9, д, е); при повній симетрії $U_{zt} = 0$.
- введення на приймальному кінці які розділяють елементів (реле, роздільний трансформатор (рис. 5.9, ж, з).
- використання для передачі сигналів світловодів (рис. 5.9, и), що повністю усуває вплив ємності C_{zt} .

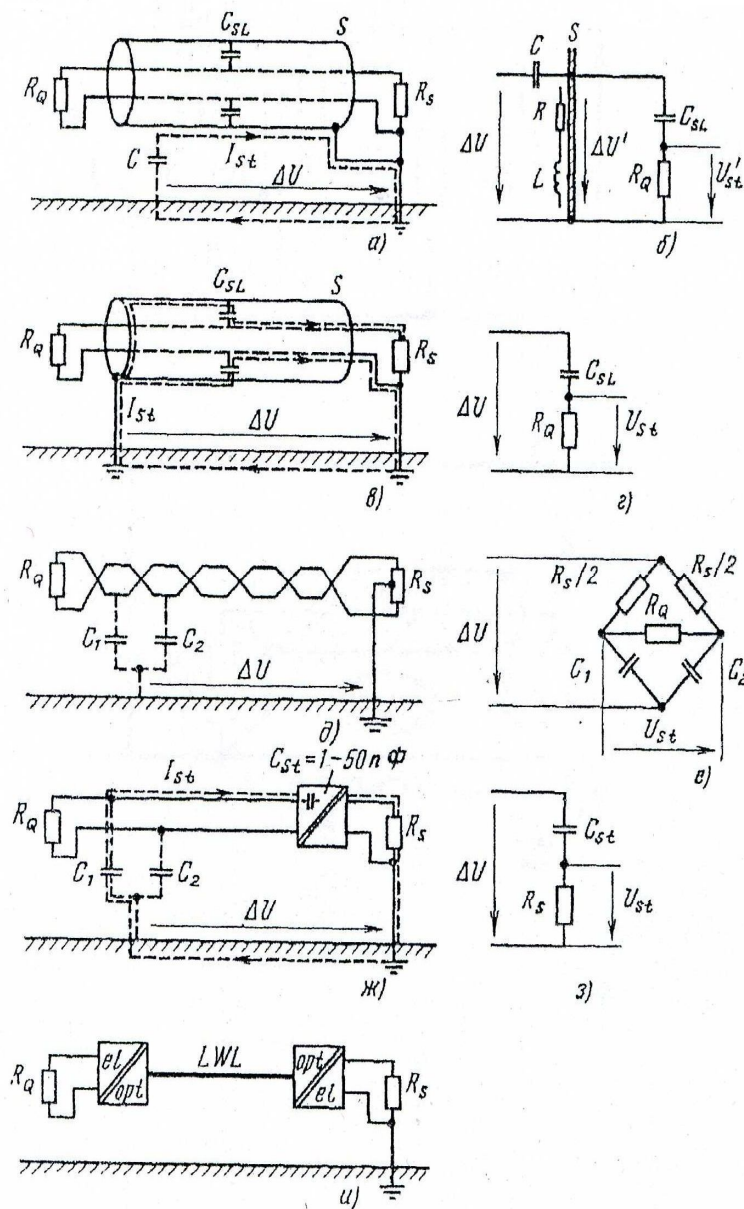


Рисунок 5.9 – Приклади захисту контурів з великими ємностями відносно землі

Ємнісний вплив блискавки.

При ударі блискавки канал блискавки набуває високого потенціалу ($U_{max} > 100\text{kV}$) внаслідок падіння напруги на опорі заземлення (рис. 5.9). Внаслідок цього потенціал сигнальної лінії при наявності ємностей C_K і C_E набуває величини

$$u_{zt} = U_{max} C_K / (C_K + C_E). \quad (5.16)$$

В разі відсутності захисних апаратів від перенапруг ізоляція приладів G_1 , G_2 (рис. 5.9) буде пошкоджена і виникне інтенсивна завада. Ефективний захист полягає у екрануванні сигнальних ліній.

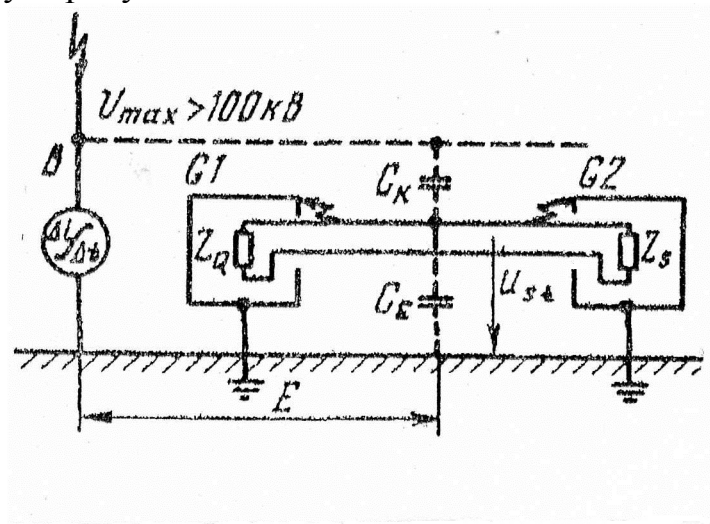


Рисунок 5.10 – Ємнісний вплив блискавки на лінію: B – канал розряду; G_1 , G_2 – прилади; C_E – ємності зв'язку відносно землі

Індуктивний вплив блискавки. Індуктивний вплив обумовлений паразитним зв'язком між контурами промислових пристроїв і утворених при розрядах блискавки, або розрядах статичної електрики. На рисунку 5.11 показано два індуктивно зв'язаних контури, і якщо в контурі 1 відбувається швидка зміна струму $\Delta i / \Delta t$, то в контурі 2 індуктується напруга завади:

$$u_{zt} = L_{12} \Delta i / \Delta t = - \Delta \Phi / \Delta t, \quad (5.17)$$

де Φ – магнітний потік, що пронизує контур 2; L_{12} – взаємна індуктивність контурів 1 і 2.

Їх взаємна індуктивність визначається конфігурацією і розмірами контурів і розраховується за формулою

$$L_{12} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \left[1 + \left(\frac{a}{d} \right)^2 \right], \quad (5.18)$$

де l і a – довжина і ширина контуру; d – відстань між контурами.

Згідно (3.17) і (3.18) при $l = 1$ м, $a/d = 0,1$ і $\Delta i / \Delta t = 1000$ А/с, отримуємо напругу завади $u_{zt} = 2,3$ В.

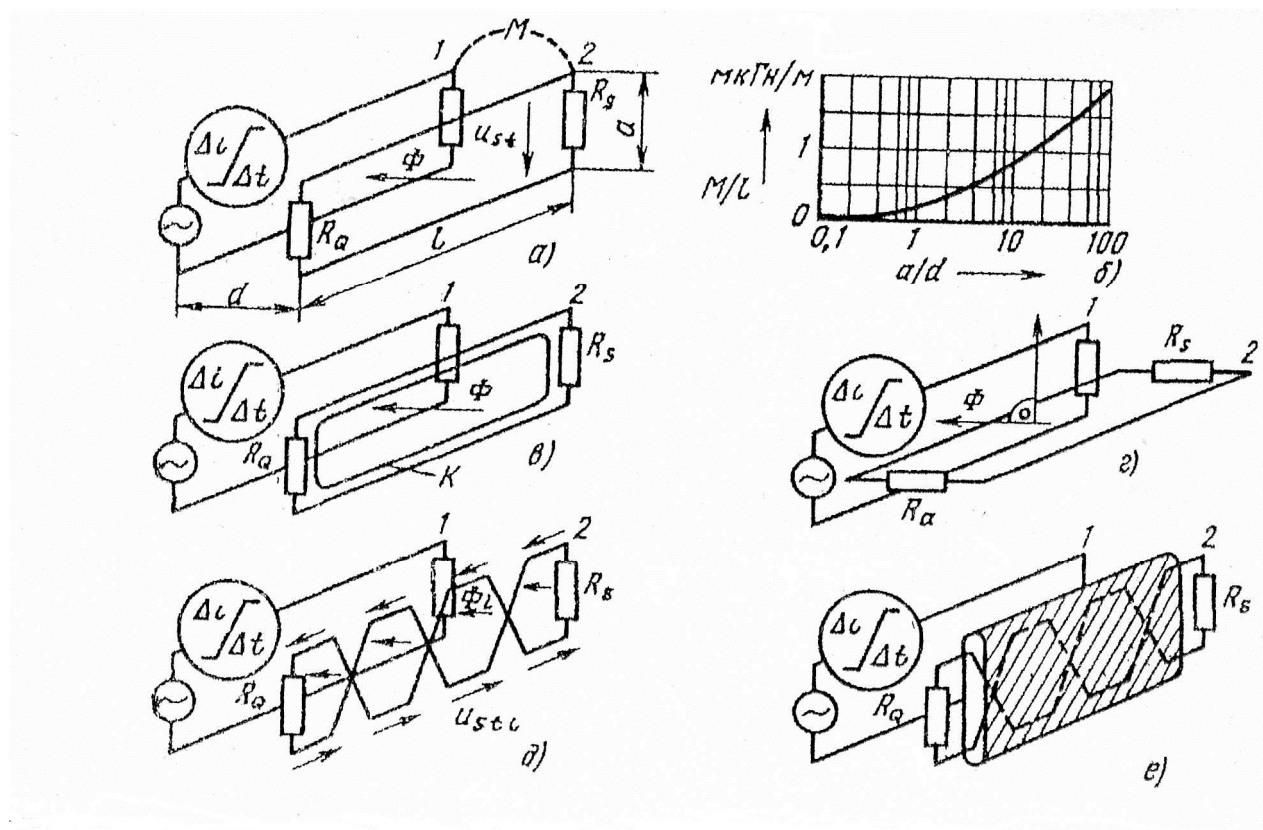


Рисунок 5.11 – Індуктивний вплив між промисловими струмовими контурами: а) – принципова схема двох струмових контурів 1 і 2 ; б) – погонна взаємна індуктивність; в ÷ е) – засоби по зниженню впливу

Якщо електростатичний розряд відбувся на провідящий корпус приладу G (рис. 5.12), то в контурі, що знаходиться усередині приладу і віддалений від провідника зі струмом розряду i_{ESD} на відстані r_o , – індуктується напруга

$$u_{zt} = \frac{\mu_o}{2\pi} \frac{al}{r_o} \frac{\Delta i}{\Delta t}, \quad (5.19)$$

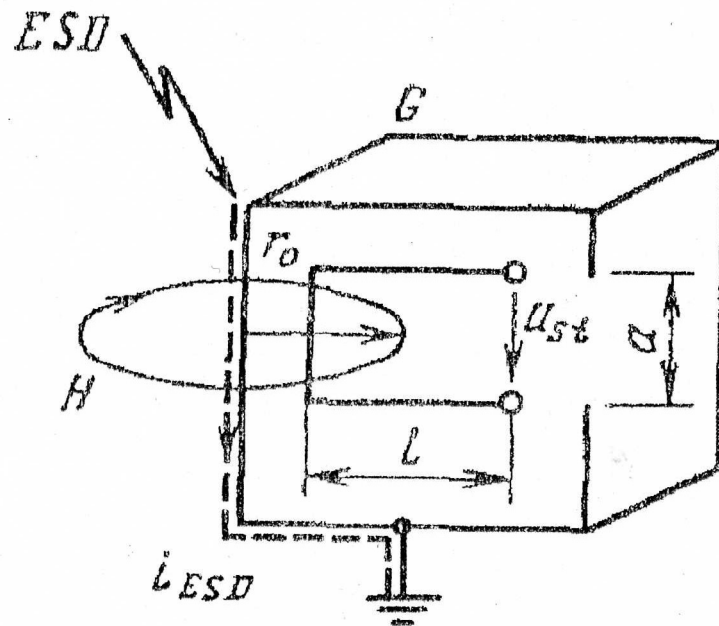


Рисунок 5.12 – Індуктивний вплив розряду статичної електрики ESD на петлю L , – a усередині приладу G : (l, a) – довжина і ширина контуру

Так, при $a = l = 1\text{ см}$, $r_0 = 5\text{ см}$ і швидкості зміни струму в часі $\Delta i / \Delta t = 10\text{ А/нс}$, то напруга завади досягне $u_{st} = 4\text{ В}$.

Зниження взаємного індуктивного зв'язку згідно (5.17)÷(5.20) можливе при наступних умовах:

- зменшення L за рахунок довжини провідників l ; збільшення відстані між мережними і інформаційними провідниками; зменшення площі контуру;
- зменшення швидкості зміни потоку $\Delta\Phi/\Delta t$ в часі за допомогою короткозамкненої петлі K , що розташована безпосередньо біля сигнального проводу (рис. 5.11, в);
- компенсація індукованої в контурі напруги шляхом скрутки проводів, при яких магнітні потоки створюють напруги, спрямовані протилежно;
- екранування кабелів, з'єднувальних проводів, модулів і приладів феромагнітними екранами з великою магнітною проникністю, причому екрани заземлюються з обох боків;
- зниження дії магнітного потоку, шляхом скручування проводів контуру 1, що призводить до створення зустрічних компонентів потоку і їх дія на вторинний контур компенсується.

Вплив електромагнітного випромінювання.

Електромагнітні хвилі що їх випромінює струмовий контур, розповсюджуються із швидкістю світла ($c = 300000\text{ км/с}$). Між довжиною хвилі λ і частотою випромінювання f існує зв'язок: $\lambda = c / f$.

При відстані $x > \lambda / l$ виконуються умови дальнього поля, що необхідно враховувати при частоті 1 МГц на відстані $x = 50$ м, а при частоті 1 ГГц на відстані $x = 5$ см до джерела (рис. 5.13).

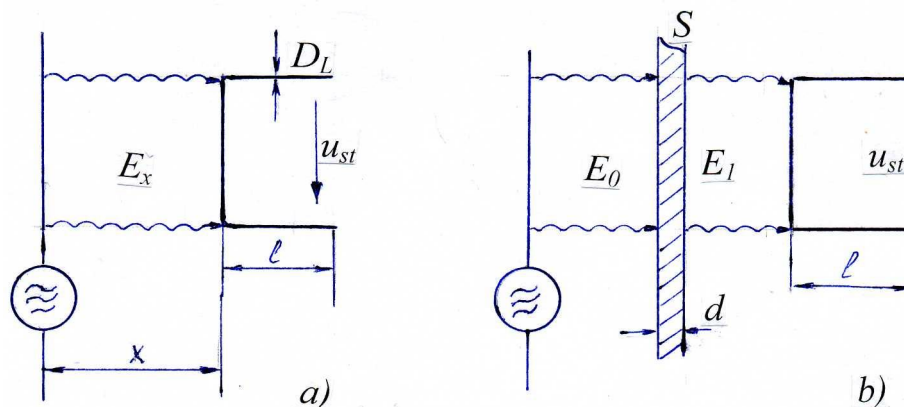


Рисунок 5.13 – Електромагнітний вплив на контур довжиною l без екрану – (а), і з екраном S товщини d – (б)

Напруженість електричного поля на відстані x від джерела потужністю P визначається співвідношення

$$E_x = 0,3 \sqrt{P} / x. \quad (5.20)$$

Під дією електромагнітної хвилі на електропровідних об'єктах внаслідок антенного ефекту виникають ВЧ напруги, які є завадами в сигнальних контурах. Індуктована ЕРС в антені розраховується з виразу

$$U_{zt} = E_x \cdot l_{\text{еф}}, \quad (5.21)$$

де $l_{\text{еф}}$ – ефективна довжина антени.

Довжина $l_{\text{еф}}$ залежить від розмірів пристрою і довжини падаючої хвилі. Для конкретних об'єктів вона визначається в нормах DIN/VDE 0848. Так, на частоті $f = 300$ МГц, $E_x = 10$ В/см, $l = 0,1$ м – напруга завади буде $U_{zt} = 2$ В.

Ефективним захистом від негативного впливу магнітного поля – як для послаблення випромінювання, так і для зменшення проникнення слугують екрануючі стінки, які встановлюють між джерелом завад і приймачем (рис. 5.13, б). При цьому напруженість падаючого поля зменшується завдяки як поглинанню енергії поля в матеріалі екрану, так і відбиттю падаючої хвилі. Ступень затухання поля залежить від товщини екрану, його електропровідності і магнітної проникності матеріалу, а також частоти випромінювання.

6 ПАСИВНІ ПРИСТРОЇ ПРИДУШЕННЯ ЗАВАД

6.1 Фільтри

При необхідності зниження рівня завад використовують пасивні пристрої придушення завад, до яких відносять фільтри, обмежувачі перенапруг і екрани, які в залежності від конкретної задачі, встановлюють біля чутливого елемента, або у джерела завад (рис. 6.1). Захисна дія цих пристроїв визначається відношенням Z/Z_r .

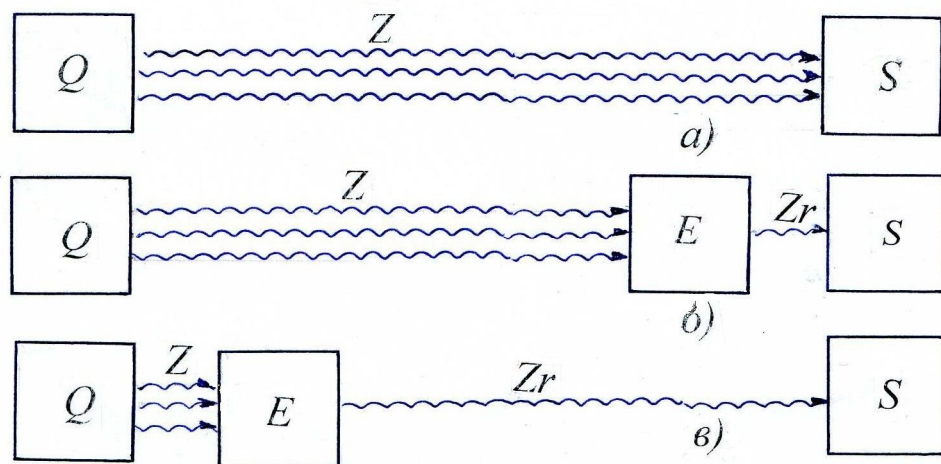


Рисунок 6.1 – Варіанти розташування джерела завад Q відносно приймача S і захисного елемента E :

- а) – захист відсутній; б) – захист приймача;
- в) – придушення завад біля приймача

Фільтри використовують для забезпечення затухання завади, яка розповсюджується по проводам. Ефективність їх застосування може бути досягнута при умові суттєвої різниці спектрів корисного сигналу і завади. Це дає змогу здійснювати селективне демпфірування завади при відсутності впливу його на корисний сигнал (рис. 6.2, рис. 6.3)

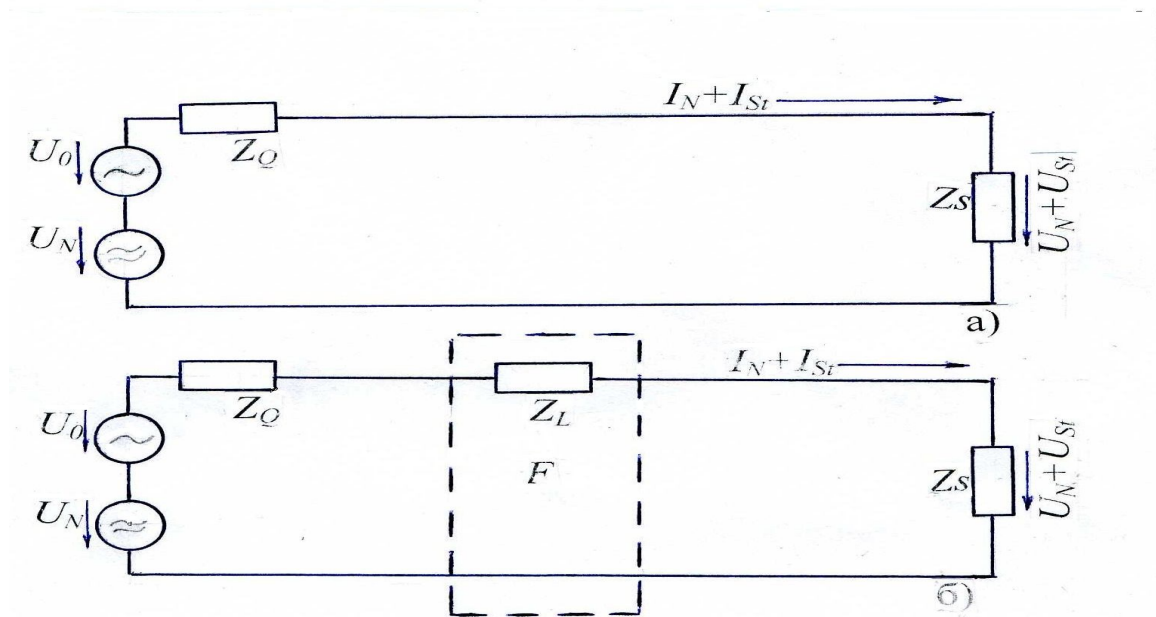


Рисунок 6.2 – Схема без фільтра – (а) і з фільтром – (б)

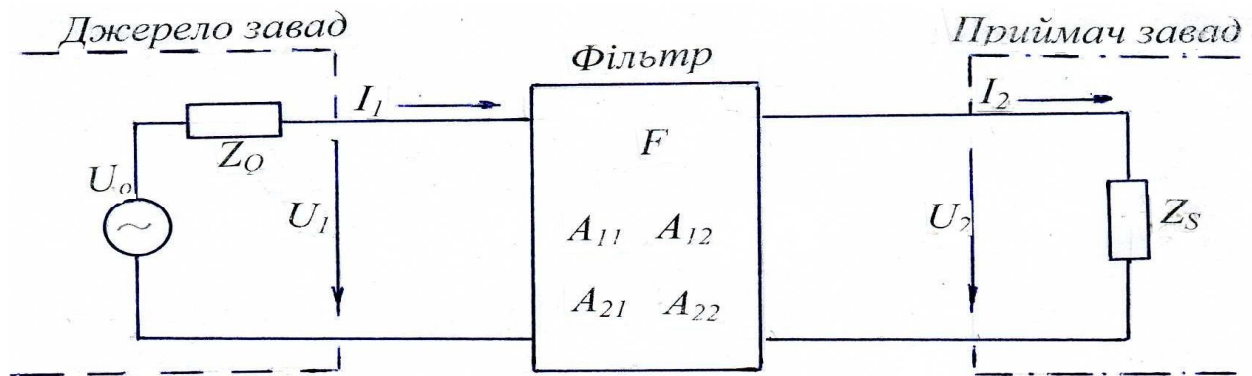


Рисунок 6.3 – Контур з фільтром

Якщо в низькочастотний контур корисного сигналу (U_N , I_N) прямує високочастотний сигнал завади (U_o), то на повному опорі приймача Z_3 з'являється напруга завади

$$U_{zt} = U_o \frac{Z_3}{Z_0 + Z_3}. \quad (6.1)$$

При застосуванні подовжнього повного опору Z_L (рис. 6.2, б) в формі (ωL), яке для низькочастотного струму I_t дуже мале, а для високочастотного I_t - дуже велике – забезпечує послаблення завади і напруга завади знижується до величини

$$U_{zt} = U_o \frac{Z_3}{Z_0 + Z_L + Z_3}. \quad (6.2)$$

Величину затухання визначають коефіцієнтом затухання – це відношення падіння напруги на Z_3 при наявності Z_L – і без нього

$$\left| \frac{U_{3t}}{U_{3t}^*} \right| = \left| \frac{Z_Q + Z_L + Z_3}{Z_Q + Z_3} \right|. \quad (6.3)$$

Коефіцієнт затухання записується як логарифм відношення напруг і вимірюється в децибелах

$$a_3 = 20 \lg \left| \frac{U_{3t}}{U_{3t}^*} \right|. \quad (6.4)$$

Згідно (6.3.) ефект затухання залежить як від Z_L , так і від повного опору Z_Q і Z_3 .

