

Якість електричної енергії та додаткові втрати потужності в обладнанні електричних мереж

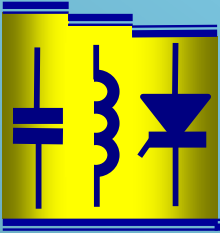
Д.т.н., професор

Варецький Юрій Омелянович,

Інститут Енергетики і Систем Керування