Взагалі фільтр F – це чотирьохполіусник, який об'єднує джерело завад і приймач, тому для його розрахунку застосовують наступні співвідношення

$$\dot{U}_1 = \dot{A}_{11}\dot{U}_2 + \dot{A}_{12}\dot{I}_2 \quad (6.5)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{A}_{21}\dot{U}_2 + \dot{A}_{22}\dot{I}_2. \quad (6.6)$$

де $\dot{A}_{11}, \dot{A}_{12}, \dot{A}_{21}, \dot{A}_{22}$ – комплексні параметри чотирьохполіусника, величини для яких наведені в табл. 6.1.

Із (рис. 6.3) запишемо

$$\dot{U}_o = \dot{U}_1 + Z_Q \dot{I}_1, \quad (6.7)$$

$$\dot{U}_2 = Z_3 \dot{I}_2, \quad (6.8)$$

то напруга на вході приймача без фільтра дорівнює

$$\dot{U}_{20} = \dot{U}_o \frac{\dot{Z}_3}{\dot{Z}_Q + \dot{Z}_3}. \quad (6.9)$$

Послаблення сигналу в фільтрі визначають як логарифм відношення напруг на вході приймача без фільтра – \dot{U}_{20} , і з фільтром – \dot{U}_2 .

Коефіцієнт затухання в фільтрі будь-якої структури згідно (6.5)÷(6.9) дорівнює:

$$a_e = 20 \lg \left| \frac{\dot{Z}_3}{\dot{Z}_Q + \dot{Z}_3} \dot{A}_{11} + \frac{1}{\dot{Z}_Q + \dot{Z}_3} \dot{A}_{12} + \frac{\dot{Z}_Q \dot{Z}_3}{\dot{Z}_Q + \dot{Z}_3} \dot{A}_{21} + \frac{\dot{Z}_Q}{\dot{Z}_Q + \dot{Z}_3} \dot{A}_{22} \right|. \quad (6.10)$$

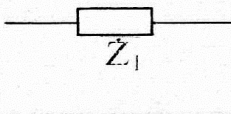
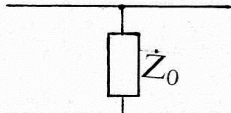
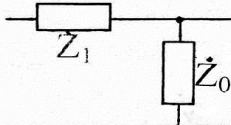
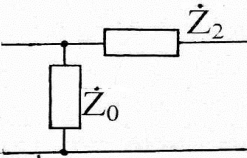
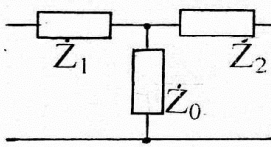
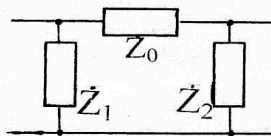
Звідси витікає, що коефіцієнт затухання залежить як від параметрів $A_{11}, A_{12}, A_{21}, A_{22}$, так і від повних опорів джерела та приймача завад і може сильно відрізнятись в залежності від конкретних умов. Тому

паспортні дані про коефіцієнт затухання $a_e(f)$ можна використовувати лише для конкретних умов як показник його якості. Зокрема, при $\dot{Z}_0 = \dot{Z}_3 = 50 \text{ Ом}$, згідно (6.4)

$$a_3 = 20 \lg U_0 / 2U_2, \text{ дБ, (оскільки } U_{20} = U_0 / 2). \quad (6.11)$$

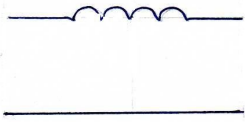
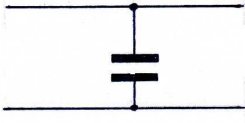
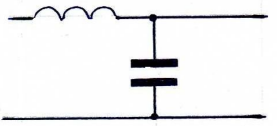
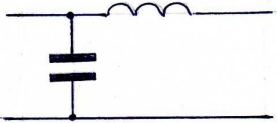
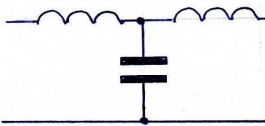
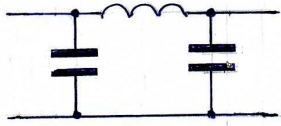
В інших випадках фактичну ефективність фільтра визначають експериментально, або розрахунком згідно (6.5), якщо відоме співвідношення повних опорів \dot{Z}_0 і \dot{Z}_3 . В таблиці 6.1. наведені значення коефіцієнтів A для різних типів фільтрів.

Таблиця 6.1– Параметри чотирьохполюсників простіших фільтрів

Схема	Коефіцієнт			
	\dot{A}_{11}	\dot{A}_{12}	\dot{A}_{21}	\dot{A}_{22}
	1	\dot{Z}_1	0	1
	1	0	$1/\dot{Z}_0$	1
	$1 + \dot{Z}_1 / \dot{Z}_0$	$\dot{Z}_1 \dot{Z}_2$	$1/\dot{Z}_0$	1
	1	\dot{Z}_2	$1/\dot{Z}_0$	$1 + \dot{Z}_2 / \dot{Z}_0$
	$1 + \dot{Z}_1 / \dot{Z}_0$	$\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 \frac{\dot{Z}_1 \dot{Z}_2}{\dot{Z}_0}$	$1/\dot{Z}_0$	$1 + \dot{Z}_2 / \dot{Z}_0$
	$1 + \dot{Z}_0 / \dot{Z}_2$	\dot{Z}_0	$1/\dot{Z}_1 + 1/\dot{Z}_2 + \frac{\dot{Z}_0}{\dot{Z}_1 \dot{Z}_2}$	$1 + \dot{Z}_0 / \dot{Z}_1$

Якщо параметри \dot{Z}_o та \dot{Z}_3 відомі приблизно, то вибір структури фільтра можна здійснити згідно таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – Рекомендації по вибору типу фільтра

Опір джерела	Схема фільтра	Опір приймача
Мале		Мале
Велике		Велике
Мале		Мале
Велике		Велике
Мале, невідоме		Мале, невідоме
Велике, невідоме		Велике, невідоме

6.2 Елементи фільтрів

Основними елементами фільтрів є котушки індуктивності і конденсатори, які використовуються як окремо, так і в комбінації. Зокрема, двохполюсні конденсатори, в залежності від способу приєднання їх в ланцюг струму (між прямими і зворотними проводами, між проводом і землею) придатні для захисту від синфазних і протифазних завад (рис. 6.4).

Конденсатори-вводи, що з'єднані з корпусом, захищають лише від синфазних завад. Конденсатори чотирьохполюсники – від протифазних завад, а багатосекційні – від обох видів завад.

Захисні котушки індуктивності виконують з мінімальними ємністю і активним опором із замкненим або розімкненим сердечником. Котушки зі стрижнями або кільцевим сердечником демпфують як синфазні, так і протифазні завади.

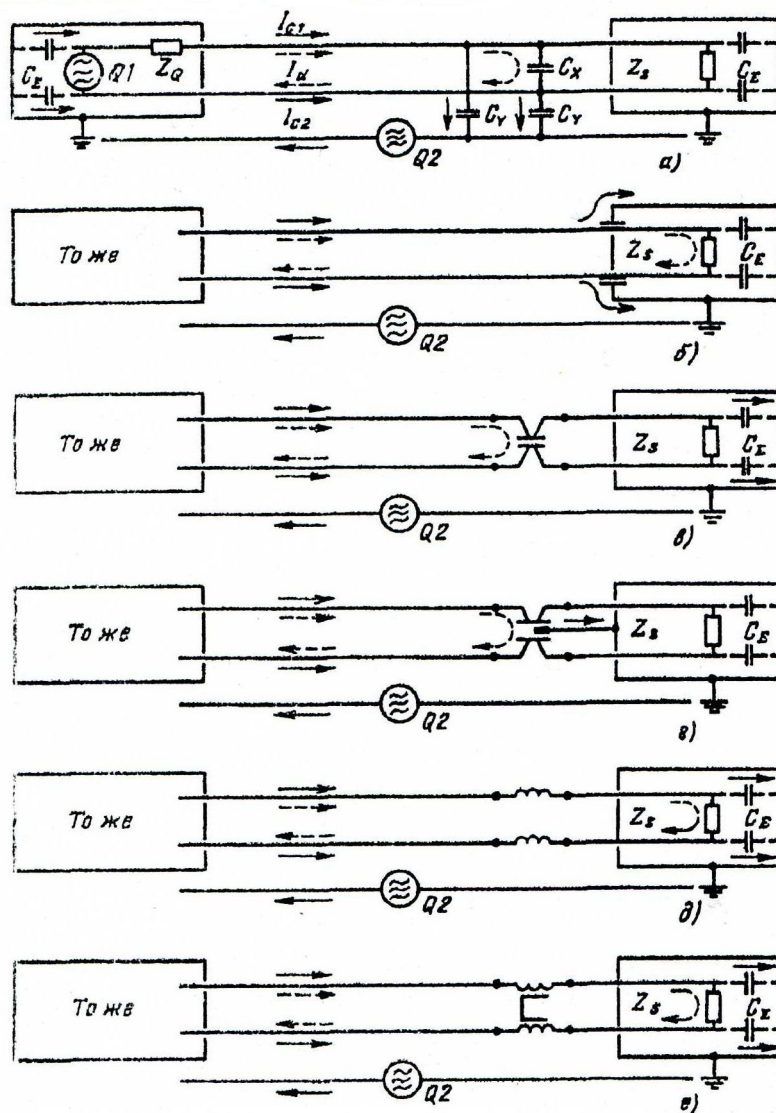


Рисунок 6.4 – Захист котушками індуктивності і конденсаторами від синфазних і протифазних струмів завад: Q_1, Q_2 – джерела протифазних I_d і синфазних I_c струмів завад; C_E – паразитні ємності схеми відносно заземленого корпусу

Оскільки в котушках індуктивності з сердечником магнітний ланцюг не замкнений, то їх магнітна проникність і індуктивність не залежать від робочого струму. Малі розміри мають котушки із скомпенсованим магнітним полем, у яких воно компенсується завдяки зустрічному ввімкненню струмових обмоток.

Кожен конденсатор крім ємності C , має паразитну індуктивність L_n , яка залежить від довжини вводів конденсатора. Вона найбільша у двохполюсних і найменша у коаксіальних конденсаторів-вводів. В свою чергу, кожна котушка індуктивності крім особистої індуктивності L має паразитну ємність C_n , тому для уявного опору існує залежність від частоти (рис. 6.5), що має резонансну точку.

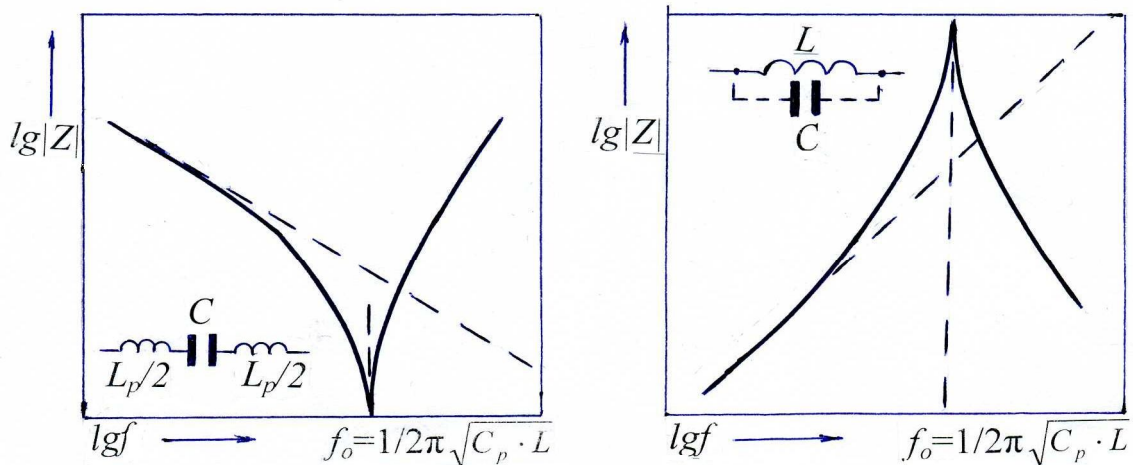


Рисунок 6.5 – Частотні залежності уявних опорів конденсатора – (а), і котушки індуктивності – (б)

Для таких конденсаторів уявний опір визначається з виразу

$$\dot{Z} = \frac{1}{j\omega C} + j\omega L_n \quad (6.12)$$

При відсутності L_n ідеальна характеристика визначається

$$\lg|\dot{Z}| = \lg(1/2\pi C) - \lg f, \quad (6.13)$$

а з врахуванням L_n реальна характеристика

$$\lg|\dot{Z}| = \lg\left|\frac{(f/f_0)^2 - 1}{2\pi f C}\right|, \quad (6.14)$$

де $f_0 = 1/2\pi\sqrt{CL_n}$.

Для котушок індуктивності уявний опір дорівнює

$$\dot{Z} = \frac{j\omega L \frac{1}{j\omega C_n}}{j\omega L + \frac{1}{j\omega C_n}}. \quad (6.15)$$

Ідеальна характеристика котушки без врахування C_n

$$\lg|\dot{Z}| = \lg 2\pi L + \lg f. \quad (6.16)$$

Реальна характеристика з врахуванням Сп

$$|\dot{Z}| = \lg \left| \frac{2\pi f L}{1 - (f/f_o)^2} \right|, \quad (6.17)$$

де $f_o = 1/2\pi\sqrt{C_n L}$.

Для прикладу знайдемо коефіцієнт затухання фільтра-поперечного конденсатора C_x (рис. 6.4, а), який має індуктивність при умові $\dot{Z}_o = \dot{Z}_n + \dot{Z}_A$, $A_{11}=1$, $A_{12}=0$, $A_{21}=1/Z_o$, $A_{22}=1$, тоді з (6.11) знаходимо

$$a_e = 20 \lg |1 + \dot{Z}_A / 2\dot{Z}_o|. \quad (6.18)$$

При уявному опорі конденсатора $\dot{Z}_o = 1/j\omega C + j\omega L_p$, та $\omega_o = 1/\sqrt{CL_p}$ для резонансної частоти коефіцієнт затухання

$$a_3 = 10 \lg \left[1 + \left(\frac{\omega C Z_A}{2[1 - (\omega/\omega_o)^2]} \right)^2 \right]. \quad (6.19)$$

Для нерезонансних частот: $\omega \neq \omega_o$

– при $(\omega/\omega_o)^2 > 1$ і $(\omega C Z_A / 2)^2 > 1 \dots \rightarrow a_e = 20 \lg \pi C Z_A + 20 \lg f \quad (6.20)$

– при $(\omega/\omega_o)^2 > 1$ і $(Z_A / 2\omega L_p)^2 > 1 \dots \rightarrow a_e = 20 \lg \pi Z_A / 4\pi L_p - 20 \lg f \quad (6.21)$

На рисунку 6.6 приведені розраховані згідно (6.19) і (6.20) залежності для конкретного значення Z_A , і залежності коефіцієнта затухання від частоти для різних L і C .

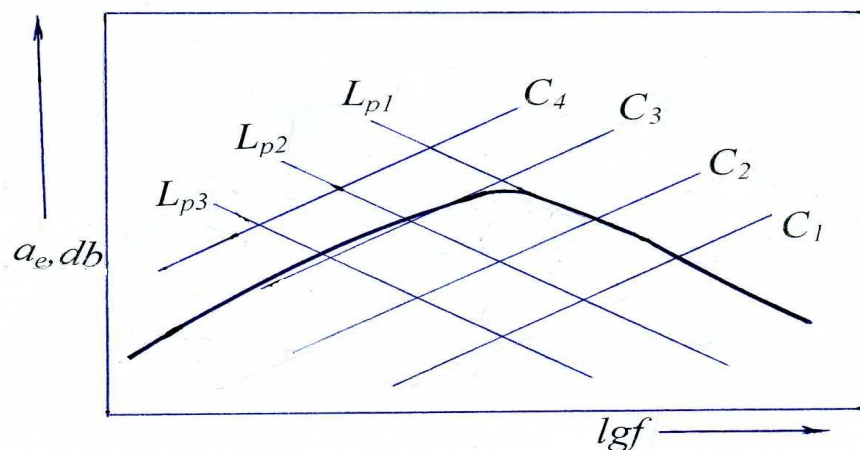


Рисунок 6.6 – Коефіцієнт затухання a_e фільтра в залежності від величин конденсаторів і індуктивностей і частоти f

$$L_{p3} > L_{p2} > L_{p1}; C_4 > C_3 > C_2 > C_1 \quad (6.21)$$

Згідно (6.19)–(6.21) робимо висновок, що при заданій ємності C коефіцієнт затухання a_e тим більший, чим більший Z_A і менша паразитна індуктивність конденсатора L_n . Звідки видно, що не кожний конденсатор придатний для фільтра і ємнісний фільтр більш придатний при високих опорах джерела і приймача (табл. 6.2).

На рисунку 6.7 наведені дані про затухання LC -фільтра з реальними елементами в залежності від діапазону частот, звідки видно, що коефіцієнт затухання визначається параметрами фільтра L , C або паразитними параметрами L_n , C_n .

При низьких частотах елементи фільтра можна вважати ідеальними, коефіцієнт затухання a_e збільшується пропорційно квадрату частоти f . Далі починається проявлятися вплив паразитних параметрів L_n , C_n і a_e залишається майже незмінним.

При високих частотах ефект демпфірування в основному визначається паразитними параметрами L_n , C_n і a_e зменшується зворотно пропорційно квадрату частоти f .

Для імпульсної завади необхідно спочатку визначити її спектр і тоді розраховувати параметри фільтра. При відомій формі імпульсу завади в першому наближенні діапазон пропускання фільтра повинен досягати частот $f_g = 1/\Delta t$, або $f_g = 1/T$ (при терміні наростання $T_r = 5$ нс, частота $f_g = 200$ МГц).

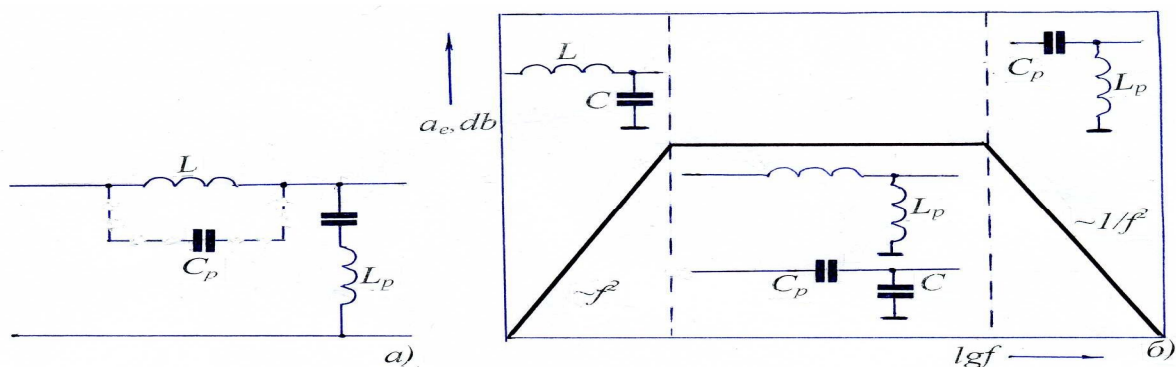


Рисунок 6.7 – Коефіцієнт затухання a_e фільтра LC :

а) – схема заміщення; б) – частотна залежність коефіцієнта затухання a_e

6.3 Мережні фільтри

Мережні фільтри для придушення завад виготовлені як фільтри низьких частот, що вільно пропускають напругу мережі (корисний сигнал) і фільтрують високочастотні імпульсні складові завад, що містяться в мережі. Їх використання вирішує подвійну задачу: захист пристроїв від завад, що поступають із мережі живлення, і зниження рівня завад, які генеруються цим приладом і розповсюджуються по проводам живлення.

Поздовжній елемент фільтра вибирають з врахуванням величини струму живлення з мережі. Зазвичай приймають, що опір зі сторони мережі малий, а зі сторони навантаження – великий. Тому для захисту приладів від завад зі сторони мережі використовують фільтри (стрічка 3, табл. 6.2).

На рисунку 6.8, рисунку 6.9 наведено схеми фільтрів, що містять котушку індуктивності із скомпенсованим магнітним полем. Фільтр містить конденсатор C_x для демпфірування симетричних напруг завади і два конденсатора C_y для відводу асиметричних струмів завади. Через ці конденсатори, що ввімкнені між проводом мережі і заземленим корпусом, протікає струм, який не повинен перевищувати величини $0,75 \div 3$ мА, що відповідає граничному значенню ємності конденсатора C_y , тобто виконувати вимоги норм ТБ, наприклад, VDE0565

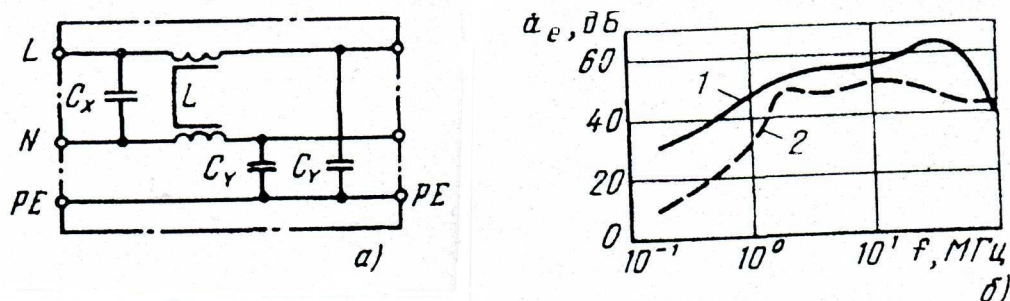


Рисунок 6.8 – Мережний фільтр на 250 В, 1 А: а)– схема; б) – частотна залежність α_e ; 1 – асиметричні завади; 2 – симетричні завади

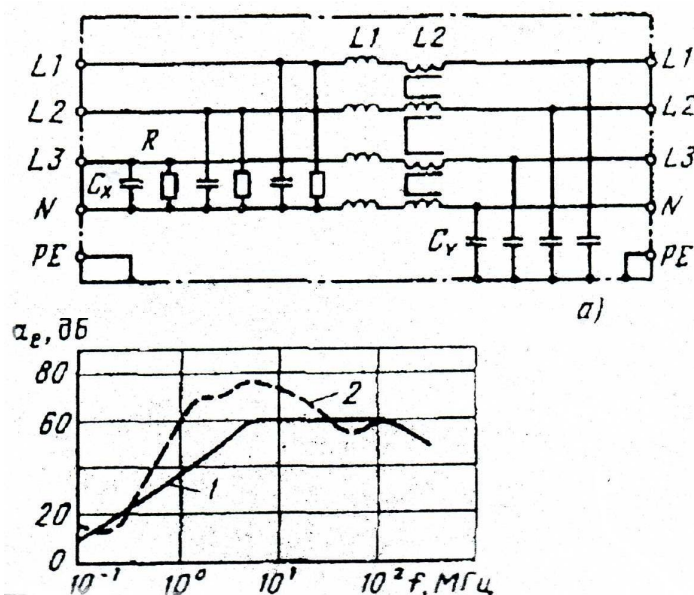


Рисунок 6.9 – Трьохфазний мережний фільтр на 440 В, 16 А: а) – схема, $L1 = 60$ мкГн, $L2 = 4,4$ мГн, $C_x = 2,2$ мкФ, $C_y = 15$ нФ, R – розрядні опори; б) – частотна залежність α_e : 1 – асиметричні завади; 2 – симетричні завади

6.4 Обмежувачі перенапруг

Обмежувачі перенапруг – це клас приладів для зниження перенапружень в електроенергетичних і інформаційно-електронних системах, які виникають при ударах блискавки, розрядах статичної електрики, комутаційних процесів та ін. Для забезпечення електромагнітної сумісності вони виконують захисні функції запобігання виходу з ладу електричних і електронних приладів і порушення нормального функціонування системи в цілому.

Принцип дії обмежувачів базується на використанні резисторів R_B , які мають нелінійну вольт-амперну характеристику (рис. 6.10). Особливістю їх є те, що при робочих напругах резистори мають дуже великий опір, а при перевищенні напруги – опір різко зменшується. Разом з опором джерела завади, обмежувач утворює схему нелінійного дільника напруги (рис. 6.10, б), який і знижує перехідне перенапруження до допустимої величини, що не перевищує електричну міцність захищеного елемента.

$$U''_{3t} = U_{3t} - I''_{3t} R_Q \quad (6.22)$$

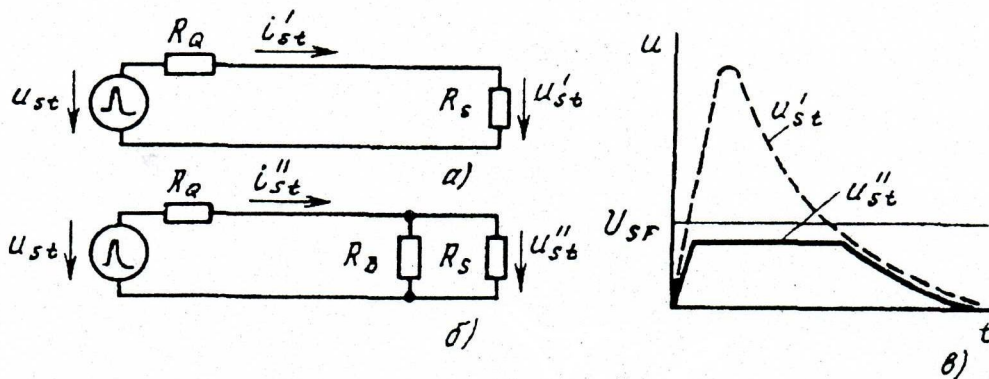


Рисунок 6.10 – Обмеження перенапружень за допомогою нелінійного резистора R_B : а) – схема без захисту; б) – схема із захистом; в) – зміна напруги з часом; U_{SF} – імпульсна міцність вхідної мережі

6.5 Захисні елементи

Для захисту від перенапружень використовують також захисні розрядні проміжки, варистори і лавинні діоди. Оскільки принцип дії їх суттєво різний, то і робочі характеристики суттєво відрізняються: це, насамперед,

- напруга і час спрацювання;
- рівні обмеження та ступень точності обмеження напруги;
- допустиме струмове навантаження;
- остаточна напруга, загасаючі властивості та ін.

Розрядники виготовляють у вигляді повітряних, газонаповнених пристроїв або елементів із ковзним поверхневим розрядом і усі вони виконують функцію грубого захисту.

Конструктивно – це два електрода, рознесених на певну відстань, які розміщені в скляному або керамічному корпусі наповненому інертним газом. Оскільки опір такого проміжку $\sim 10^{10}$ Ом, а ємність менша за 10 пФ, то вони не впливають на захищену систему.

При перевищенні робочої напруги до U_z розрядний проміжок пробивається, при цьому його опір зменшується на 10 порядків і напруга на системі зніжується до величини U_G (рис. 6. 11).

Напруга пробою газонаповненого розрядника U_z залежить від діючої напруги du/dt (при $du/dt = 100$ В/с визначається статична U_{zc} ; а при $du/dt = 1$ кВт/мкс – динамічна напруга пробою розрядника $U_{zd} = (600 \div 700 \text{ В})$.

При дуже коротких (менших 30 нс) імпульсах напруги газонаповнений розрядник не спрацює.

Газонаповнені розрядники надійно пропускають стандартні імпульси струмів (8/20 мкс) амплітудою до декількох десятків кілоампер, але не спроможні самостійно гасити струми, що не перевищують 1 А. Тому їх вмикають послідовно із захисним апаратом, який спроможний гасити супроводжуючий струм.

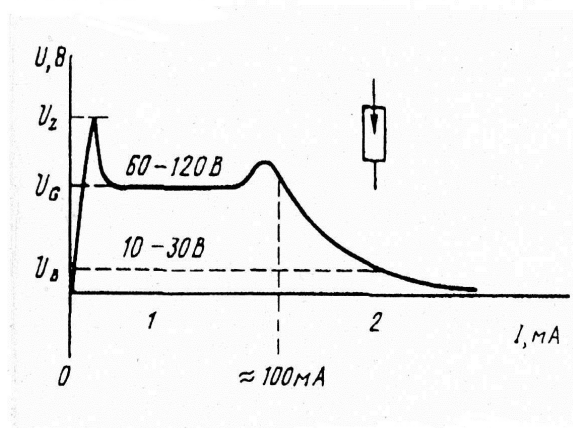


Рисунок 6.11 – Вольт-амперна характеристика газонаповненого розрядника:

U_z – напруга запалювання; U_G – напруга гасіння; 1 – ділянка початкових тліючих розрядів; 2 – ділянка дугових розрядів

Повітряні захисні проміжки. Їх виконують у вигляді двох електродів, що розташовані на визначеній відстані: – по розрядним і робочим характеристикам вони близькі до газонаповнених розрядників. Оскільки вони не спроможні відсікати супроводжуючий струм, то їх застосовують лише в комбінації з запобіжниками або варисторами в якості дугогасників.

Використовують також закриті повітряні (так звані розділюючі) проміжки в місцях зближення грозозахисних пристроїв з іншими заземленими частинами пристроїв або металевими конструкціями, які по вимогам корозійної стійкості, не можуть бути гальванічно з'єднані.

Розрядники на основі ковзного розряду. Містять між електродами ізоляцію, тому їх вольт-секундні характеристики більш пологі і вони, незалежно від крутизни імпульсу, можуть обмежувати перенапруги до величини 3 кВ. Вони також спроможні гасити супровідний струм, тому найбільш придатні для грубого захисту в ланцюгах електроживлення.

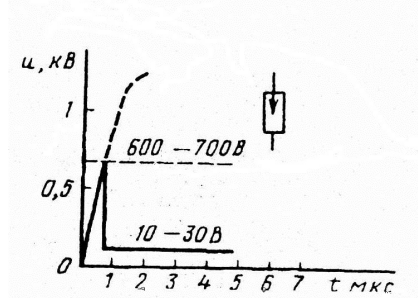


Рисунок 6.12 – Типова характеристика запалення газонаповненого розрядника

Варистори (Variable Resistors) – це елементи з симетричною вольт-амперною характеристикою (рис. 6.13).

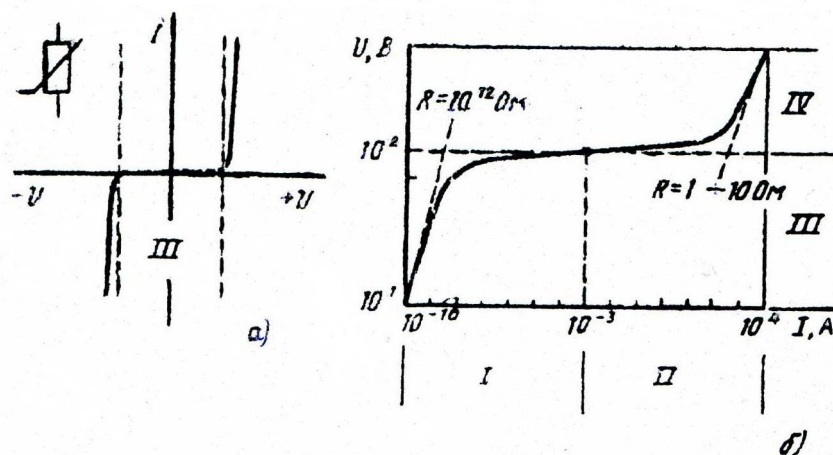


Рисунок 6.13 – Вольт-амперні характеристики варисторів в лінійних –(а) і логарифмічних координатах –(б)

При $I > 0$ вона має вид

$$I = KU^\alpha, \quad (6.23)$$

де K – константа, залежна від розміру резистора, α – ступень нелінійності варистора, яка у сучасних металооксидних варисторів досягає 40.

Принцип дії варистора полягає у зменшенні його опору R на багато порядків при перевищенні робочої напруги

$$R = 1/KU^{\alpha-1}. \quad (6.24)$$

Час обмеження перенапруги складає десятки наносекунд і визначається індуктивністю струмопроводів, а оскільки їх особиста ємність складає порядку $0,4 \div 40$ пФ, то їх не можливо використовувати в високочастотних системах. Захисна спроможність варисторів може бути як в діапазоні низьких, так і високих напруг, при цьому вони спроможні поглинути значну енергію. При періодичних тривалих перенапругах варистор нагрівається і може відбутися його тепловий пробій.

Кремнієві лавинні діоди (Z-діоди, стабілітрони, напругою $U_z = 3 \div 200$ В) – використовують для стабілізації напруги і захисту від перенапруг в електронних схемах. Вони мають властивість не пошкоджуватись при напругах, які перевищують граничні, в яких вони знаходяться в закритому стані.

Існують також спеціальні лавинні діоди (супрессдіоди, трансвільдіоди, та Z-діоди), які мають підвищену пропускну спроможність по струму, малий час (пікосекунди) запізнення, велику поглинаючу енергією. На рисунку 6.14 наведені характеристики Z-діода та стабілітрона, які дуже схожі. Рівні обмеження перенапруг ними складають $6 \div 440$ В.

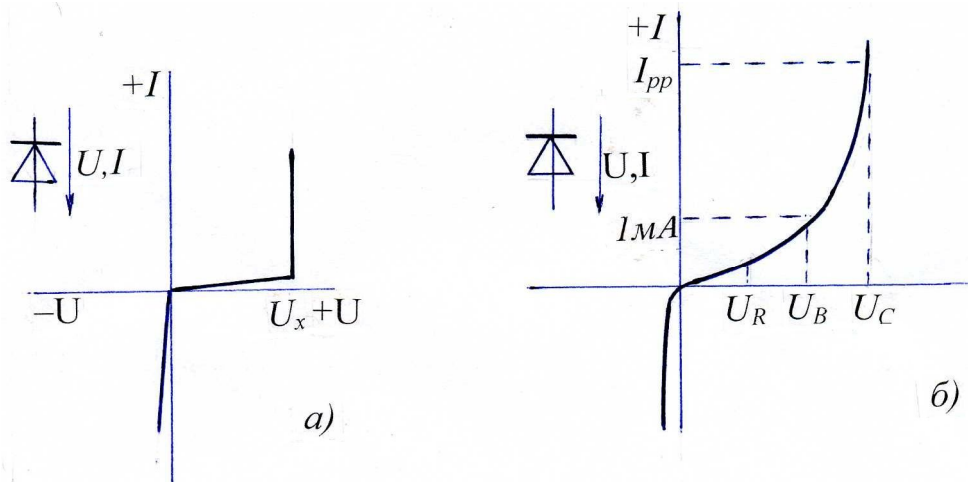


Рисунок 6.14 – Вольт-амперні характеристики Z-діода – (а) та обмежувального стабілітрона –(б): U_R – максимальна напруга закритого стабілітрона; U_B – напруга початку обмеження, при якому струм $I = 1$ мА; U_C – напруга обмеження імпульсу струму $I_{pp} = 8/20$ мкс

6.6 Екранування ліній

Екранування застосовують для послаблення електричних, магнітних та електромагнітних полів на елементи, прилади, кабелі, приміщення, які генеруються різноманітними джерелами.

Екрани встановлюють між джерелом і приймачем завад для зниження напруженості E_o , H_o діючих полів до величини E_1 , H_1 за екраном (рис. 6.15).

Принцип екранування обумовлений наведенням на поверхні екрана зарядів або індукування в ньому струмів, поле яких накладається на сигнал джерела завад, послабляючи його. Ефективність екранування суттєво залежить від частоти поля, електропровідності і магнітної проникності матеріалу екрана, конфігурації і розмірів екрана.

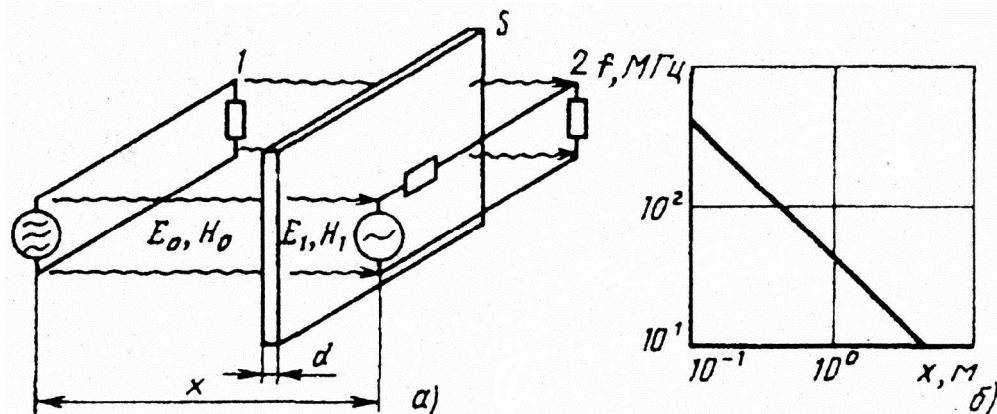


Рисунок 6.15 – Принцип захисту контуру від зовнішніх електричних і магнітних полів: а) взаємне розташування контурів 1, 2 і екрана S ; б) границя між умовами ближнього (нижня ліва частина) і дальнього (верхня права частина) полів

Розглянемо співвідношення параметрів полів і вплив характеристик екрану на їх величину: позначимо коефіцієнт, обумовлений поглинанням енергії поля, α_{3A} і коефіцієнт затухання обумовлений частково відбиттям – α_{3R} . Результуючий коефіцієнт затухання, дБ визначаємо як $\alpha_3 = \alpha_{3R} + \alpha_{3A}$:

тоді

$$\alpha_3 = 20 \lg(E_o / E_1), \quad (6.25)$$

$$\alpha_3 = 20 \lg(H_o / H_1). \quad (6.26)$$

Для розуміння зв'язків між коефіцієнтами затухання, характеристиками магнітного поля, розмірами та властивостями матеріалу екрану введемо поняття повного опору по аналогії з розповсюдженням хвиль в електричній довгій двохпровідній лінії. В залежності від відстані x

між джерелом і приймачем і частоти f в ближній і дальній зонах коефіцієнти затухання α_{3R} , α_{3A} визначаються з виразу:

– для магнітного поля в ближній зоні ($x < c/2\pi f$) коефіцієнт відбиття

$$\alpha_{3R} = [15 - 10 \lg(\mu_r/\sigma_r) + 20 \lg(x/x_0)] + 10 \lg(f/f_0); \quad (6.27)$$

– для електричного поля у цій зоні ($x < c/2\pi f$)

$$\alpha_{3R} = [202 - 10 \lg(\mu_r/\sigma_r) - 20 \lg(x/x_0)] - 30 \lg(f/f_0); \quad (6.28)$$

– для електричного поля в дальній зоні ($x > c/2\pi f$)

$$\alpha_{3R} = [168 - 10 \lg((\mu_r/\sigma_r) - 20 \lg(x/x_0)] - 10 \lg(f/f_0); \quad (6.29)$$

– коефіцієнт поглинання для ближньої та дальньої зони

$$\alpha_{3A} = [(0,1314 d/d_0 \sqrt{\mu_r \sigma_r}) \sqrt{f/f_0}], \quad (6.30)$$

де μ_r , σ_r – відносна магнітна проникність та електропровідність, віднесена до електропровідності міді ($\sigma_m = 5,8 \cdot 10^7$ См/м; $f_0 = 1$ Гц – базова частота; d – товщина екрану, віднесена до $f_0 = 1$ мм; $x_0 = 1$ м.

Таким чином коефіцієнт затухання залежить від частоти f , товщини d і електропровідності σ матеріалу екрана.

Ефективність екрана оцінюють наступним чином:

- якщо α_3 не вищий за 10 дБ – то екранування не достатнє;
- при $30 > \alpha_3 < 60$ дБ – достатнє;
- при $60 > \alpha_3 < 90$ дБ – хороше.

Ефективність екранування залежить також від наявності дефектів і отворів в екрані, тріщин, кабельних вводів, технологічних отворів.

Матеріали для екранів. Для екранів використовують немагнітні (мідь, алюміній) і феромагнітні матеріали. Екрануюча дія немагнітних матеріалів ($\mu_r = 1$, $\sigma_r = 0,6 \div 1$) відбувається завдяки магнітних полів, що утворюються вихровими струмами. Постійне магнітне поле при цьому не екранується, а низькочастотне змінне послаблюється мало. Навпаки, електричні поля такими екранами демпфіруються дуже ефективно.

Екрани з феромагнітних матеріалів ($\mu_r \gg 1$, $\sigma_r < 1$) в діапазоні низьких частот послабляють електричні поля гірше, ніж немагнітні, але вони суттєво послабляють постійні магнітні поля.

З підвищенням частоти екрануюча дія електричних і магнітних полів зростає, що витікає з (6.30).

Матеріалами екранів слугують металева фольга з високою магнітною проникністю, металеві стрічки для кабелів, напилені на пластмасу і скло

металеві покриття, комбіновані пластмасові матеріали з металевими порошками та ін.

Споруди з залізною арматурою послаблюють зовнішня поля на $25 \div 30$ дБ.

Екранування приладів і приміщень. Металеві корпуси електронних приладів забезпечують певний захист від проникнення електромагнітних завад при умові, що усі отвори та щілини усунуті шляхом ущільнювання. Це забезпечує коефіцієнт затухання інтенсивності завади на $40 \div 100$ дБ в діапазоні частот $30 \text{ МГц} \div 1 \text{ ГГц}$.

Ефективне екранування електронних приладів здійснюється шляхом металізації поверхні корпусу. В деяких випадках, таких як ВЦ, в промисловості, банках, дослідницьких центрах та ін. – виконують електромагнітне екранування цілих приміщень з метою не тільки захисту від проникнення шкідливого впливу зовні, але також і витоку конфіденційної інформації.

Сучасне екранування приміщень виконують по модульному принципу, який полягає у створенні однорідної провідної і відбиваючої електромагнітне випромінювання оболонки з коефіцієнтом затухання $80 \div 100$ дБ.

Екранування кабелів. Кабельні екрани необхідні для зменшення впливу напруг завад і випромінювання завад кабелями, а також забезпечення розв'язки проводів, що прокладаються разом з кабелями. При цьому суттєву роль відіграє спосіб заземлення екрану:

- якщо він заземлений з одного кінця, то зменшується поперечна напруга поля E завдяки байпасної дії екрану;

- при двосторонньому заземленні екрана утворюється замкнений контур, у якому при зміні магнітного поля H в часі індуктується струм I і поздовжнє поле при цьому зменшується $\dot{U}_1 = \dot{Z}_k I < \dot{U}_1$, де \dot{Z}_k – повний комплексний опір зв'язку екранованого кабелю.

При недостатньому затуханні використовують два ізольованих один від одного екрана. При двосторонньому заземленні внутрішнього екрана поздовжна напруга

$$\dot{U}_1 = I \frac{\dot{Z}_{K_a} \dot{Z}_{K_i}}{\dot{Z}_{K_a} + \dot{Z}_{K_i} + j\omega L}, \quad (6.31)$$

а при односторонньому заземленні

$$\dot{U}_1 = I \frac{\dot{Z}_{K_a} \dot{Z}_{K_i}}{\dot{Z}_{K_a} + \dot{Z}_{K_i} + 1/j\omega L}, \quad (6.32)$$

де L – індуктивність з'єднання, C – ємність між екранами, \dot{Z}_{K_a} і \dot{Z}_{K_i} – повні комплексні опори внутрішнього і зовнішнього екранів.

З цих рівнянь видно, що двостороннє заземлений внутрішній екран при низьких частотах мало ефективний, оскільки паралельно з'єднані лише \dot{Z}_{K_a} і \dot{Z}_{K_i} , а при високих частотах ($|j\omega L| \gg |\dot{Z}_{K_a} + \dot{Z}_{K_i}|$) – значно краще екранування, ніж при одному екрані.

При односторонньому заземленні внутрішнього екрану ситуація зворотна.

Таким чином, в залежності від частоти завади, внутрішній екран необхідно заземлювати з одної або з обох сторін.

Зовнішній екран не варто заземлювати всередині корпусу, бо при цьому втрачається ефективність екранування корпусу.

Для найбільш ефективного використання кабельних екранів, необхідно:

- звичайні екрани і зовнішні оболонки подвійних екранів повинні мати на обох кінцях хороші контакти з корпусами приладів;
- внутрішній екран в залежності від частоти поля необхідно заземлювати з однієї або двох сторін;
- зовнішній екран не можна вводити всередину приладу або там заземлювати, оскільки при цьому втрачається екранна дія корпусу.

Отже, екранування кабелів слугує і для того, щоб знизити вплив різниці потенціалів між точками заземлення корпусів приладів, які пов'язані кабелями.

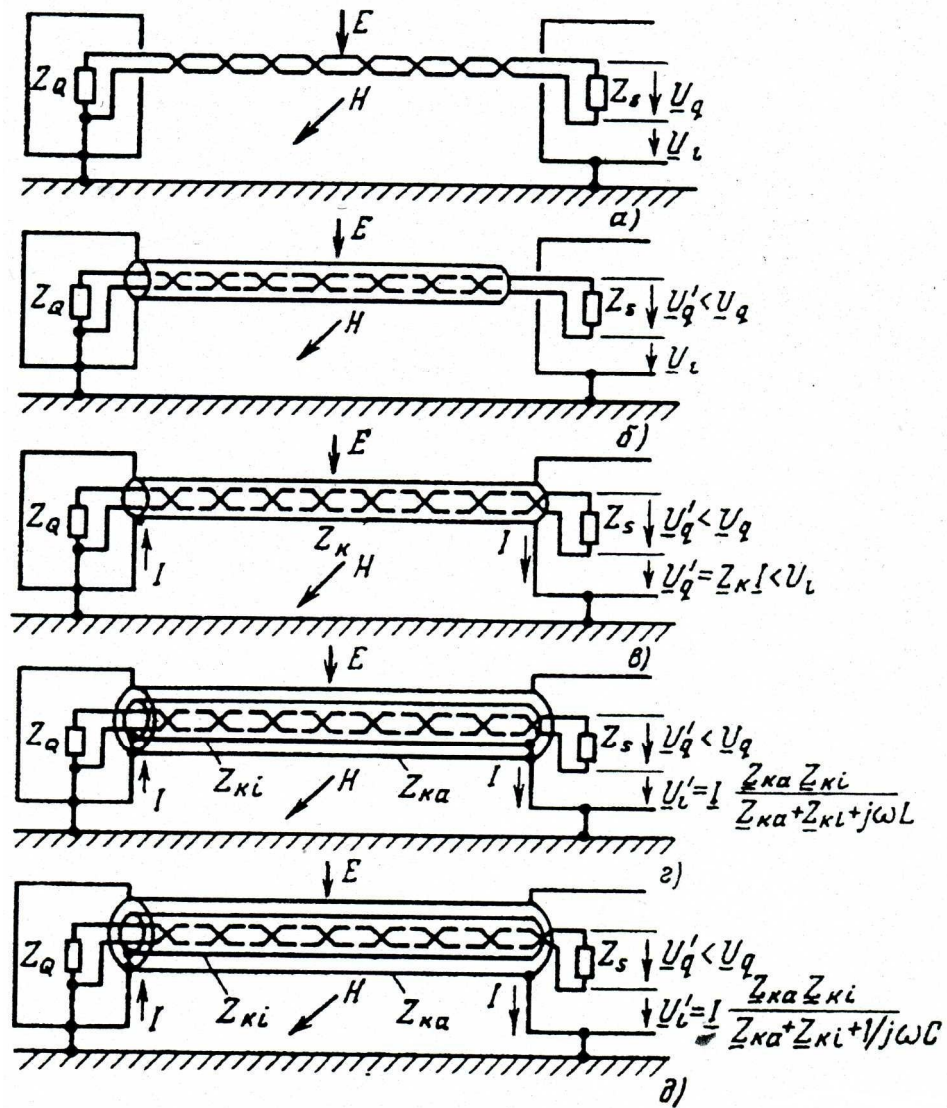


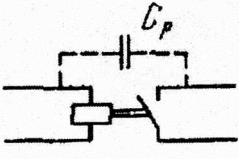
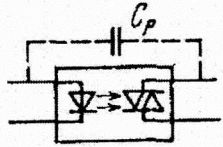
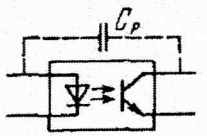
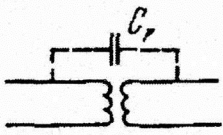
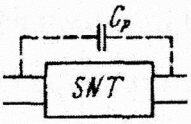
Рисунок 6.16 – Варіанти екранування кабелів:

- а) – неекраниваний кабель; б) – одностороннє заземлення екрану;
- в) – двохстороннє заземлення; г) – кабель з подвійним екраном і двохстороннім заземленням внутрішнього екрану; д) – кабель з подвійним екраном і одностороннім заземленням внутрішнього екрану

6.7 Розділяючі елементи

Розділяючі елементи використовують для гальванічної розв'язки зовнішніх і внутрішніх струмових контурів з різницею потенціалів у декілька кіловольт.

Таблиця 6.3 – Розділяючі елементи гальванічної розв’язки

Роздільний елемент	Позначення на схемі	Ємність зв’язку C_n	Час затримки
Електромеханічне реле		До 5 пФ	$0,5 \div 20$ мс
Оптичний зв’язок		До 1 пФ	$10^{-4} \div 0,5$ мс
Твердотільне реле		$5 \div 10$ пФ	$8 \div 10$ мс
Розділяючий трансформатор		$10 \div 100$ пФ	—
Розділюючі схеми		До 1000 пФ	—

Це необхідно, якщо електронні системи автоматизації та програмного управління, комп’ютерні та процесорні системи містять вхідні інформаційні проводи і мають вихідні потенціальні кабелі управління, тому виникає небезпека порушення функціонування системи, завдяки виникненню синфазних напруг завад.

Ефективним заходом протидії такої небезпеки є гальванічна розв’язка зовнішніх і внутрішніх струмових контурів, для чого використовують розділюючі елементи. Ефективність такого розділення визначається паразитною ємністю C_n елемента, – яка повинна бути можливо мінімальною.

7 ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРОМАНІТНОЇ ОБСТАНОВКИ НА ОБ'ЄКТИ

7.1 Задачі визначення ЕМО

Для визначення ЕМО необхідно провести ряд вимірів і розрахунків, необхідних для отримання даних про максимальний рівень електромагнітних полів, наведених струмів і напруг, розрядів статичної електрики та ін., і їх вплив на системи релейного захисту і управління електроенергетичних об'єктів при нормальних та аварійних режимах.

Для отримання достовірних даних числового аналізу, крім розрахунків, необхідно проведення натурних і імітаційних експериментів. Імітація електромагнітних збуджень суттєво розширює можливості визначення рівня електромагнітних завад, оскільки можливості натурних експериментів на діючому об'єкті обмежені.

Імітація електромагнітних збуджень, суттєво розширює можливості по визначенню рівня електромагнітних завад. В результаті роботи необхідно визначити максимальні значення рівня завад на системи релейного захисту і технологічного управління при нормальному і аварійному режимах, які повинні нормально функціонувати при любых режимах.

7.2 Програма робіт по визначенню ЕМО

Роботи по визначенню ЕМО на об'єкті мають такі етапи:

- отримання вихідних даних про енергооб'єкта;
- експериментально-розрахункове визначення ЕМО на об'єкті;
- визначення відповідності між рівнями завадостійкості пристроїв і ЕМО на об'єкті.

Для визначення рівня електромагнітних завад на системах релейного захисту і технологічних системах, на шинах високої напруги необхідно знати:

- електричну схему і розташування первинних ланцюгів; траси прокладки кабелів та їх типи;
- тип і розташування силового обладнання;
- призначення і розташування релейного захисту і системи технологічного управління;
- конструкцію заземлюючих пристроїв (питомий опір ґрунту і імпульсний опір заземлення обладнання, до якого надходять кабелі пристроїв релейного захисту);
- для визначення дії струмі і напруг промислової частоти необхідно мати дані про струми короткого замикання на землю (струми $3I_0$).

Ці дані можуть бути отримані лише шляхом експерименту.

Для визначення впливу електромагнітних полів радіочастотного діапазону необхідні дані про наявні на об'єкті радіопередаючі пристрої.

Аналіз рівня електромагнітного впливу по мережах електроживлення постійним і змінним струмом здійснюється на основі виконавчій схемі живлення об'єкта, типах і місці розташування пристроїв, ввімкнених у схему живлення, даних про трасу прокладки і типи кабельних ліній.

На цьому етапі складається робоча програма проведення експериментальних досліджень на енергооб'єкті.

При проведенні вимірів на об'єкті визначають напруженість електромагнітних полів радіочастотного діапазону, напруженість поля промислової частоти при нормальних режимах, імпульсні завади в ланцюгах постійного і змінного струму, якість електроспоживання постійним і змінним струмом систем релейного захисту і технологічного управління, характеристики покриття підлоги і електричні потенціали тіла людини від заряду статичної електрики.

При імітації електромагнітних збуджень визначають завади від ударів блискавки, коротких замкнень, комутацій в первинних ланцюгах. Після вимірів здійснюють перерахунок отриманих даних до реальних умов.

При цьому визначають ряд інших параметрів, наприклад коефіцієнт екранування кабелів, які неможливо визначити розрахунками. Розраховують також найбільш небезпечні режими на основі результатів вимірів, використовуючи програми для ПЕВМ.

7.3 Вплив завад на кабелі систем

При однофазному КЗ на землю на шинах ПС ВН потенціал контуру заземлення енергооб'єкту розподілений нерівномірно і при перевищенні електричної міцності ізоляції кабелів, можливе зворотне перекриття із землі на жили кабелів. Крім того, струм однофазного КЗ, рухаючись по заземленим оболонкам і екранам кабелів, при перевищенні по термостійкості струмових навантажень, призведе до пошкодження цих кабелів.

Від точки КЗ струм повертається в нейтраль трансформатора і в енергосистему через заземлюючий пристрій і безпосередньо через землю (рис. 7.1, а).

Для визначення можливого рівня діючих на кабелі систем релейного захисту і технологічного управління напруг і струмів при однофазному КЗ, вимірюють розподіл потенціалів і струмів на заземлюючому пристрої при імітації КЗ. Вимірюють також різницю потенціалів між точкою КЗ і заземлюючим пристроєм релейного щита, після чого результати перераховують на реальні струми КЗ. Розраховують розподіл струмів і

потенціалів при коротких замкненнях в різних точках на шинах високої напруги і порівнюють з результатами вимірів.

По результатам розрахунків визначають максимальні значення напруг і струмів промислової частоти, які діють на системи релейного захисту і технологічного управління при однофазних коротких замиканнях.

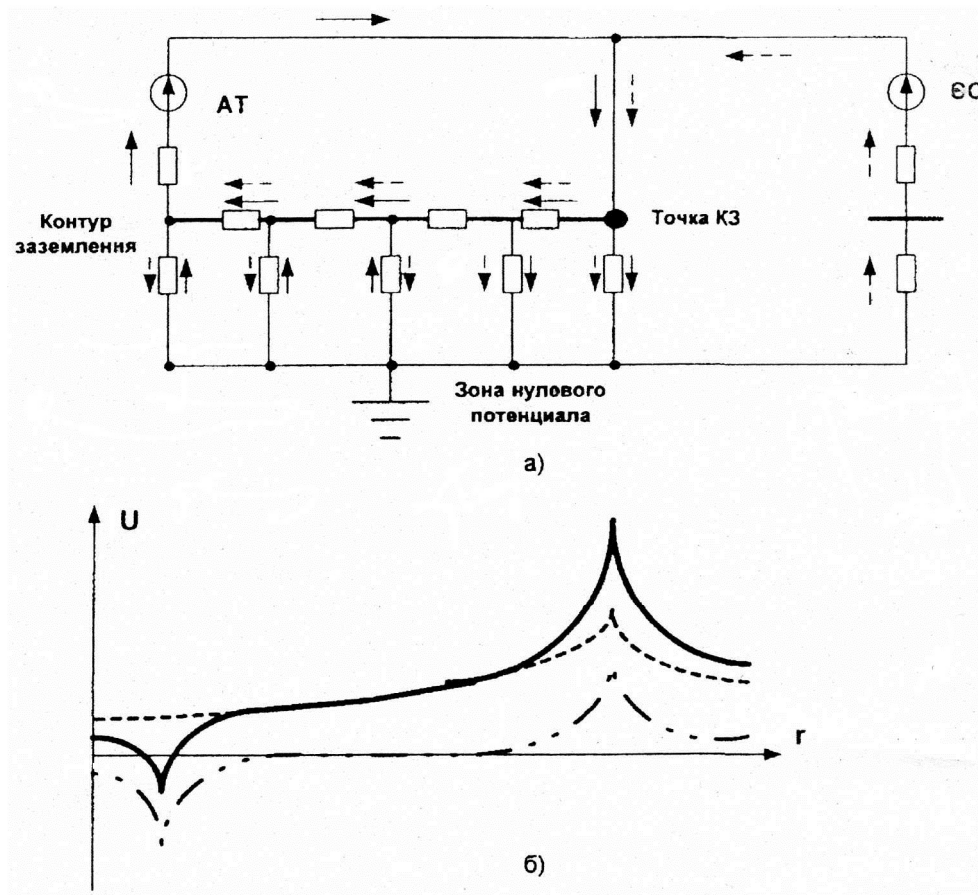


Рисунок 7.1 – Однофазне КЗ на шинах ПС ВН: а) – схема розтікання струму в контурі заземлення ПС; б) – розподіл потенціалу на заземлюючому пристрої ПС

7.4 Імпульсні завади при перехідних процесах в ланцюгах ВН

Виникнення імпульсних завад в ланцюгах вторинної комутації пов'язано з такими видами збуджень у первинних ланцюгах:

- КЗ на землю в ланцюгах ВН;
- комутації роз'єднувачами, короткозамикачами і вимикачами в ланцюгах ВН;
- робота розрядників.

При комутаціях і КЗ на землю, внаслідок перехідних процесів, в ланцюгах високої напруги відбувається розряд ємностей обладнання і шин

на землю і через заземлювач протікає імпульсний струм високої частоти. При цьому на заземлюючому пристрої обладнання і в точці КЗ відбувається імпульсний підйом потенціалу, який з певним коефіцієнтом послаблення передається по кабелям до входу систем релейного захисту і технологічного управління.

Для визначення параметрів імпульсних завад проводять імітаційні випробування за допомогою генератора високочастотних імпульсів. При цьому один вивід генератора приєднують до заземлюючого провідника обладнання, до якого приєднані кабелі від систем релейного захисту і технологічного управління, а другий вивід генератора заземлюють на відстані не менш, ніж 50 м. від даного обладнання. Після чого в заземлення обладнання подають імпульсний струм амплітудою до 10 А з декрементом колювання 3÷5, частотою 0,5, 1,0, 2,0 МГц. При цьому здійснюють вимірювання імпульсних завад на входах пристроїв автоматичних і автоматизованих систем технологічного управління.

Також вимірюють імпульсний потенціал заземлюючого пристрою відносно точки, віддаленої від місця вводу струму на відстані не менш 50 м. в протилежному напрямку від точки заземлення генератора.

Висока частота призводить до різко нерівномірного розподілу потенціалу на заземлюючому пристрою. На відстані 50 м. від точки вводу імпульсного струму потенціал знижується більш, ніж в 10 разів навіть при опорі ґрунту 500 Ом.м.

На реальних об'єктах частота імпульсних завад може колюватись в діапазоні від десятків кілогерц до десятків мегагерц.

Результати вимірювань при імітації імпульсних завад приводяться до реального значення високочастотної складової струму КЗ. Величину реального струму визначають шляхом розрахунку перехідного процесу на шинах розподільчого пристрою при комутаціях і КЗ на землю, шляхом множення результатів виміру на коефіцієнт перерахунку

$$K_{пер} = I_{реал} / I_{вимір} , \quad (7.1)$$

де $I_{реал}$ – струм з обладнання в контур заземлення при комутаціях або однофазному КЗ на землю; $I_{вимір}$ – виміряний струм в даних точках підключення ГВЧІ.

При комутаціях первинного обладнання і при однофазному КЗ по ошиновці розподільчого пристрою протікають імпульсні струми. Електромагнітні поля від цих струмів взаємодіють з кабелями ланцюгів вторинної комутації, внаслідок чого в них наводяться імпульсні завади.

Найбільший рівень польових завад виникає при КЗ на шинах високої напруги.

Визначення імпульсних завад здійснюють наступним чином.

Розрахунком визначають найбільш небезпечні види комутацій.

На об'єкті проводять імітації комутаційних процесів за допомогою генератора ВЧ імпульсів і контрольного проводу, прокладеного по трасі прокладки вторинних кабелів.

Визначають реальний коефіцієнт екранування завад між сусідніми кабелями і здійснюють вимірювання завад на кабелях захисту і на контрольному проводі при реальних комутаціях (рис. 7.2).

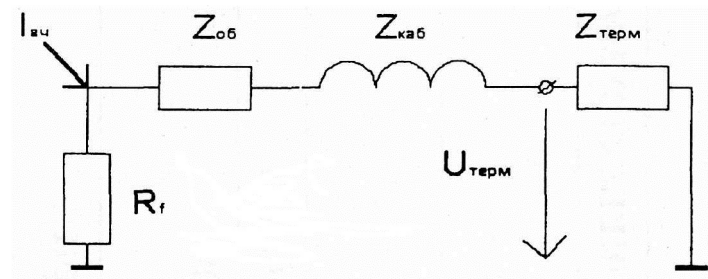


Рисунок 7.2 – Схема для розрахунку синфазної напруги при однофазному КЗ на шинах ВН енергооб'єкта:

$I_{вч}$ – високочастотна складова струму КЗ, R_f – імпульсний опір заземлення, $Z_{об}$ – вхідний опір обладнання відносно землі, $Z_{каб}$ – опір контрольного кабелю, Z_m – вхідний опір терміналу

7.5 Імпульсні завади при ударах блискавки

При атмосферному розряді можливі такі наслідки дії струму блискавки:

- термічна дія струму блискавки на заземлюючі провідники, оболонки і екрани кабелів;
- зворотні перекриття з землі на кабелі;
- польові наводки на контрольних кабелях і вплив імпульсних магнітних полів на обладнання.

Визначення рівня польових завад, наведених в кабелях, визначають розрахунками. Параметри струму блискавки згідно рекомендації МЕК 1312-1 наступні:

- максимальний імпульсний струм $I_B = 100$ кА;
- тривалість фронту імпульсу $t_{фр} = 10$ мс;
- при розрахунках наведених напруг на кабелях $I_B = 25$ кА, $t_{фр} = 0,25$ мкс.

Польові наводки можна оцінити по потужності випромінювання джерела завади, використовуючи вираз для потужності випромінювання дипольних антен

$$P = \frac{(I \cdot l \cdot \omega)^2}{12\pi \cdot \epsilon_o \cdot c^3}, \quad (7.2)$$

де I – амплітуда струму, l – довжина антени, ω – кругова частота, ϵ_o – електрична постійна, c – швидкість світла.

Для струму блискавки еквівалентну частоту можна визначити

$$\omega = \frac{\pi}{2\tau}, \quad (7.3)$$

де τ – час зростання струму блискавки.

При $l = 100$ м для імпульсу струму позитивної блискавки : (100 кА, 10/350 мкс) (МЕК) – маємо потужність $P = 2,8 \cdot 10^7$ Вт, а для наступного імпульсу: (25 кА, 0,25/100 мкс) $P = 10^{10}$ Вт.

При розрахунках польових наводок імпульс струму позитивної блискавки можна не розглядати.

Для відкритих розподільчих пристроїв визначають напруги в кабелях вторинної комутації при ударах блискавки и в блискавководи, розташовані поблизу траси прокладки кабелів. Для будівель і споруд визначають наругу, яка наводиться в кабелях при протіканні струму блискавки по струмовідводам блискавкоприймача будівлі.

Необхідно враховувати коефіцієнт екранування електромагнітного поля блискавки, оскільки, зазвичай, застосовують екрановані кабелі, проложені в коробах.

Принцип дії екрану полягає в тому, що електромагнітне поле індуктує в екрані струм, магнітне поле якого компенсує діюче поле. В залежності від співвідношення довжини кабелю l і довжини хвилі λ , цей струм замикається різними шляхами. При $\lambda > l$ струм в екрані замикається через заземлення на кінцях екрана і землю, а при $\lambda < l$ – безпосередньо в самому екрані.

Блискавка генерує наводки частотою ~ 1 МГц, що відповідає довжині хвилі $\lambda = 300$ м.

Оскільки довжина кабельних ліній вторинних ланцюгів не перевищує цю величину, то струм в екрані замикається через заземлюючі екрани провідника і ґрунт. Коефіцієнт екранування $k > 1$ для лінії із заземленим з обох сторін екраном визначається з виразу

$$k = \frac{R_Q + R_E + j\omega L_E}{Z_t l + j\omega L_g}, \quad (7.4)$$

де l – довжина системи; $Z_t = (R_E + j\omega L_t) / l$ – погонний передаточний опір; R_E – активний опір екрану; $L_t = M_{IE} - L_E$ – передаточна індуктивність; L_E – індуктивність екрану; M_{II} – взаємна індуктивність між екраном і жилою; R_Q – опір шляху протіканню струму в землі; L_Q – особиста індуктивність заземлюючих провідників екрану.

При наявності декількох екранів здійснюють перемноження їх коефіцієнтів екранування.

Для визначення можливого зворотного перекриття із землі на кабелі, проводять вимір розподілу потенціалів по землі при ударі блискавки в блискавкоприймач за допомогою вимірювального комплексу «ИК-1».

На ОРП генератор імпульсів струму підключають між заземленням блискавкоприймача і заземленим стрижнем на відстані не менш 50 м. від блискавкоприймача. Після імітації удару блискавки вимірюють потенціали на землі поблизу кабельних каналів відносно точки, що знаходиться на відстані не менш 50 м.

Для будівель і споруд генератор підключають до блискавкоприймача зверху будівлі і до землі на відстані не менш 20 м від споруди. Після цього здійснюють імітацію удару блискавки в блискавкоприймач та вимірюють потенціал в споруді і перераховують його на реальний струм блискавки, використовуючи програму ОРУ-М.

7.6 Електромагнітні запади радіочастотного діапазону

Поля радіочастотного діапазону вимірюють у місцях розташування пристроїв автоматичних і автоматизованих систем технологічного управління в діапазоні частот $1 \div 1000$ МГц.

Вимірюють також напруженості електромагнітного поля від переносних і стаціонарних радіорозповсюджуючих станцій, вимірюючи залежність напруженості поля від відстані до джерела електромагнітного випромінювання і послаблення поля штучними перепонами (екранами, стінами, корпусами пристроїв).

Для вимірювання завад в радіочастотному діапазоні використовують селективні ВЧ вольтметри з набором антен. Для сигналів вертикальної поляризації в діапазоні $26 \div 300$ МГц використовують біконічні антени з круговою діаграмою направленості і вхідним опором 50 Ом.

Для сигналів з горизонтальною поляризацією використовують дипольні антени з вхідним опором 50 Ом.

Важливим є узгодження антенно-фідерного тракту з вольтметром у всьому діапазоні частот. При цьому, величина коефіцієнта стоячої хвилі напруги не повинна перевищувати 3.

Для проведення вимірювань в діапазоні $300 \div 1000$ МГц можна використовувати калібровану вимірювальну антену, або рупорну вимірювальну антену П-6-33 з вхідним опором 50 Ом. Вона приймає сигнали будь якої лінійної поляризації і має діаграму направленості $\pm 45^\circ$.

Для сигналів з горизонтальною поляризацією можливо використовувати калібровану широкосмугову антену у вигляді конічного диполя ДП-3 із вимірювального комплексу FSM-8,5 з вхідним опором 50

Ом і коефіцієнтом стоячої хвилі не більш, ніж 2. Магнітний компонент поля розраховують за формулою

$$H, \text{ дБ(мкА/м)} = E, \text{ дБ(мкВ/м)} - 52. \quad (7.5)$$

Застосування спектроаналізатора дає змогу здійснити графічне представлення параметрів частотного спектра завад у всьому діапазоні.

Розряди статичної електрики. Електростатичний потенціал тіла людини визначають шляхом безпосередніх вимірювань, попередньо визначаючи характеристики діелектричного покриття підлоги. Вимірювання питомих поверхневих опорів полімерних діелектриків здійснюють у відповідності з ГОСТ 64433.3-71 «Матеріали електроізоляційні тверді. Методи визначення електричного опору при постійній напрузі».

Вимірювання здійснюють тераомметром і стандартними електродами. Розрахунок питомого поверхневого опору ρ_n здійснюють за виразом:

$$\rho_n = \frac{\pi(D+g)R_g}{g}, \quad (7.6)$$

де R_n – вимірний опір; D – діаметр електроду; g – зазор між потенційним і вимірювальним електродами.

Потенціал тіла людини вимірюють електростатичним вольтметром (С502) з робочим діапазоном 0,4÷3 кВ (для розширення діапазону використовують ємнісні дільники).

Потенціал розраховують за формулою:

$$U_p = [(C_1 + C_2) / C_1] U_v, \quad (7.7)$$

де C_1 – сумарна ємність вольтметра, кабелю і оператора; C_2 – ємність дільника; U_v – покази вольтметра.

Магнітні поля промислової частоти. Вимірювання магнітних полів частоти 50 Гц здійснюють в нормальних режимах біля установок автоматичних і автоматизованих систем технологічного управління на розподільчому пристрою ВН вздовж траси прокладки кабелів за допомогою вимірювача магнітного поля (ІПМ-5-/200/400), який входить до комплексу КДЗ-1.

Для режимів однофазного КЗ на шинах ВН рівень напруженості магнітних полів визначають розрахунком. Приблизну оцінку роблять за формулою:

$$H = I_{кз} / 2\pi r, \quad (7.8)$$

де r – відстань до шин, по яким тече струм $I_{кз}$ однофазного КЗ.

Якщо поблизу автоматичних і автоматизованих систем технологічного управління розміщені реактори або трансформатори, вимірюють напруженість магнітного поля в нормальному режимі і перераховують на струми КЗ. Розрахунок поля вздовж осі реактора здійснюють за наближеною формулою

$$H = \frac{I \cdot n}{2} \frac{r^2}{(r^2 + x^2)^{1,5}}, \quad (7.9)$$

де r – радіус реактора, x – відстань по осі реактора від його центру до точки виміру, I – струм в реакторі, n – число витків.

Для декількох реакторів результуюче поле визначається методом суперпозиції полів кожного реактора з врахуванням фазового зсуву струмів. Для розрахунку можна використовувати програму MathCAD.

Завади, пов'язані із збуреннями в ланцюгах НН. Основними періодичними завадами в ланцюгах постійного струму є змінна складова напруги (пульсації) і кондуктивні завади радіочастотного діапазону.

Імпульсні завади в ланцюгах постійного струму виникають при комутації реле, електромагнітів, автоматичних вимикачів в ланцюгах постійного струму.

Основними періодичними завадами в ланцюгах живлення змінного струму є гармонічні складові напруги.

Імпульсні завади в ланцюгах змінного струму виникають при комутації автоматичних вимикачів в цих ланцюгах.

Вимірювальну апаратуру при визначенні завад приєднують до ланцюгів живлення по протифазній схемі (провід-провід), а в разі потреби – і в синфазній (провід-земля). При цьому:

- осцилографують форму сигналу завади (короткотривалі виміри);
- здійснюють тривалу реєстрацію при комутаціях в ланцюгах ВН.

При вимірюваннях в стаціонарних режимах визначають характеристики пульсацій або коефіцієнт синусоїдальності змінної напруги.

Вимірювання завад, які виникають при комутації реле, здійснюють при примусовій їх комутації безпосередньо у місцях розташування реле або на щиті особистих нужд.

Вимірювання завад в ланцюгах оперативного струму при спрацьовуванні електромагнітних приводів силових вимикачів здійснюють в місцях розташування систем релейного захисту і технологічного управління.

Тривалу реєстрацію проводять з метою визначення діапазону характеристик завад в тривалих режимах роботи. Тут визначають амплітуду змінних і імпульсних завад в ланцюгах постійного струму і гармонічних складових та імпульсних завад в ланцюгах змінного струму.

Вимірювання здійснюють тривалістю не менш одного тижня самописцями або спеціалізованими регістраторами параметрів якості електричної енергії.

В мережі живлення аналізують також аварійні режими і визначають можливі рівні пульсацій в мережі постійного струму та максимальну тривалість провалів напруги.

7.7 Імпульсні магнітні поля

Розрахунок натужності імпульсних магнітних полів здійснюють для умов протікання струму блискавки по блискавководу або струмовідводам блискавоприймачів будівель і споруд, розташованих поблизу пристроїв автоматичних і автоматизованих систем технологічного управління.

Оцінку напруженості полів здійснюють за формулою

$$H = I_m / 2\pi r \quad (7.10)$$

де r — відстань до блискавоприймача або струмовідводу, по якому протікає весь стум блискавки I_B .

За результатами вимірювань і розрахунків складають протокол, в якому рівні, які впливають на автоматичні і автоматизовані системи технологічного управління електромагнітних збуджень, порівнюють з випробувальними рівнями для таких систем. На основі проведених порівнянь роблять висновок про завадостійкість систем автоматичного і автоматизованого управління.

Наведемо приклад протоколу для одного з об'єктів (див. дод. 1).

8 ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ ТЕХНІЧНИХ ПРИСТРОЇВ У ВУЗЛАХ НАВАНТАЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

8.1 Вплив кривої форми струму на роботу обладнання

В реальних енергосистемах споживачі мають прилади з нелінійними навантажувальними характеристиками (силова електрона, перетворювальні системи, вентильні перетворювачі, електродугові пічки та ін.), тому умови оптимальних характеристик щодо дотримання стабільності напруги і частоти не дотримуються. Проблема потребує підвищеної уваги внаслідок збільшення числа і потужності нелінійних електронних пристроїв для керування силовими установками, які суттєво впливають на форму кривих струму і напруги внаслідок генерації гармонік.

Відхилення форми кривої струму і напруги від правильної синусоїди представляють за допомогою гармонічних складових. Гармоніка

визначається як сигнал з частотою, кратної частоті основної гармоніки. Розрізняють гармоніки в сталому режимові, при яких форма кривої не змінюється в часі, і гармоніки в перехідних режимах, коли форма кривої суттєво змінюється від циклу до циклу.

Використання технологій, заснованих на широкому використанні керованих випрямлячів, призвело до збільшення рівня гармонік струму в мережах. Суттєвою характеристикою, яка визначає форму кривої, є фазовий кут (кут зсуву) гармоніки по відношенню до гармоніки основної частоти. Однакові гармоніки від різних джерел, розташованих під різними кутами, дають різний ефект. Невеликі споживачі, що живляться від такої мережі, підлягають небезпечному впливу гармонік на керуюче обладнання. Але застосування мінімальних засобів захисту (наприклад, фільтрів), суттєво покращує криву напруги.

Гармоніки суттєво впливають на усі види електричного обладнання, яке розташованого навіть на значній відстані від місця генерації гармонік. Найбільш небезпечний вплив гармонік проявляється в «помилкових» комутаціях відповідальної управляючої і захисної апаратури, перевантаженні силових апаратів і систем. Часто викривлення кривої напруги призводить до руйнування силових конденсаторів і виходу з ладу інших елементів мережі.

Енергопостачальні компанії знімають з себе відповідальність за причини виникнення гармонік, вводячи стандарти або рекомендації по обмеженню гармонічних складових в точках загального підключення споживачів.

Визначення допустимого рівня гармонік є достатньо складною задачею. Проблема полягає в тому, що знання про струми гармонік різних джерел недостатні для визначення меж, у яких би забезпечувалася електромагнітна сумісність обладнання в будь-якій системі. Поки не буде досягнуто поняття характеру гармонічних явищ в складних системах, енергозабезпечення буде знаходитися під загрозою підвищеної небезпеки.

8.2 Статичні перетворювачі – джерело гармонік

Для розрахунку гармонік струму, що їх генерують статичні силові перетворювачі, необхідні дані про форму кривої напруги змінного струму на виході перетворювача, його схема, тип система управління, повний опір мережі змінного струму і параметри ланцюга постійного струму.

В залежності від положення моменту ввімкнення одного вентиля відносно іншого при сталій роботі перетворювача, відрізняють чотири принципи управління:

- управління з постійним фазовим кутом, при включенні вентилів через рівні проміжки часу у відповідності з їх комутаційними напругами;

- симетричне управління, при якому послідовне включення вентилів здійснюється в однакові моменти синусоїди живлячої напруги;
- модульоване фазове управління, при якому включення вентилів здійснюється через змінні проміжки часу;
- інтегральне управління, яке вибирає ціле число циклів або напівциклів живлячої частоти.

Найбільш часто застосовують фазовий спосіб управління, що полягає в зміні фазового кута керуючої напруги. В цьому випадку до характеристики кривих, які виникають при фазовому і симетричному керуванні, застосовують спектральний аналіз Фур'є.

Для живлення перетворювачів використовують систему змінного струму, від якого живиться випрямляч. Гармонічний склад кривої на стороні інвертованого струму має характерні особливості.

Управління з постійним фазовим кутом використовують в нормально комутуємих статичних перетворювачах і регуляторах напруги.

Регулятори напруги змінного струму, які складаються із зустрічно-паралельно ввімкнених пар тиристорів в кожній фазі, генерують змінні по амплітуді гармоніки. При індуктивному навантаженні вони можуть містити гармоніки парних порядків и постійний струм.

Таким чином, основними джерелами гармонік струму є випрямлячі і інвертори з фазовим управлінням, які поділяються на три групи:

- потужні перетворювачі для металургії і в передачах постійного струму високої напруги;
- перетворювачі середньої потужності для промисловості і управління електромоторами і на залізниці;
- малопотужні перетворювачі однофазних пристроїв (телевізійні, та для зарядження батарей).

Форми кривих струму і напруги перетворювачів першої групи наближені до ідеальної і можуть бути прийняті за основу для отримання характеристик гармонік стандартних схем перетворювачів.

До широкого впровадження статичних перетворювачів, основними джерелами гармонік в електричних системах були намагнічуючі струми силових трансформаторів і електричних машин. В теперішній час другим основним джерелом викривлення кривої напруги є генератори електричних станцій. Сучасні трансформатори і обертаючі машини в нормальних умовах роботи не вносять суттєвих викривлень в мережу. Але в перехідних процесах і в нештатних умовах роботи ці викривлення можуть суттєво зростати.

Крім статичних перетворювачів існують ще два види нелінійних навантажень – дугові плавильні пічки і люмінесцентні лампи.

8.3 Вплив гармонік на роботу систем електрозабезпечення

Після виявлення джерела гармонік та їх рівнів, необхідно з'ясувати вплив їх на роботу електрообладнання. Всі елементи систем електрозабезпечення необхідно дослідити на чутливість до гармонік.

Основними факторами впливу вищих гармонік на системи електрозабезпечення є:

- зростання струмів і напруг гармонік внаслідок паралельного і послідовного резонансу;
- зниження ефективності процесів генерації, передачі і використання електроенергії;
- старіння ізоляції електрообладнання і скорочення, внаслідок цього, строку служби;
- хибна робота обладнання.

Резонанси. Наявність в мережах конденсаторів для компенсації реактивної потужності може привести до появи місцевих резонансів, які можуть суттєво збільшити струм конденсаторів і вихід їх з ладу.

Паралельний резонанс виникає внаслідок великого опору гармонікам струму на резонансній частоті. Оскільки більшість гармонік генеруються джерелами струму, то це призводить до збільшення напруги гармонік і струмів. Паралельні резонанси можуть виникати в різних умовах, наприклад, при приєднанні конденсаторів до тих шин, до яких приєднано джерело гармонік. Вважаючи опір джерела чисто індуктивним, резонансну частоту розраховують за формулою

$$f_p = f_k \sqrt{S_{k3} / (Q + Q_L)} , \quad (8.1)$$

де Q_k – потужність силових конденсаторів і ємності живлячої мережі;
 S_{k3} – потужність КЗ в точці загального приєднання (рис. 8.1).

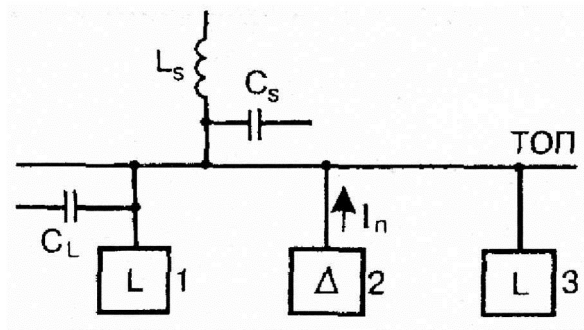


Рисунок 8.1 – Паралельний резонанс:
1 ÷ 3 – навантаження; 2 – джерело гармонік;
ТОП – точка загального приєднання

Для визначення умов виникнення паралельного резонансу необхідно поміряти струми гармонік у гілках кожного навантаження і ланцюгу живлення, а також напругу гармонік на шинах. Якщо струм, що протікає від шин в енергосистему малий а напруга велика, – це свідчить про наявність резонансу між L_s і C_L , C_s .

Послідовний резонанс виникає при наявності викривлень на шинах джерела живлення (рис. 8.2.). На високих частотах опір навантаження можна не враховувати, а опір конденсаторів різко зменшується. Резонансна частота для цього ланцюга визначається за формулою

$$f_p = f \sqrt{\frac{S_T}{(Q_k U_{кз})} 100 - \frac{P^2}{Q_k^2}}, \quad (8.2)$$

де Q_k – потужність силових конденсаторів; S_T – потужність трансформатора;

$U_{кз}$ – напруга короткого замикання трансформатора;

P_n – потужність навантаження.

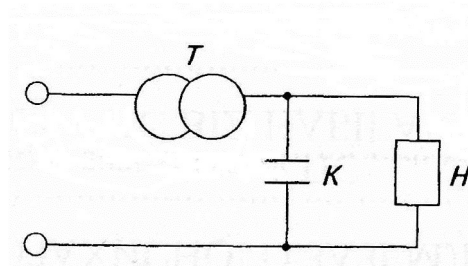


Рисунок 8.2 – Схема послідовного резонансу

При послідовному резонансі великий струм гармонік може протікати через конденсатор при відносно малій напрузі гармоніки. Дійсна величина струму визначається добротністю контуру і зазвичай дорівнює порядку 5 на частоті 500 Гц.

8.4 Вплив резонансів на системи електрозабезпечення

Резонанси в системах електропостачання розглядаються відносно силових конденсаторів. При перевищенні гармоніками допустимого струму, конденсатори через деякий проміжок часу виходять з ладу.

Обертаючі машини. Гармоніки напруги і струму призводять до додаткових втрат енергії в обмотках статора, в ланцюгах ротора і в сталі ротора і статора. Завдяки вихровим струмам і поверхневому ефекту, втрати в проводах статора і ротора більші за омичні. Додаткові втрати виникають від струмів витоку, обумовлені гармоніками в торцевих зонах статора і ротора.

У асинхронного двигуна з ротором із скошеними пазами і пульсуючими магнітними потоками в статорі і роторі вищі гармоніки додають втрат в сталі, які залежать від характеристик матеріалу магнітопроводу і кута скосу пазів. Так у двигуна потужністю 16 кВт на частоті 60 Гц при номінальному навантаженні при синусоїдальній формі кривої напруги повні втрати складали 1,3 кВт, а при квазіпрямокутній формі – 1,6 кВт.

Розподіл втрат від вищих гармонік в двигуні постійного струму складає:

- в обмотках статора – 14,2 %;
- в ланцюгах ротора – 41,2%;
- в торцевих зонах – 18,8%;
- потоки в пазах – 25,8%.

При цьому, сусідні непарні гармоніки в статорі синхронній машині визивають в роторі гармоніку однакової частоти: – так 5-а і 7-а гармоніки визивають в роторі гармоніки струму 6-го порядку, які обертаються в протилежні сторони.

Середня щільність втрат на поверхні ротора пропорційна $(I_5^2 + I_7^2)$, але завдяки різному напрямку обертання, вона пропорційна $(I_5^2 + I_7^2)^2$.

Додаткові втрати – це найбільш небезпечний фактор, обумовлений гармоніками у оберտальних машинах, які призводять до загального підвищення температури і місцевого перегріву ротора. Причому, машини з фазним ротором більш чутливі до виникнення гармонік.

Допустимість гармонік визначають по величині напруг і струмів зворотної послідовності, які вони генерують.

Статичне обладнання. Лінії електропередач. В ЛЕП поява гармонік призводить до додаткових втрат електроенергії і напруги. Зокрема, в кабельних лініях гармоніки напруги збільшують (посилюють) дію на діелектрик – пропорційно збільшенню максимальної амплітуди напруги. Це призводить до зростання числа пошкоджень кабелю і зростанню вартості ремонту.

В лініях надвисокої напруги гармоніки напруги по той же причині збільшують кількість втрат енергії на корону.

Трансформатори. Гармоніки напруги в трансформаторах призводять до зростання втрат енергії:

- на гістерезис;
- втрат, обумовлених вихровими струмами в сталі;
- втрат в обмотках;
- втрат в діелектричних матеріалах трансформатора.

Це призводить до скорочення строку служби трансформатора.

Втрати в обмотках найбільш суттєві у випадку використання перетворювального трансформатора, оскільки наявність фільтра, включеного на стороні змінного струму, не знижує гармонік струму в

трансформаторі. Це потребує використання трансформатора підвищеної потужності.

Важливим фактором впливу гармонік на потужні трансформатори є циркуляція потроєного струму нульової послідовності в обмотках, які з'єднані в трикутник, що може призвести до їх перевантаження.

Батареї конденсаторів. Додаткові втрати енергії в конденсаторах розраховують за формулою

$$\delta P = \sum_{n=2}^{\infty} \Delta P_0 \omega C n U_n^2, \quad (8.3)$$

де ΔP_0 – питомі втрати на основній частоті; C – ємність конденсатора; U_n – напруга n -ної гармоніки.

Ці втрати призводять до додаткового нагріву конденсаторів.

Всі конденсатори розраховані на певне струмове перевантаження:

- у США – 80%;
- у Великобританії – 15%;
- у Європі – 30%;
- у РФ – 30%.

Перевищення цих значень при наявності підвищених напруг гармонік на вводах конденсаторів, призводить до їх перегрівання і прискореного виходу з ладу.

Системи релейного захисту в енергосистемах. Гармоніки можуть порушувати роботу систем захисту і погіршувати їх характеристики. Цифрові реле і алгоритми, засновані на аналізі вибірки даних, або точки перетинання нуля особливо чутливі до гармонік.

Електромагнітні реле, в більшості випадків, – характеристик не змінюють аж при коефіцієнті викривлення \approx до 20%.

Вплив гармонік відрізняється при роботі системи в нормальному і аварійному режимах.

В аварійних режимах електромеханічні реле, які використовуються в максимальному струмовому захисту, реагують на напругу і струм основної частоти і мають високу інерційність, що робить їх нечутливими до впливу вищих гармонік.

Більший вплив гармонік на роботу захисту відбувається у пристроях, заснованих на вимірюванні опору. Дистанційний захист, заснований на вимірі опору на основній частоті, може давати суттєві похибки при наявності в струмі КЗ вищих (особливо 3-го порядку) гармонік.

Велика кількість гармонік спостерігається, якщо струм КЗ протікає через землю і якщо гармоніки не фільтрують, – то можливий збій в роботі системи.

При металевому КЗ у струмі і напрузі переважає основна частота, але завдяки насиченню трансформатора струму, виникає вторинне викривлення

кривої, особливо у випадку великої аперіодичної складової у первинному струмові. При цьому також виникають проблеми в роботі системи захисту.

У сталому режимові роботи нелінійності, пов'язані з перезбудженням трансформатора струму, генерують гармоніки непарного порядку, а в перехідних режимах виникають будь-які гармоніки, причому найбільша амплітуда – у другій і третій.

Фільтрація гармонік в цифрових системах найбільш важлива для дистанційного захисту. Розроблені цифрові способи фільтрації частот, не зважаючи на деяку складність алгоритму, призводять до позитивного результату.

Вплив гармонік на системи захисту в нормальних режимах роботи електричних мереж, завдяки низької чутливості пристроїв захисту до параметрів режиму, – в нормальних умовах незначний. Але при підключенні до мережі потужних трансформаторів спостерігається кидок намагнічуючого струму. Не зважаючи на дуже високій пік намагнічуючого струму, великий зміст вищих гармонік в намагнічуючому струмові трансформатора, використовують для блокування відключення вимикачів ВН захистом трансформатора. Амплітуда струму залежить від індуктивності трансформатора, опору обмотки і моменту часу, в який відбувається включення. Оскільки струм вторинної обмотки в період намагнічування відсутній, то великий первинний струм може призвести до помилкового спрацювання диференційного захисту.

8.5 Вплив на обладнання споживачів

Телевізори: вплив гармонік полягає у збільшенні піка напруги, що може призвести до викривлення зображення і зміни яскравості.

Розрядні лампи: пуско-регулюючі пристрої цих ламп містять ємність і індуктивність, що може призвести до виникнення резонансу і виходу ламп з ладу.

Комп'ютери: встановлені межі на допустимі рівні викривлення в мережах, живлячих комп'ютери і системи обробки даних (для комп'ютера IBM вони складають ~ 5%).

Перетворювальне обладнання: провали на синусоїдальній напрузі при комутації вентилів, можуть впливати на синхронізацію іншого подібного обладнання, керування яким відбувається в момент переходу кривої напруги через нуль.

Обладнання з тиристорними регуляторами. Наявність гармонік може впливати наступним чином:

– провали на синусоїді напруги призводять до неправильної роботи завдяки пропускам запалення тиристорів;

– гармоніки напруги можуть призвести до запалення в непотрібний момент часу;

– резонанс між різними типами обладнання може призвести до виникнення перенапруг і качанням машин.

Споживачі, що живляться від різних шин, теоретично можуть впливати один на одного, але їх віддаленість знижує імовірність такого впливу.

Вплив гармонік на вимірювання потужності і енергії. Усі вимірювальні прилади калібровані при чисто синусоїдальній напрузі і струмі, тому при вимірюванні потужності при наявності викривлень струму і напруги, можлива поява погрішності – більшої за нормовану. Наявність гармонічних викривлень також впливає на точність комерческих розрахунків за електроенергію.

Дослідженнями доведено, що погрішності вимірів, обумовлені вищими гармоніками, змінюються в широких межах і можливі як позитивні, так і негативні погрішності. В розповсюджених індукційних лічильниках електромагнітної системи містяться елементи, що створюють первинний і вторинний магнітні моменти, які є нелінійними по відношенню до частоти і амплітуди напруги. З'ясувалося, що індукційні лічильники завишають споживану потужність (до 6%), внаслідок слабого демпфірування в інтервали відсутності струму. Такі споживачі автоматично є потерпілими за внесення в мережу викривлень форми напруги. Тому вони повинні бути зацікавленими в застосуванні засобів придушення гармонік.

Точний вимір енергії незалежно від форми кривих струму і напруги забезпечує електронний лічильник.

Гармоніки впливають і на точність вимірювання реактивної потужності, яка вона точно визначена лише для синусоїдальних струмів і напруг, а також і на точність виміру коефіцієнта потужності.

8.6 Обмеження рівня гармонік напруг і струмів

В електричних системах фільтри застосовують для зменшення амплітуди струмів і напруг однієї або декілька фіксованих частот (паралельні фільтри).

Для запобігання проникненню струмів конкретної частоти в окремі вузли перетворювальної підстанції або частини енергетичної системи, використовують послідовний фільтр, який складається із паралельно з'єднаних конденсатора і котушки індуктивності, які створюють великий опір протіканню струму на даній частоті.

Але такий спосіб не використовують для обмеження напруг гармонік самого джерела, оскільки генерація гармонік нелінійними елементами підстанції (трансформатор, статичні перетворювачі) є нормальним

режимом їх роботи. В самих статичних перетворювачах задача запобігання проникненню гармонік струму в систему, вирішена шляхом створення короткозамкненого шляху з малим опором для гармонічних частот.

Фільтри. Паралельний фільтр налаштований на задану частоту, якщо на цій частоті його індуктивний і ємнісний опір рівні.

Добротність фільтра Q визначає точність його настройки. Фільтр з високою добротністю (від 30 до 60) налаштовується строго на одну з гармонічних частот (наприклад, п'яту).

Фільтр з низькою добротністю ($Q \sim 5$) має низький опір в широкому діапазоні частот. Якщо такий фільтр використовують для придушення гармонік високих порядків (вище 17-й), то його можна приймати як фільтр верхніх частот.

На рисунках 8.3 і 8.4 наведені основні схеми фільтрів і залежності їх опору від частоти. Як видно з рисунку 8.3, б, полоса пропускання частот фільтра P обмежена частотою, на якій реактивний опір фільтра дорівнює його активному опору (тобто кут повного опору $= 45^\circ$) і частотою, на якій модуль повного опору дорівнює $\sqrt{2} R$.

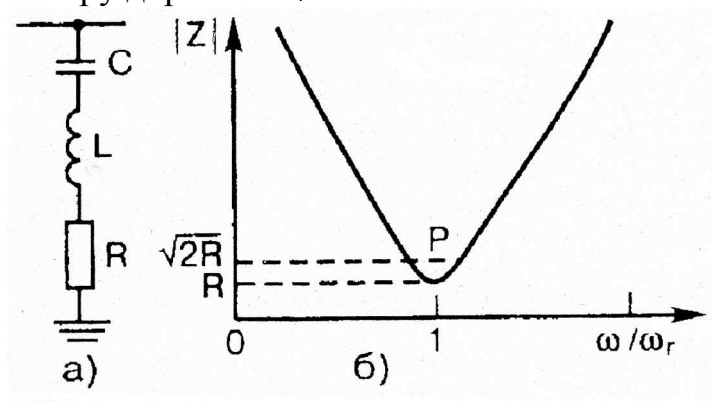


Рисунок 8.3 – Схема паралельного фільтра налаштованого на одну частоту – (а), і залежність його повного опору Z від частоти – (б)

Для налаштованого фільтра Q визначається як відношення індуктивного (або ємнісного) опору при резонансі, – до активного опору.

Добротність фільтра пов'язана з шириною його полоси пропускання згідно співвідношенню

$$Q = \omega_n / R, \quad (8.4)$$

де ω_n – налаштована кутова частота, рад/с.

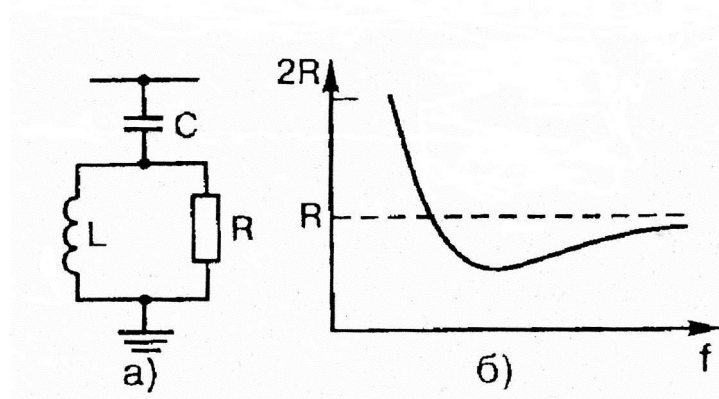


Рисунок 8.4 – Схема паралельного фільтра другого порядку придушення частот (а) і залежність його повного опору R від частоти f (б)

Точність настройки фільтра придушення високих частот зворотна добротності налаштованих фільтрів.

Ступень невідповідності настройки фільтра номінальній налаштованій частоті характеризується коефіцієнтом d , який враховує зміну основної (живлючої) частоти, зміну ємності і індуктивності фільтра, що пов'язано з старінням деталей фільтра і коливанням температури, а також технологічними відхиленнями при виготовленні.

Загальна розбудова фільтра на одиницю номінальної налаштованої частоти дорівнює

$$\delta = (\omega - \omega_n) / \omega_n \quad (8.5)$$

Зміна L і C на 2% призводить до відповідної розстройки фільтра, як і зміна частоти на 1%. Тому δ можна визначити з такого виразу

$$\delta = \frac{\Delta f}{f_n} + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta L}{L_n} + \frac{\Delta C}{C_n} \right). \quad (8.6)$$

Потужність фільтра визначається по реактивній потужності, що її генерує фільтр на основній частоті. Ця потужність майже дорівнює реактивній потужності основної частоти, що її генерують конденсатори. Сумарна потужність гілок фільтра визначається вимогами по реактивній потужності, які висуваються до джерела гармонік в мережі змінного струму.

Оптимальний критерій роботи фільтра, який полягає у придушенні усіх викривлень форми напруги – є нереальним як з технічної, так і економічної точок зору.

Більш реальний критерій пропонує зменшення викривлень до допустимого рівня в точці загального приєднання декількох споживачів і використовує або гармонічний струм, або напругу, або їх разом.

Критерій, заснований на гармоніках напруги, – більш зручний для розробки фільтрів, оскільки опір мережі змінного струму весь час змінюється, – тому простіше гарантувати роботу фільтра у певному діапазоні напруг, ніж величину робочого струму.

Для того, щоб врахувати необхідні гармонічні обмеження при розробці фільтрів необхідно:

- в мережу, яка містить фільтр, з'єднаний з електричною схемою змінного струму (рис.8.5), ввести спектр гармонік струму, який генерується нелінійним навантаженням на відповідних частотах і розрахувати гармоніки напруги;

- результати використовувати для визначення таких характеристик, як викривлення напруги, коефіцієнта впливу на лінії зв'язку та ін.;

- розрахувати напругу на елементах фільтра (конденсаторах, котушках індуктивності, резисторах) та їх параметри і втрати енергії в них.

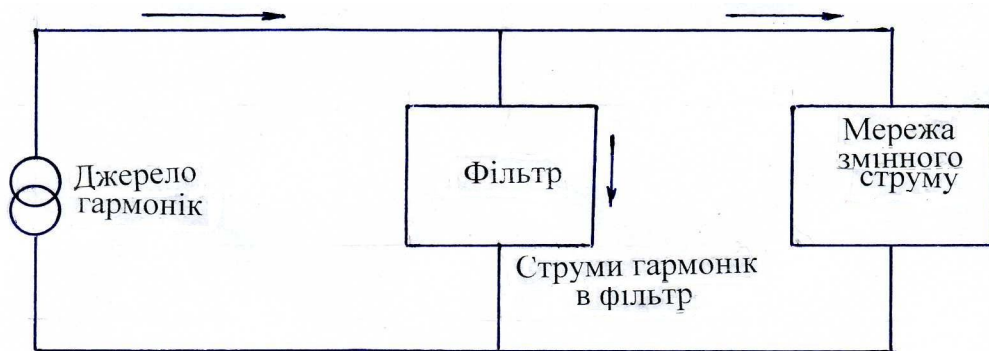


Рисунок 8.5 – Схема визначення коефіцієнта викривлення напруги

Головну увагу при розробці фільтрів необхідно приділити трьом елементам: джерелу струму, провідностям фільтра і системи.

В залежності від навантаження, а для статичних перетворювачів, – і від кута запалення, буде змінюватися характеристика джерела струму.

Після визначення провідності фільтра і системи, розраховують для кожної частоти мінімальне значення загальної еквівалентної провідності, що дає максимальне викривлення напруги. Визначивши схему приєднання фільтра, можна побудувати геометричне місце точок, яке відповідає опорі (провідності) фільтра.

Розроблений таким чином фільтр являє собою однополюсну схему, спроможну гасити весь спектр проходящих гармонік. Але необхідна для цього ємність дуже велика, тому економічніше задавлювати гармоніки малих порядків за допомогою одноплечового налаштованого фільтра.

Налаштовані фільтри. Фільтр однієї частоти являє собою послідовний RLC -ланцюжок (рис. 8.3, а), налаштований на частоту однієї

гармоніки. Повний опір такого фільтра на резонансній частоті f_n зменшується до чисто активного опору R .

$$Z_{\phi} = R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C}). \quad (8.7)$$

Фільтри подвійної настройки.

Інколи замість двох одночастотних фільтрів (рис. 8.6, а) застосовують фільтр подвійної настройки (рис. 8.6, б). В діапазоні резонансних частот опори двох одночастотних фільтрів практично рівні опорам схеми фільтра, налаштованого на дві частоти. Перевагою цієї схеми порівняно з одно частотними схемами фільтрів є значне зниження втрат енергії на основній частоті. Основною перевагою фільтра, налаштованого на дві частоти, є більша робоча напруга, що дозволяє зменшити число котушок індуктивності, які знаходяться під повною лінійною напругою.

Можливо створення фільтра, налаштованого на більшу кількість частот, але потребує більш складного налаштування.

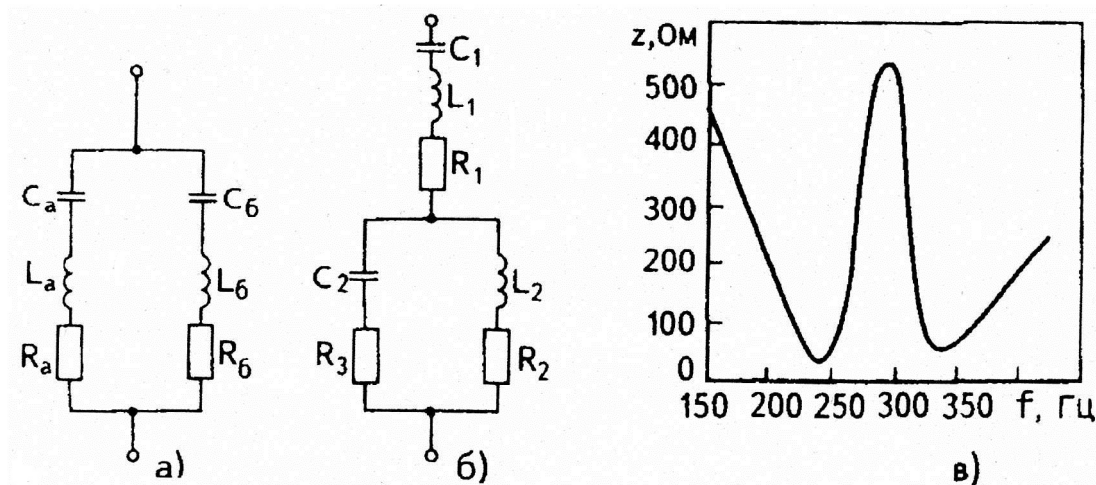


Рисунок 8.6 – Одночастотний фільтр – (а); фільтр подвійної настройки – (б); і залежність опору від частоти фільтра 5-й та 7-ой гармонік – (в)

Фільтри з автоматичною настройкою. Важливою вимогою при розробці налаштованих фільтрів є зменшення максимального відхилення частоти. Цього отримують застосовуючи настройку фільтра за допомогою автоматичного регулювання ємності або зміною індуктивності в межах $\pm 5\%$.

В перетворювачах постійного струму використовують систему управління, яка вимірює реактивну потужність гармонічної частоти в фільтрі і змінює величину L або C в залежності від її знаку і величини.

Порівняно з фільтрами з фіксованою частотою, автоматично налаштовані фільтри:

- мають меншу ємність конденсаторів;
- за рахунок великої добротності втрати потужності в них – менші;
- конденсатори можуть мати велику реактивну потужність і великий температурний коефіцієнт ємності з розрахунку на одиницю маси і одиницю вартості.

Широкосмугові фільтри. Широкосмугові фільтри мають такі переваги:

- меншу чутливість до коливань температури, відхилення частоти, технологічним допускам при виготовленні, втратам в ємнісних елементах;
- малий опір широкому спектру гармонік, відсутність необхідності розбивки фільтра на паралельні гілки;
- зручність в обслуговуванні, якщо використання настроєних фільтрів призводить до виникнення резонансу.

Недоліками широкосмугових фільтрів є:

- необхідність розраховувати на більш високу потужність для отримання однакового рівня фільтрації;
- втрати енергії в резисторі і в котушці індуктивності значно вищі.

Типи широкосмугових фільтрів наведені на рисунку 8.7 : фільтри першого, другого, третього порядків і С-типу.

Фільтр першого порядку застосовують рідко, оскільки він потребує конденсатора великої потужності, а втрати на основній частоті – за великі.

Фільтр другого порядку зручний в експлуатації, але втрати на основній частоті порівняно з третім порядком – більші.

Основною перевагою фільтра третього порядку є малі втрати енергії на основній частоті, пов'язані із збільшенням повного опору на цій частоті завдяки конденсатору C_2 . Ємність C_2 набагато менша за ємність C_1 .

Фільтр С-типа займає положення між фільтрами другого і третього порядку. Основною його перевагою є суттєво менші втрати на основній частоті завдяки тому, що C_2 і L на цій частоті послідовно налаштовані. Такі фільтри найбільш чутливі до зміни основної частоти і відхилення параметрів елементів схеми.

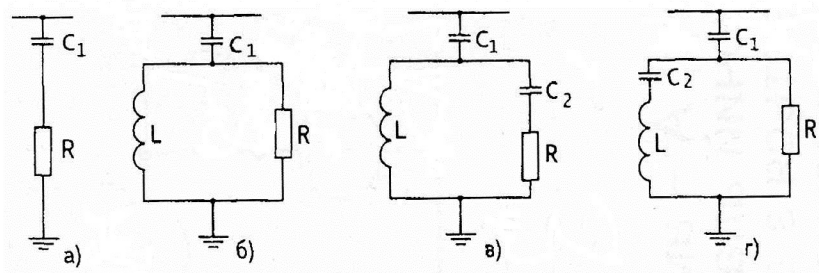


Рисунок 8.7 – Широкосмугові високочастотні фільтри: а) – першого порядку; б) – другого порядку; в) – третього порядку; г) – С-типа

Схеми фільтрів. Зазвичай потужні статичні перетворювачі розраховані на роботу з 12-пульсним циклом, але інколи за умов експлуатації допускається робота з 6-пульсним циклом. В цьому випадку перетворювач генерує додатково до канонічних гармонік 12-пульсного режиму гармоніки п'ятого і сьомого порядку. Ці гармоніки одфільтровуються спеціальною схемою, яка складається з настроєних фільтрів для гармонік малих порядків (5, 7, 11, і 13-го) і високочастотного гасячого фільтра для гармонік 17-го і більш високих порядків (рис. 8.8).

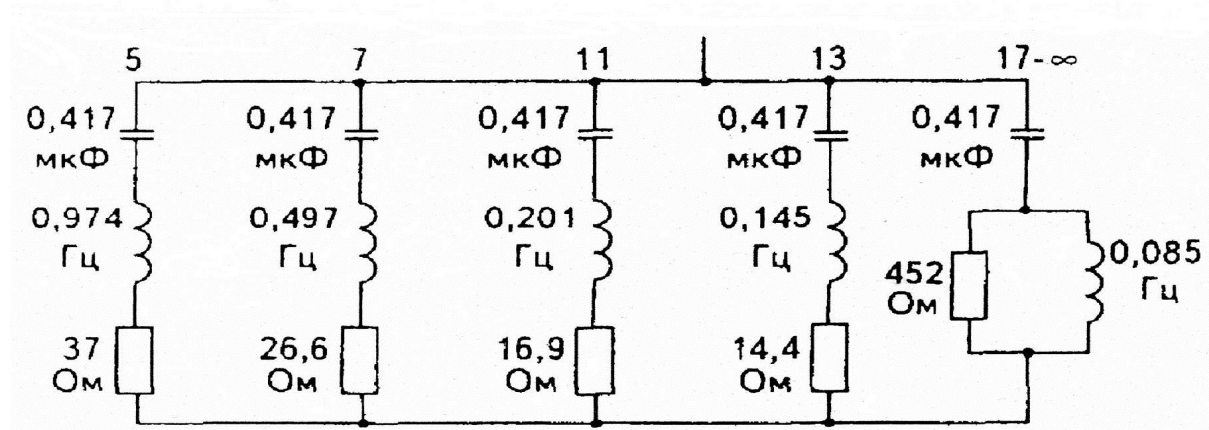


Рисунок 8.8 – Фільтр змінного струму

Смугова фільтрація для 12-пульсних перетворювачів.

Встановлення на підстанції налаштованих фільтрів резонансу напруг для 11-й і 13-й гармонік і високочастотних фільтрів для гармонік більш високих порядків, зазвичай призводить до надмірно сильного придушення гармонік. Це обумовлено тим, що мінімальна потужність фільтра визначається найменшою потужністю конденсаторів, яка допустима з економічних міркувань, та мінімальною реактивною потужністю, що генерує перетворювач.

Отже, схема фільтра може бути спрощена шляхом заміни налаштованих фільтрів 11-й та 13-й гармонік на один тушачий фільтр, або заміною на такий фільтр – усіх фільтрів схеми.

В першому випадку гасящий фільтр, який замінює два налаштованих фільтра, налаштовують приблизно на 12-у гармоніку (при цьому його добротність буде достатньо великою ($20 \div 50$), в той час як добротність тушачого фільтра вищих гармонік значно менша ($2 \div 4$)).

У другому випадку тушачий фільтр також налаштований на 12-у гармоніку, але для забезпечення достатньо низького опору для великих гармонік, добротність вибирають відносно малою ($2 \div 6$)).

В сучасних потужних перетворювачах високої напруги значна імовірність резонансу гармонік малих порядків між повним опором системи і ємнісним опором фільтра. В залежності від виду джерела

гармонік малих порядків (система змінного струму або перетворювач), може спостерігатися резонанс напруг і резонанс струмів.

Завдяки несиметрії системи, перетворювач генерує значну третю гармоніку струму. Вони мають пряму послідовність чередування фаз і тому не поглинаються обмоткою трансформатора, що з'єднана в трикутник.

Для запобігання появи резонансу на малих частотах пропонується інша схема фільтрації, що складається з фільтра С-типу і фільтра другого порядку (рис. 8.9).

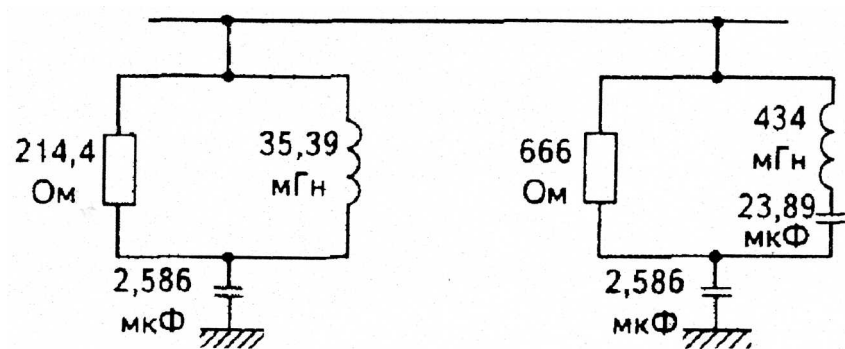


Рисунок 8.9 – Змішаний фільтр другого порядку і С-типу

Це обумовлено тим, що мінімальна потужність фільтра визначається найменшою ємністю конденсаторів, допустимій з економічних міркувань, а також мінімальною реактивною потужністю, що генерується перетворювачем.

Таким чином, схема фільтрації може бути спрощена заміною налаштованих фільтрів 11-й і 13- гармонік на один гасячий фільтр, або заміною на такий фільтр усіх фільтрів системи.

В першому випадку тушачий фільтр, що замінює два налаштованих, повинен бути налаштований на ≈ 12 -у гармоніку (добротність досить велика ($20 \div 50$), в то час як добротність тушачого фільтра вищих гармонік значно менша ($2 \div 4$).

У другому випадку тушачий фільтр також налаштовують на 12-у гармоніку, але для забезпечення низького опору для великих гармонік добротність роблять відносно малою ($2 \div 6$).

9 ЕКОЛОГІЧНІ І ТЕХНОГЕННІ ВПЛИВИ ПОЛІВ

9.1 Вплив електричних полів на живі організми

Живі організми функціонують завдяки протіканню в них різноманітних процесів: фізичних, хімічних, біологічних, основу яких складають електричні явища на молекулярному і клітинному рівні.

Внутрішнє середовище живого організму є електропровідним, оскільки являє собою водні електроліти, по яким циркулюють електричні струми, які збуджують і регулюють усі життєво важливі процеси. Самі струми збуджуються електричними полями, які утворюються іонами, концентрація яких залежить від виду хімічних реакцій, що відбуваються в організмі. Електричні процеси в тканинах відіграють вирішальну роль в функціях руху м'язових тканин в яких, внаслідок складних біохімічних процесів, відбувається перетворення енергії електричного поля в механічний рух.

Функціонування клітин організму обумовлено обміном речовин через мембрани, скрізь які проходять іони натрію, калію хлору і інших елементів. Відкриття каналів в мембрані відбувається за рахунок електростатичних сил, які виникають внаслідок різниці концентрації іонів всередині та зовні клітини і діють на білкові молекули мембрани. Зміна концентрації іонів зовні і

всередині клітини і реакція мембрани завдяки зміни напруги між її стінками, є важливими елементами механізму електрохімічної передачі інформації по тканинам.

В спокійному стані напруга потенціалу складає приблизно 80 мВ, а для відкриття каналів мембран необхідно зменшити напругу на 20 мВ

Нормальному стану організму відповідає напруженість поля людини ~ 40 В/м і щільність струму 4 А/м². Якщо штучно створити всередині людини таке поле або струм, то будуть порушені природні процеси функціонування органів і, наприклад, може відбутися параліч серцевої м'язи.

Поле всередині людини може виникнути при безпосередньому торканні до струмопровідних частин, або за рахунок протікання по тілу струмів зміщення, якщо людина знаходиться в змінному електричному полі, або в полі індукованих струмів, чи змінному магнітному полі. Такі напруженості поля всередині тіла людини можуть виникнути при наявності зовнішнього електричного поля промислової частоти ~ 100 МВ/м, або магнітного поля ~ 1 МА/м, що на практиці не зустрічається.

При знаходженні в електричному, магнітному або електромагнітному змінному полі в організмі людини індукуються

струми, які накладаються на особисті біоструми, внаслідок чого можуть змінитися природні процеси або з'явитися нові явища.

Змінні електричні і магнітні поля сприяють виникненню струмів зміщення і індукованих струмів. Електромагнітні поля ВЧ також індукують струми в організмі, що безумовно впливає на процеси в тканинах.

Електричні, магнітні і електромагнітні поля все більш впливають на навколишнє середовище, тому з'явилося нове визначення цього явищу – електросмог.

Постійні зовнішні електричні поля не призводять до появи струмів в організмі.

Основний вплив на забруднення середовища електричними і магнітними полями промислової частоти здійснюють об'єкти електроенергетики, насамперед, лінії електропередач і підстанції високої напруги, електрифікований транспорт, промислові установки і численні побутові прилади. Розвиток електроенергетики супроводжується застосуванням потужних електротехнічних і електронних пристроїв в промисловості, транспорті і побуті, тому напруженості електричних і магнітних полів можуть перевищувати природні поля.

Вплив електромагнітної обстановки на стан здоров'я людини в останні роки потребує ретельного дослідження, оскільки з'явилися повідомлення про підвищену небезпеку ракових захворювань у людей, що тривалий час мешкають поблизу ліній електропередач високої напруги, а також скарги персоналу електроенергетичних комплексів напругою більше 220 кВ на самопочуття на робочих місцях.

Міжнародні організації: всесвітня організація охорони здоров'я (ВОЗ); Міжнародна електротехнічна комісія (МЄК); Міжнародна асоціація по захисту від іонізуючого випромінювання (IRPA); Європейський комітет по нормуванню в галузі електротехніки (CENELEC); Комісії європейського союзу (CEU); національні комісії – займаються питаннями нормування діючих на персонал і населення електричних, магнітних і електромагнітних полів.

Згідно результатів численних досліджень, вплив полів на людину вважають безпечним при щільності струму в організмі $\sim 10 \text{ мА/м}^2$, що відповідає (при частоті 50 Гц) напруженості зовнішніх полів 20 кВ/м і 4 кА/м.

При щільності струму $100 \div 1000 \text{ мА/м}^2$ можливе сильне збудження клітин і тканин, порушення іонної рівноваги, процесів обміну в клітинах, центральній нервовій системі, виникнення больових відчуттів, а при великій щільності струму – можлива аритмія і навіть фібриляція серця.

Щільність струму $\sim 10 \text{ мА/м}^2$ в тілі людини вважається рівнем природних біострумів, при яких усі клітини нормально функціонують. Частоти біострумів знаходяться в діапазоні $4 \div 1000 \text{ Гц}$.

Ефективним методом діагностики стану організму людини є реєстрація сигналів, обумовлених біострумами – електрокардіограми, енцефалограми.

Більш зручним для контролю є вимірювання не щільності струму, а струму, що протікає через тіло людини в напрямку рука-рука.

Згідно ГОСТ 12.1.038, безпечний струм залежить від тривалості його дії (табл. 9.1).

Таблиця 9.1– Гранично допустимі струми через тіло людини

Умови	Час протікання струму, с											
	0,01-0,08	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	> 1
Виробничі	650	400	190	160	140	125	105	90	75	65	50	6
Побутові	220	200	100	70	55	50	40	35	30	27	25	2

За допомогою цих нормованих струмів можна визначити величину зовнішніх полів, які створюють такі струми. При тривалості протікання струму більш за 1с отримуємо величину таких полів – 25 кВ/м і 4 кА/м.

При скороченні часу дії, гранично допустимі напруженості полів зростають приблизно на 2 порядку.

При цьому напруженість електричного поля стає вищою за напруженість, при якій відбувається електричний поверхневий пробій вздовж тіла людини.

9.2 Механізми дії електричних і магнітних полів на живі організми

Науково встановлено два механізми впливу електричних і магнітних полів на людину за рахунок індукованих в тілі струмів:

- зміна різниці потенціалів між зовнішніми і внутрішніми поверхнями мембран клітин (виникнення так званого потенціалу дії);
- нагрів тканин.

Крім указаних раніше в розділі 9.1, існують більш слабкі ефекти впливу електричних і магнітних полів на організм, обумовлені зміною потенціалу дії, які виникають при меншій (на декілька порядків) напруженості полів. Одним з таких ефектів є відчуття людиною поля не тільки по побічним ознакам (ворушіння волосся на голові, поколювання при часткових розрядах), але й підсвідоме відчуття поля, а також поява магніто- і електрофосфенів (відчуття мерехтіння на периферійних ділянках поля зору).

Чутливість полів людиною виключно індивідуальна. Приблизно 5% людей відчують наявність електричного поля промислової частоти, починаючи з напруженості ~ 7 кВ/м, а 60% – не відчують поле напруженістю до 20 кВ/м. Усереднені границі чутливості до електричних і

магнітних полів, залежно від їх частоти наведені на рисунку 9.2. Порушення зору, недомагання, головні болі спостерігаються при напруженості порядку 10^5 А/м.

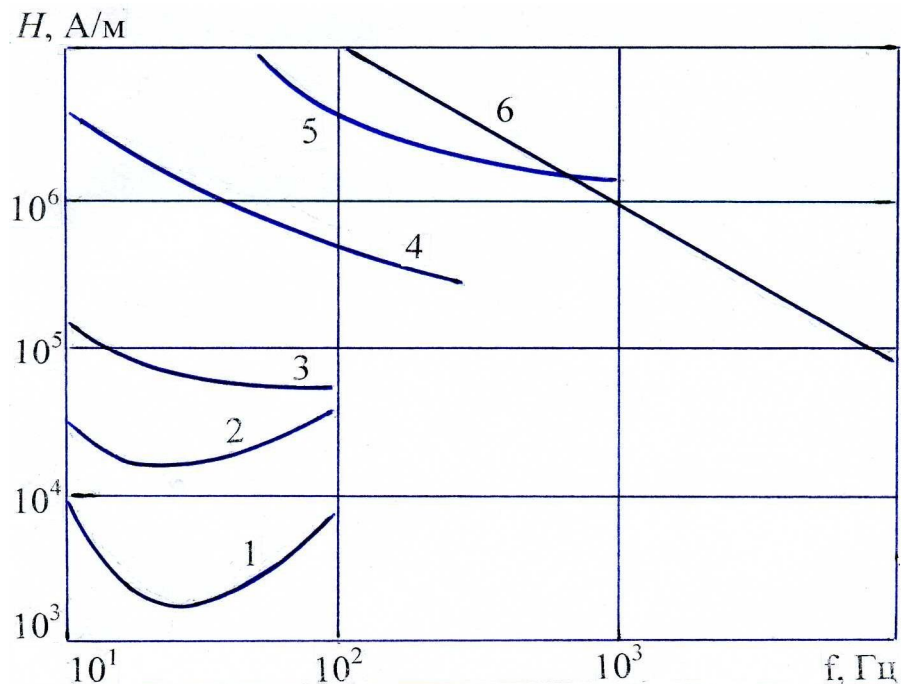


Рисунок 9.2 – Ефекти впливу магнітного поля різної частоти на організм людини:

- 1 – поява мерехтіння на периферійних ділянках поля зору; 2 – відчуття присутності поля; 3 – реєстрація порушення зору, головні болі;
- 4 – порушення роботи серця; 5 – порушення нервової системи;
- 6 – джоулеві тепло нагріву тканин при потужності ~ 4 Вт/кг

З рисунка 9.2 видно, що криві 1 та 2 мають мінімум в діапазоні промислових частот, а зростання кривих із збільшенням частоти, пояснюється інерційністю системи відкриття каналів в стінках клітинних мембран, а при зменшенні частоти – зниженням індукованих струмів.

Величина напруженості магнітного і електричного полів, які відчуває людина, знаходяться вище тих, що існують в побуті і на виробництві. Якщо напруженість електричного поля частотою 50 Гц може спостерігатись під проводами ЛЕП або на території ОРУ СВН, то відповідна напруженість магнітного поля може бути отримана тільки в спеціальних умовах.

Другим науково встановленим механізмом дії полів на організм людини, є нагрів тканин при протіканні через них ємнісних або індукованих струмів. Вважають безпечним для організму нагрів тканин на 1°C , чому відповідає питома потужність 4 Вт на 1 кг маси тіла. При такій потужності система терморегуляції організму спроможна забезпечити

відвід тепла в навколишнє середовище без небезпечного підвищення температури внутрішніх органів.

При частоті 50 Гц напруженість зовнішнього електричного поля може забезпечити питому теплову потужність ~ 4 Вт/кг, що складає 4 МВ/м, тобто перевищує електричну міцність повітря.

Напруженість магнітного поля, яка необхідна для виділення такого тепла в організмі, складає ~ 50 МА/м.

Таким чином, напруженості електричного або магнітного полів, які спроможні підвищити температуру на безпечну величину порядку 1°C , – на багато порядків перевищують граничну величину чутливості полів людиною, які існують на практиці.

При високих частотах ситуація інша, оскільки індуковані струми при збільшенні частоти зростають (рис. 9.2).

9.3 Електромагнітна обстановка на робочих місцях і в побуті

Електромагнітна обстановка характеризується напруженістю електричного і магнітного полів, а при високих частотах – і електромагнітного поля. Найбільший інтерес має дія плоскої електромагнітної хвилі, у якої щільність електричної і магнітної складових рівні.

Розрізняють природну електромагнітну обстановку і обстановку від електричних або електроенергетичних пристроїв. Поля природного і штучного походження накладаються одне на одного, а їх вектори напруженості складаються.

Електричне поле Землі обумовлено негативним надмірним зарядом поверхні і сягає на відкритій місцевості приблизно $100\div 500$ В/м. При появі грозової хмари напруженість поля може зрости до десятків і навіть декілька сотень кВ/м, а при розрядах виникають імпульси електромагнітного поля.

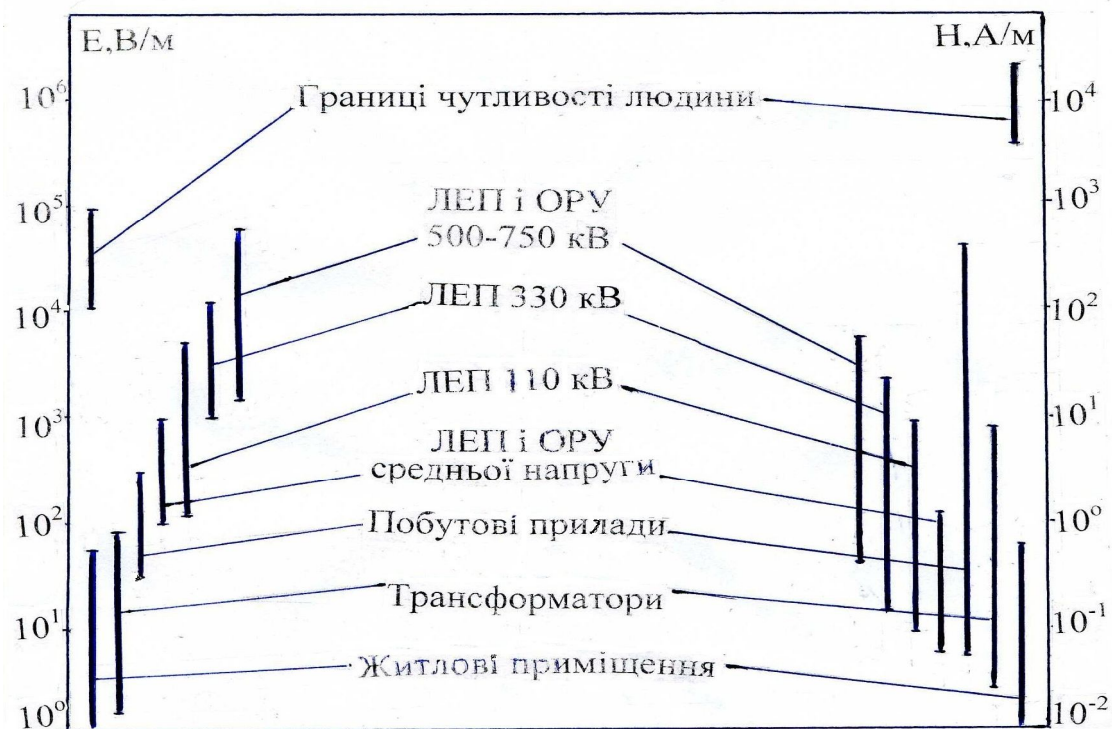


Рисунок 9.1 – Напруженість електричних і магнітних полів промислової частоти

Сильні електричні поля промислової частоти в основному створюються об'єктами електроенергетики (ЛЕП ВН). Будівлі і споруди екранують постійне електричне поле Землі і електричне поле промислової частоти, створене ЛЕП ВН та іншими об'єктами. В середині будівлі постійне електричне поле природного і штучного походження визначається наявністю електризованих природних і синтетичних матеріалів. Напруженість електростатичного поля у приміщенні може досягти десятків і сотень кВ/м.

При розрядах статичної електрики виникають електромагнітні імпульси з дуже високої крутизною. З'являються сильні електричні поля поблизу приладів, які не мають спеціального захисту і використовують високу постійну напругу.

Постійне магнітне поле Землі утворюється струмами в середині неї. Воно орієнтовано відносно магнітних полюсів, а його напруженість залежить від географічних координат і досягає 55,7 А/м у магнітних полюсів і 33,4 А/м у магнітного екватора, де вектор напруженості паралельний поверхні Землі.

В середніх широтах напруженість складає приблизно 40 А/м.

На постійне поле накладається геомагнітне поле, створене струмами в магнітосфері і іоносфері. Воно повільно змінюється і містить широкий спектр частот, в тому числі низькочастотну (до 100 Гц) складову, напруженість якої $\sim 0,1$ А/м, яка при магнітних бурях значно зростає.

Геомагнітні постійні і низькочастотні поля, на відміну від електричних, не екрануються стінками будинків і іншими об'єктами. Всередині споруд, що мають сталевий каркас, напруженість геомагнітного поля зменшується в декілька разів.

Типові напруженості електричного і магнітного полів на об'єктах енергетики, що призводять до порушення ритму роботи серця, наведені в таблиці 9.2, згідно даних ВОЗ, IRPA, і DIN VDE (німецькі індустріальні норми Союзу німецьких електротехніків).

Таблиця 9.2 – Електромагнітна обстановка на об'єктах електроенергетики

Назва об'єкта або параметра	Напруженість електричного поля, В/м	Напруженість магнітного поля, А/м
ОРУ 500, 750 кВ	$103-5 \cdot 10^4$	10–100
ВЛ 380 кВ	$103-10^4$	1–40
ВЛ 330 кВ	$103-5 \cdot 10^3$	10–100
ВЛ 110 кВ	$102-3 \cdot 10^3$	0,1–20

Таким чином, сильні електричні поля промислової частоти утворюються об'єктами електроенергетики (ЛЕП ВН, збірні шини підстанцій, трансформатори і апарати ВН).

Напруженість поблизу ВЛ 220 кВ і вище може сягати границі індивідуальної чутливості поля, коли людина по деяким ознакам може встановити присутність поля.

Напруженість електричних полів, що їх створюють побутові електроприлади, приводи систем живлення, – по амплітуді менша природної напруженості постійного поля Землі. Таким чином, магнітна обстановка всередині приміщень визначається головним чином, постійним полем Землі, на яке накладаються змінні поля. Амплітуда цих полів має такий же порядок величин, як і змінна складова природного поля Землі.

Напруженість магнітного поля промислової частоти всередині приміщень може бути досить високою, якщо поблизу розташована ВЛ електропередачі, прокладені кабелі або розташовані потужні електротехнічні пристрої.

Напруженість поля від ЛЕП, навіть на відстані декілька сотен метрів від лінії, може досягати десятої долі А/м.

Кабельні лінії створюють більшу напруженість біля них, ніж повітряні, але напруженість зменшується інтенсивніше при віддаленні від кабелю і зона напруженості – десятих часток А/м, не перевищує декількох десятків метрів.

Кабелі і ВЛ напруги 6÷10 кВ, завдяки малій відстані між фазами, створюють незначні напруженості поля і в приміщеннях ними можна нехтувати.

Поле трансформаторів системи електропостачання змінюється зворотно пропорційно відстані і може бути зафіксовано на відстані менш, ніж 10 м.

Мережі низької напруги створюють поле, залежне від не симетрії навантаження фаз і його напруженість зворотно пропорційна відстані і може бути зафіксована на відстані до 20 м.

У виробництві на робочих місцях напруженість магнітного поля промислової частоти може бути значно більшою. В екстремальних випадках, наприклад, поблизу зварювального апарата, електродугової пічки, або безпосередньо біля проводів потужних ВЛ при роботі під напругою, персонал може бути під напруженістю 1÷10 кА/м, що на два порядки перевищує напруженість поля Землі. Отже, напруженість магнітних полів значно менша порога чутливості людини.

Новим фактором, не притаманним природній обстановці, є поява ВЧ електромагнітних полів, які генеруються пристроями зв'язку, телекомунікацій, радіолокаційною технікою, мікрохвильовими апаратами і т. п. Напруженість цих полів мала порівняно до розглянутих і вона частково або повністю екрануються провідними стінками.

В житлових приміщеннях при сучасному виконанні мережі електроживлення, відсутності струмових петель, пов'язаних із заземленими системами водопроводу, опалення і т. п., напруженість поля визначається природнім магнітним полем, але не перевищує десятих часток А/м.

Вплив ВЧ полів на людину (наприклад радіотелефонний зв'язок) – потребує подальших ретельних досліджень.

Напруженість магнітного поля промислової частоти при ввімкненні електроприладів, не перевищує одного процента від напруженості постійного поля Землі. Вона має той же порядок, що і змінна складова природного поля Землі.

Таким чином, організм людини практично не відчуває впливу полів, тому електромагнітна обстановка в побуті не може трактуватися як електросмог. Виключення складає випадок використання потужних електроприладів, розташованих безпосередньо поблизу людини (праска, фен, електроінструмент).

На об'єктах електроенергетики напруженість електричного і магнітного полів можуть у десятки разів перевищує напруженості полів природного походження, тому потребує більш ретельного розгляду.

9.4 Нормування безпечних для людини напруженості полів

Процес удосконалення нормування безпечної для здоров'я людей напруженості електричного і магнітного полів і потоку потужності ВЧ полів, є дуже актуальним. Спостерігаються тенденції встановлення більш жорстких норм шляхом введення більших коефіцієнтів запасу і дослідження можливості виявлення ще не встановлених механізмів впливу на здоров'я людини, (наприклад, слабих, але тривало діючих полів промислової частоти) і визначити реальну небезпеку таких полів для здоров'я людини.

Процес перегляду норм щодо впливу електричних, магнітних і електромагнітних полів на людину є дуже динамічним і нормативні документи за рубежом часто переглядаються і змінюється їх правовий статус.

В основу нормування граничних напруженості магнітних і електричних полів покладені науково обґрунтовані механізми впливу на організм людини: зміна різниці потенціалів на мембранах при частотах нижчих за 10 кГц, і нагрів тканин при більш високих частотах. Базовими величинами є безпечні щільності струму в тканинах організму в діапазоні частот $4 \div 1000$ Гц – 10 мА/м^2 , а при частотах вищих за 10 кГц – питома енергія $\sim 4 \text{ Вт/кг}$.

При частоті 50 Гц такій щільності відповідають напруженості зовнішніх полів – 20 кВ/м і 4 кА/м.

При нормуванні допустимій напруженості полів і тривалості їх дії на робочих місцях і для населення, введені відповідні коефіцієнти запасу. Зокрема, при тепловому впливі ВЧ полів норми встановлюють по питомій енергії в 10 разів меншої за безпечну ($\sim 0,4 \text{ Вт/кг}$).

При низьких частотах також встановлюють коефіцієнти запасу: від 2,5 до 10 і вище. Гігієнічні норми всередині будівлі складають $\sim 0,5 \text{ кВ/м}$; при цьому напруженість електричного поля на границі відчуження ліній електропередачі не повинна перевищувати 1 кВ/м.

В США нормовані напруженості електричного поля на границі зони відчуження знаходяться в межах від 1 кВ/м до 3 кВ/м для різних штатів.

В деяких державах (Австралія) в виключних випадках для ліній 500 кВ допускається напруженість на границі зони відчуження $\sim 5 \text{ кВ/м}$.

Аналогічна ситуація з нормуванням допустимій напруженості магнітного поля промислової частоти на робочих місцях і для населення.

Рекомендації і норми різних міжнародних організацій і держав не погоджені між собою і можуть відрізнятися в декілька разів. А в деяких державах (в тому числі Росії) норми на допустимі напруженості магнітного поля промислової частоти для населення – взагалі відсутні!

Найбільш обґрунтованими і повними є тимчасові норми ENV50166, запропоновані Технічним комітетом CENELEC, які діють з 1995 р.

За базисну величину напруженості електричного поля при тривалій дії прийняті:

- постійне поле ~ 42 кВ/м;
- змінне з частотою $(0,1 \div 4)$ Гц ~ 30 кВ/м (критерій – відчуття по побічним ознакам).

В діапазоні частот $4 \div 1000$ Гц базисною величиною прийнята щільність струму в 10 мА/м^2 , чому відповідають напруженості 20 кВ/м і 4 кА/м .

Враховуючи механізми зміни різниці потенціалів на мембранах клітин при більш низьких частотах, базова щільність струму береться зворотно пропорційною, а при більш високих, – прямо пропорційною частоті.

Базисною величиною напруженості постійного магнітного поля прийнята величина $\sim 1,6 \text{ МА/м}$. Нормований струм, що протікає через людину при контакті з об'єктом, що знаходиться в електричному полі промислової частоти = $3,5 \text{ мА}$ – на робочих місцях і $1,5 \text{ мА}$ – для населення.

Норми по напруженості полів промислової частоти на робочих місцях поділяються на три категорії.

Перша категорія – $6,1 \text{ кВ/м}$ і 159 А/м : – обов'язкова інформація персоналу про поле;

Друга – $12,3 \text{ кВ/м}$ і 320 А/м і вище – обов'язкові заходи про обмеження часу перебування в полі;

Третя – $19,6 \text{ кВ/м}$ і 480 А/м – обов'язкове (крім обмеження перебуванні в полі) попередження: «небезпечна робота» !

Для населення базисні значення встановлені в 2,5 рази меншими, ніж на робочих місцях. Існує тенденція послаблення обмежень по напруженості при нормуванні, якщо буде доведено, що небезпека шкідливого впливу поля на людину перебільшена.

Згідно СанПіН 2.2.4.11910S, встановлені гранично допустимі рівні постійного магнітного поля:

- за робочий день до 10 хв – 24 кА/м ;
- при тривалості впливу $11 \div 60 \text{ хв}$ – 16 кА/м ;
- тривалості $61 \div 480 \text{ хв}$ – 8 кА/м .

Рівень допустимої локальної дії поля підвищується в 1,5 рази.

Напруженість електричного поля частотою 50 Гц на протязі робочої зміни може складати ~ 5 кВ/м. При скороченні терміну дії гранична напруженість збільшується до 20 кВ/м.

При напруженості $20 \div 25$ кВ/м допустимий термін перебування людини в полі складає 10 хв., а при напруженості вищу за 25, знаходження людини без засобів захисту не допускається !

Гранично допустимі рівні напруженості магнітного поля промислової частоти, діючого на все тіло людини:

- при терміні перебування до 1 години за зміну – 1600 А/м;
- до 2-х годин – 800 А/м;
- до 4-х годин – 400 А/м;
- до 8 годин – 80 А/м.

При локальній дії (наприклад, на кінцівки) гранично допустимі напруженості збільшуються в $4 \div 10$ разів в залежності від терміну перебування в полі.

Імпульсні поля промислової частоти можуть мати напруженість в залежності від режиму генерації і терміну дії від 6000 А/м до 1400 А/м, тобто значно більшу, ніж при безперервній дії.

В СанПІН 2.2.4.1191-03 нормовані допустимі напруженості, потоки потужності, експозиції ВЧ електромагнітних полів.

9.5 Нормування умов роботи персоналу в зоні впливу ПЛ

Для персоналу ПС і ліній НВН, що тривалий час перебуває під впливом електричного поля, граничні напруженості поля не повинні перевищувати значень, наведених в таблиці 9.3. Ці дані дійсні, якщо весь інший час людина знаходиться в місцях з напруженістю електричного поля меншу за 5 кВ/м і виключена можливість дії електричних розрядів.

Напруженість поля визначається на рівні голови людини (1,8 м над рівнем землі). При виконанні цих умов, забезпечується поновлення фізіологічного стану організму на протязі доби без остаточних функціональних і патологічних змін. При невиконання умов табл. 9.3 застосовують заходи по екрануванню робочих місць (тросові екрани над дорогами, екрануючі козирки і навіси над шафами управління, вертикальні екрани між фазами і т. п.).

Таблиця 9.3 – Допустима тривалість роботи персоналу в електричному полі промислової частоти

Напруженість електричного поля кВ/м	Допустима тривалість перебування персоналу на протязі доби, хв.
5	Без обмеження (на протязі робочого дня)
10	
15	
20÷25	

Для ОРУ ПС НВН одночасно із розрахунками, після її вводу в дію, здійснюють вимір напруженості поля в різних точках, після чого визначаються про необхідність екранного захисту. При ремонтних роботах застосовують з'ємні екрани.

Для ліній НВН, поблизу яких можливо знаходження персоналу сторонніх організацій і місцевого населення, встановлені наступні нормативи по допустимій напруженості під лінією без визначення допустимій тривалості перебування:

- 20 кВ/м – для труднодоступній місцевості (болота, горні схили);
- 15 кВ/м – для ненаселеної місцевості;
- 10 кВ/м – для перетинання з дорогами;
- 5 кВ/м – для населеної місцевості.

Крім того, нормується допустима напруженість на границях житлових будівель $\sim 0,5$ кВ/м, що допускає перебування людини в електричному полі необмежений час на протязі усього життя.

Якщо згідно розрахунків, при відстані проводів до землі, яке визначається перенапруженням, напруженості під лініями 330 кВ не перевищують 8,5 кВ/м, а під лініями 500 кВ – 14 кВ/м і не виникають утруднення при їх спорудженні в ненаселеній місцевості, то для ліній більш високого класу напруг, відстань до землі в тій же місцевості визначається допустимою напруженістю ~ 5 кВ/м.

Напруженість поля має найбільшу величину під лінією і по мірі віддалення від неї – швидко зменшується. Зона найбільшого впливу поля проводів знаходиться всередині прольоту, завдяки провисанню проводів, а найменшого – біля опор, де висота підвісу проводів найбільша. Саме тому дороги, пішохідні доріжки, лінії зв'язку і лінії більш низької напруги рекомендується розміщувати поблизу опор.

В охоронній зоні лінії не дозволяється розміщати постійних і тимчасових житлових і промислових споруд, та регламентується режим роботи персоналу.

Границі зони відчуження паралельні лінії і всередині неї напруженість поля перевищує 1 кВ/м; для ліній 500 кВ – це 25 м; а для 750 кВ – 40 м від крайніх фаз. Якщо при пересіченні лінією дороги необхідно знизити напруженість, то лінія екранується тросовими екранами у вигляді одного або двох тросів над кожною фазою, які підвішують на залізобетонних опорах і заземлюють на кінцях.

Тросові екрани застосовують і для зниження напруженості електричного поля на границях житлових будівель (біля стін житлових споруд).

Напруженості поля під лінією при нинішніх відстанях проводів до землі для ліній НВН значно перевищують допустимі для населення ~ 5 кВ/м.

Згідно сучасних вимог відстань від проводів до землі для ЛЕП 330 кВ повинна бути не менш 12 м; для ЛЕП 500 кВ – 16,5 м; для ЛЕП 750 – 22 м.

Враховуючи наявність на шинах станцій і виводах ліній більш низьких напруг, економічніше здійснювати такі виводи у вигляді комбінованих ліній, у яких під ланцюгом більш високої напруги розташований ланцюг більш низької напруги із зсувом системи напруг ланцюгів на 120° за рахунок зміни фази нижнього ланцюга (наприклад, 330/110, 500/220, 750/330). Можливе використання ліній з сильним зближенням фаз, екранування ліній, тощо.

В густонаселеній місцевості такі рішення можуть бути прийняті для всієї ЛЕП НВН, оскільки вони не тільки знижують напруженість поля, але підвищують його пропускну спроможність

Вторинним фактором, що суттєво впливає на роботу в охоронній зоні, є струм, що стікає з провідного, але ізольованого об'єкта при доторканні до нього. Величина цього струму визначається напругою лінії, ємністю об'єкту відносно лінії, яка визначається об'ємними параметрами об'єкта і активним опором людини. Його можна розрахувати за виразом

$$I_{np} = K_{\phi} V E, \quad (9.1)$$

де K_{ϕ} – коефіцієнти форми об'єкту; V – об'єм об'єкту; E – напруженість електричного поля на рівні 1,8 м над землею.

Таким чином, стікаючий струм пропорційний напруженості поля і об'єму об'єкта. Наприклад, при напруженості поля 15 кВ/м комбайн СК-4 з причепом дає стікаючий струм $\sim 6 \div 6,5$ мА, великі автобуси $\sim 5 \div 6$ мА, тобто вони можуть бути небезпечні для жінок і дітей.

Згідно даним американських вчених, безпечним для чоловіків є струм – 9 мА, для жінок – 6,5 мА, для дітей – 4,5 мА (згідно ENV50166 встановлені більш жорсткі норми: 3,5 мА – на робочих місцях і 1,5 мА – для населення).

Ці норми регламентують умови труда і знаходження місцевого населення в охоронній зоні лінії 750 кВ і вище, зокрема, усі сільськогосподарські машини і механізми повинні бути обладнані двома заземлюючими ланцюгами з заглиблюваними заземлювачами.

Ефективним засобом обмеження напруженості поля під повітряними ЛЕП є рослинні масиви. В зоні суцільних рослинних масивів висотою $3 \div 4$ м (фруктові сади) при відстані між деревами $6 \div 8$ м, напруженість поля в міжряддях знижується в $2 \div 3$ рази порівняно з проходженням лінії в польових умовах.

9.6 Екологічний вплив коронного розряду

Коронний розряд на проводах ЛЕП створює перешкоди радіо- і телевізійному прийому а також акустичний шум. Причиною цього є стримерна корона на проводах, яка виникає переважно при атмосферних опадах, коли знижується початкова напруженість виникнення коронного розряду. В хорошу погоду перешкоди зростають при забрудненні проводів.

Радіоперешкоди. Спектр частот випромінювання, створюваних стримерною короною охоплює діапазон частот від 10 кГц до 1 ГГц. Перешкоди на частотах, вищих за 30 МГц, впливають на телеприйм і виникають тільки при коронуванні ЛЕП 750 кВ. В цьому випадку джерелом завад є також часткові розряди в зазорах і тріщинах ізоляторів і корона на загострених частинах арматури.

Інтенсивність радіоперешкод характеризується вертикальною складовою напруженості електричного поля поблизу поверхні землі (E_2).

Рівень радіоперешкод, дБ визначається величиною

$$Y = 10 \lg(E_2/E_1) = 20 \lg(E_2/E_1), \quad (9.2)$$

де E_1 – базова напруженість електричного поля, мкВ/м.

За базову напруженість приймають $E_1 = 1$ мкВ/м, тоді

$$Y = 20 \lg E. \quad (9.3)$$

В якості розрахункової частоти згідно рекомендації Міжнародного комітету по радіоперешкодам прийнято $f = 0,5$ МГц. Рівень корисного сигналу при такій частоті складає приблизно ~ 60 дБ. Радіоприйом вважається задовільним, якщо корисний сигнал перевищує перешкоди на 20 дБ. Тому допустимий рівень перешкод в хорошу погоду складає ~ 40 дБ, що відповідає напруженості поля $E = 100$ мкВ/м. Така величина напруженості електричного поля радіоперешкод прийнята в якості допустимого на відстані 100 м від проекції на землю крайнього проводу ЛЕП напругою 330 кВ і вище.

З віддаленням від лінії рівень перешкод знижується згідно залежності

$$Y_2 - Y_1 = 20 k \lg l_1 / l_2, \quad (9.4)$$

де Y_2, Y_1 – рівні радіоперешкод на відстані l_1, l_2 , відповідно; k – коефіцієнт затухання, рівний 1,6 в діапазоні частот $0,15 \div 1$ МГц.

Залежність між рівнем радіоперешкод і напруженістю електричного поля на поверхні проводів лінійна і розраховується за емпіричною формулою

$$Y_2 - Y_1 = k_1 \cdot l(E_{np2} - E_{np1}), \quad (9.5)$$

де E_{np2} , E_{np1} – напруженості на проводах, кВ/см; k_1 – коефіцієнт, рівний 1,8 при напруженості поля $\sim 20 \div 30$ кВ/см.

Збільшення радіуса проводів при незмінній напруженості на них призводить до збільшення рівня радіоперешкод, оскільки спад напруженості поля біля проводу в радіальному напрямку при цьому сповільнюється і створюються умови для розвитку більш інтенсивної стримерної корони. Зв'язок між рівнями радіоперешкод і радіусами проводів встановлюється емпіричною формулою

$$Y_2 - Y_1 = 20 \lg(r_2/r_1), \quad (9.6)$$

де r_2 , r_1 – радіуси проводів.

Радіоперешкоди практично не залежать від числа складових проводів розщепленої фази, оскільки відбувається взаємне електромагнітне екранування проводів фази.

Якщо відомий рівень радіоперешкод Y_1 на нормованій відстані від лінії і параметри E_1 і r_1 ретельно досліджуваною базовою лінії електропередачі, то рівень радіоперешкод при хорошій погоді Y_2 , створеною іншою лінією з параметрами E_2 і r_2 , може бути розрахований по узагальненій формулі

$$Y_2 = Y_1 + 1,8(E_2 - E_1) + 40 \lg(r_2/r_1). \quad (9.7)$$

Акустичний шум. Акустичний шум виникає переважно в погану погоду, коли посилюється інтенсивність коронування проводів. Акустичний шум містить дві складові: шипіння, що відповідає частоті 100 Гц і кратним частотам; та широкосмуговий шум.

Перша складова обумовлена рухом об'ємного заряду біля проводів, що двічі за період створює хвилі звукового тиску.

Друга генерується стримерною короною.

Рівні гучності шумів в дБ (А) вимірюються із застосуванням корегуючи фільтрів типу А, які дають змогу врахувати фізіологічні особливості органів слуху людини.

Особливо інтенсивний шум від корони виникає при сильному дощі, але сам дощ створює шум, який перевищує акустичний. Тому більш суттєві перешкоди при мрячному дощу, тумані, при мокрих проводах.

Рівень гучності в цьому випадку на $5 \div 6$ дБ (А) нижчий, але значно перевищує загальний звуковий фон.

Оцінка акустичного шуму здійснюється за умов «вологих проводів».

Оцінка гучності при дощі здійснюється за емпіричною формулою

$$A = 16 + 1,14 E_{max} + 9 r + 15 \lg n - 10 \lg l, \quad (9.8)$$

де A – рівень гучності, дБ(А); r – радіус проводу, см; E_{max} – максимальна напруженість на поверхні проводів, кВ; n – число проводів в розщепленій фазі; l – відстань від крайньої фази, м.

Для чистих районів допустимі напруженості на поверхні проводів ВЛ визначаються акустичними перешкодами при діаметрі проводів $d > 3,26$ см.

В районах з промисловим забрудненням допустимі напруженості визначаються радіоперешкодами при $d = 2,7 \div 3,3$ см і акустичним шумом при $d > 3,3$ см.

Для вирішення проблеми електромагнітної сумісності ліній електропередачі радіоприймальних систем різноманітного призначення з метою їх нормального функціонування, важливим завданням є визначення реального рівня напруженості поля перешкод, створюваних ПЛ. Причиною завад від ЛЕП може бути: корона на проводах; часткові розряди; корона на ізоляторах; пробій або перекриття дефектних ізоляторів; корона на лінійній арматурі і розпорках проводів розщепленої фази; іскрінням між елементами лінійної арматури та ін.

Зниженню радіоперешкод від ПЛ і покращенню електромагнітної обстановки вздовж трас сприяє нормування рівня радіоперешкод. Ці норми створюють юридичну основу відношень між проектувальниками і власниками радіоприймальних засобів.

У більшості держав встановлені національні норми на величини напруженості поля перешкод, створюваних повітряними лініями електропередач і високовольтним обладнанням (табл. 9.4). Для порівняння вимог національних норм допустимі рівні радіоперешкод були перераховані на відстань 100 метрів від ПЛ і на частоту 0,5 МГц, рекомендовані СИСПр (міжнародний спеціальний комітет по перешкодам) в якості базисної при розрахунках.

Таблиця 9.4 – Норми різних країн на радіоперешкоди від ПЛ

№ пп	Держава	Частота виміру	Місце виміру	Погодні умови 80% часу	Норми, дБ	Допустимі рівні радіоперешкод на відстані 100 м від проекції крайній фази на землю	
						Хороша погода	50 % часу
1	РФ	0,5 МГц	Відстань від крайній фази	80	43	37	43
2	США	1 МГц	Відстань від проекції крайній фази	80	52	27,3	33,6
3	Японія	1 МГц	Під лінією	50, дождь	53	24,9	30,9
4	Індія	0,5 МГц	На границі зони відчуження	Хороша погода	46	24,7	30,7
5	Польща	0,5 МГц	Відстань від проекції крайній фази на землю	50 Хороша погода	46	27,6	33,6

Для оцінки негативного впливу ПЛ на радіоприйом необхідно використовувати не тільки абсолютні значення напруженості поля завад, але і величину відношення сигнал/завада, тобто відношення напруженості поля корисного сигналу і напруженості поля завад, виміряних в одному місці.

Одна і та ж лінія електропередачі може бути джерелом значних завад для районів з низьким рівнем корисного сигналу і малих завад в зонах з високим рівнем сигналу. Початковою величиною при розробці норм на радіоперешкоди є гарантований рівень захищеного корисного сигналу. У

відповідності до міжнародної практики за мінімальну напруженість поля радіосигналу, яку необхідно захищати від перешкод на частоті 1 МГц, прийнятий рівень 60 дБ, а на частоті 0,5 МГц – 66 дБ. Взаємозв'язок між відношенням сигнал/завада і якістю прийому встановлюється на практиці (експериментально).

9.7 Вплив ліній електропередач на лінії зв'язку

Лінії електропередач впливають на лінії провідного зв'язку завдяки різним механізмам взаємодії і можуть досягати величин, небезпечних для обслуговуючого персоналу і перевищувати електричну міцність кабелю зв'язку та вхідних пристроїв апаратури управління.

Вплив за рахунок індуктивного зв'язку обумовлений проходженням частини або всього змінного струму ПЛ по ланцюгу провід-земля. Це можливе при несиметричному навантаженні трьохфазних ПЛ, при роботі лінії по системі два проводи-земля, при однофазних або двофазних замиканнях ПЛ на землю. Магнітному впливу підлягають всі лінії провідного зв'язку, – як повітряні, так і кабельні.

Вплив за рахунок ємнісного зв'язку обумовлений наявністю навколо провідної повітряної лінії електричного поля. Проводи ліній зв'язку (ЛЗ), які розташовані в зоні дії поля, підлягають впливу потенціалу цього поля.

Електричному впливу підлягають проводи повітряних ЛЗ, а також кабельні лінії зв'язку, підвішені на опорах, які не мають металевих оболонок.

Вплив через гальванічний зв'язок обумовлено протіканням в землі силових струмів. Гальванічному впливу підлягають заземлені металеві оболонки кабелів і ланцюги повітряних і кабельних ліній зв'язку, які використовують в якості зворотного проводу – землю.

Розрахунок поздовжніх ЕРС в проводах зв'язку при аварійному режимі ПЛ з заземленою нейтраллю здійснюють для найбільш несприятливого випадку положення точок КЗ, змінюючи місця їх розташування по довжині зближення.

При розрахунку поздовжньої ЕРС розглядають КЗ ПЛ із графіка в самій небезпечній точці, коли вплив поля буде найбільший. Зазвичай, це відповідає КЗ на початку і кінці зближення.

Екранування.

При розрахунках рівня впливу ПЛ і ЛЗ необхідно враховувати екрануючу дію різноманітних металевих комунікацій, розташованих в зоні впливу і з'єднаних із землею. До таких комунікацій відносяться залізничні рейки, трубопроводи, оболонки силових кабелів і кабелів зв'язку, тунелі і колектори, грозозахисні троси ПЛ і т.п.

Екрануючий ефект залежить від особистого опору екрана, розташування його відносно ПЛ і ЛЗ, умов заземлення, питомого опору

землі, а для екранів з магнітними матеріалами – також від поздовжньої ЕРС, яка наводиться в екрані впливаючим струмом.

Засоби захисту від небезпечного впливу

Якщо по техніко-економічним або експлуатаційним умовам неможливо прокласти трасу ПЛ або ЛЗ, щоб індуковані в проводах ЛЗ напруги не перевищували допустимих значень, використовують спеціальні методи захисту, до яких відносяться:

- застосування хороше провідних заземлених грозозахисних тросів, а також спеціальних провідників, прокладених в землі;
- часткове розземлення нейтралів трансформаторів високовольтної мережі, що забезпечує зниження струмів КЗ;
- використання на ПЛ з ізолюваною нейтраллю апаратури для контролю стану ізоляції фазних проводів по відношенню до землі, або перекошу фазних напруг, що дозволяє знаходити і усувати електричний вплив ПЛ на ЛЗ;
- часткове або повне кабелювання ПЛ із заземленою нейтраллю;
- використання швидкодіючого захисту для відключення пошкодженої

ПЛ із заземленою нейтраллю.

До спеціальних методів захисту ЛЗ відносяться:

- ввімкнення спеціальних розрядників між кожним проводом і землею.

Для повітряних ЛЗ загальна кількість розрядників на 100 км ЛЗ не повинна перевищувати для ущільненого ланцюга – 15 шт., а для неущільненого – 25 шт. Допустима кількість розрядників обмежена експлуатаційними міркуваннями і можлива установка більшого їх числа. Захист розрядниками ланцюга напівавтоматичної блокування і ланцюгів фідерних ліній провідного радіо не припускається;

- включення розділювальних трансформаторів в телефонні ланцюги без дистанційного живлення і розділювальних трансформаторів з захисними контурами при наявності дистанційного живлення;
- включення дренажних котушок або дроселів із заземленою середньою точкою в телефонні мережі без дистанційного живлення і дренажних котушок з резонансними заземлюючими контурами в телефонні ланцюги з дистанційним живленням;
- часткове або повне кабелювання ЛЗ;
- заміна залізобетонних або металевих опор ЛЗ на дерев'яні в межах підсилюючої ділянки ЛЗ, на якій є небезпечні зближення з ПЛ;
- застосування високовольтного режиму обслуговування ЛЗ;
- ввімкнення редуційних трансформаторів;
- заміна кабелю зв'язку на кабель з підвищеним захистом.

Захист ЛЗ редуційними трансформаторами

Одним з ефективних засобів захисту ЛЗ від небезпечного впливу ліній високої напруги є використання редуційних трансформаторів (РТ), який в деяких випадках дає значний економічний ефект порівняно з іншими методами захисту.

Редуційний трансформатор містить два О-подібних магнітопровода з електротехнічної сталі Е-320 (товщина пластин 0,35 мм), на яких розміщена обмотка. В якості первинної обмотки використовується оболонка (зовнішній провідник) кабелю, а вторинною обмоткою слугують жили (внутрішній провідник) кабелю. На магнітопроводі розміщені дві однакові обмотки, виконані кабелем, – з метою захисту за допомогою одного трансформатора одразу двох кабелів при двохкабельній системі зв'язку. При однокабельній системі зв'язку обмотки трансформатора вмикаються послідовно.

Трансформатор розміщений в сталюму герметичному корпусі, покритому антикорозійною фарбою. Для вводу захищеного кабелю в корпусі зроблені спеціальні отвори.

Принцип дії трансформатора РТ полягає в наступному.

Первинна обмотка вмикається в розріз металевих покрів кабелю, які заземлюються по кінцям захищеної ділянки, а вторинна обмотка – в розріз жил кабелю. При протіканні струму в ланцюгу: металеві покриви-земля, – тобто в первинній обмотці, у вторинній індуктується ЕРС, напрям якої протилежний ЕРС, яка індуктована в жилах кабелю від впливу ліній високої напруги. Таким чином, сумарна ЕРС в жилах кабелю зменшується.

Перешкоджаючий вплив ПЛ на ланцюги ЛЗ виникає при справному стані ПЛ і діє весь час, поки повітряна лінія знаходиться під напругою.

Перешкоджаючі напруги в телефонних каналах тональної частоти створюються електричними полями струмів і напруг ПЛ як основної частоти, так і частот гармонічних складових струмів і напруг ПЛ.

Перешкоджаючі напруги в телефонних каналах високої частоти створюються магнітними і електричними полями струмів і напруг каналів високочастотного зв'язку по проводам ПЛ.

Якщо симетрична трифазна ПЛ з ізольованою нейтраллю залишається в роботі при умовах заземлення однієї з фаз на строк більш, ніж 2 години, то необхідно визначати перешкоджаючий вплив такої ПЛ при роботі її в цьому режимі.

При розрахунку перешкоджаючих напруг в телефонних ланцюгах ЛЗ від впливу ПЛ з ізольованою нейтраллю, враховується магнітний вплив фазних струмів і електричний вплив фазних напруг ПЛ в нормальному режимі роботи при ширині зближення до 30 м, і тільки магнітний вплив фазних струмів при ширині зближення більшої за 30 м.

При аварійному режимі роботи такої ПЛ враховують електричний вплив фазних напруг. При розрахунках перешкоджаючих впливів в телефонних ланцюгах ЛЗ від ПЛ з заземленою нейтраллю, необхідно

враховувати магнітний вплив фазних струмів, струмів нульової послідовності і електричний вплив фазних напруг ПЛ при ширині зближення до 50 м.

При ширині зближення від 50 до 200 м враховується магнітний вплив фазних струмів і струмів нульової послідовності.

При ширині зближення більше 200 м – тільки магнітний вплив струмів нульової послідовності.

Засоби захисту від заважаю чого вплив. До спеціальних засобів захисту на ПЛ відносяться заборона режиму роботи по системі два проводи–земля або провід–земля.

До спеціальних засобів захисту на ЛЗ відносять:

- часткова або повна заміна повітряних ЛЗ на кабельні, що дозволяє повністю виключити електричний вплив на ділянках кабелювання, знизити напругу завад від магнітного впливу у відповідності з коефіцієнтом екранування оболонки і броні кабелю, а також не враховувати можливість впливу високочастотних каналів зв'язку по ПЛ на ВЧ канали по ланцюгам ЛЗ, які працюють в співпадаючому спектрі частот;

- застосування кабелів із спеціальною оболонкою і бронею, які забезпечують підвищене екранування;

- зміну профілю ЛЗ з крюкового на траверсний;

- відмову від каналу тональної частоти і заміна їх ВЧ каналами;

- використання в телефонних каналах спеціальних пристроїв, які дають змогу знизити ефективність впливу перешкод на корисний сигнал в 3÷4 рази; використання на кабельних ЛЗ редуційних і інших трансформаторів.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Харлов Н. Н. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике: учебное пособие / Н. Н. Харлов. – Томск : Изд-во ТПУ, 2007. – 207 с.
2. Методические указания по выполнению расчетно-графической работы по курсу «Электромагнитная совместимость в электроэнергетике» / [разраб. С. В. Нестеров]. – Новосибирск : НГТУ, 2011. – 70 с.
3. Шваб А. Электромагнитная совместимость : А. Шваб; пер. с нем. / В. Д. Мазина и С. А. Спектор. – Под. ред. И. П. Кужекина. [2-е изд., перераб. и доп.]. – М. : Энергоатомиздат, 1998. – 480 с.
4. Э. Хабигер Электромагнитная совместимость. Основы обеспечения её в технике : пер. с нем. Э. Хабигер, И. П. Кужекина ; Под. ред. Б. К. Макимова. – М. : Энергоатомиздат, 1995. – 304 с.
5. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий : учеб. пособие / И. В. Жежеленко. – М. : Энергоатомиздат, 1994. – 360 с.
6. Шапиро Д. Н. Основы теории электромагнитного экранирования : учеб. пособие / Д. Н. Шапиро. – Л. : – Энергия, 1978. – 275 с.
7. Уайт Д. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств / Д. Уайт Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств // науч. журнал – Сов. радио, 1979. – Вып 1. – С. 120–125.
8. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле : учебник для электротехнич., энергетич., приборостроит. спец. вузов, Л. А. Бессонов. – [8-е изд., перераб. и доп.]. – Высш. шк., 1986. – 263 с.

ДОДАТОК А

ПРОТОКОЛ № 1

Вплив струмів і напруг промислової частоти на контрольні кабелі

Номер кабелю	Траса	Місце впливу	Напруга кабелю, кВ	Струм екрану кабелю кА	Термін дії, с	Допуст. значення $U_{50Гц}$, кВ	Допуст. значення $I_{50Гц}$, А	Висновки
ОРУ 220 кВ (струм КЗ 12,9 кА)								
—	ОРУ-220 кВ-РЩ 220 кВ	Обладнання ОРУ-220 кВ	4,5	1250	0,1	1	230	Напруги і струми вищі за норму
ОРУ 500 кВ (струм КЗ 7,2 кА)								
—	ОРУ-500 кВ-РЩ 500 кВ	Обладнання ОРУ-500 кВ	0,5	120	0,5	1	130	Напруги і струми нижчі за норму

Навчальне видання

РОЙ Віктор Федорович

**ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ У СИСТЕМАХ
ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ**

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

*(для студентів 5 курсу денної та 6 курсу заочної форм навчання
магістерської програми за спеціальністю
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка)*

Відповідальний за випуск *П. П. Рожков*

За авторською редакцією

Комп'ютерне верстання *І. В. Волосожарова*

План 2018, поз. 134Л

Підп. до друку 14.03.2018 Формат 60x84/16
Друк на ризографі. Ум. друк. арк. 4,8
Тираж 50 пр. Зам. №

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002.
Електронна адреса: rectorat@kname.edu.ua.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи :

ДК № 5328 від 11.04.2017.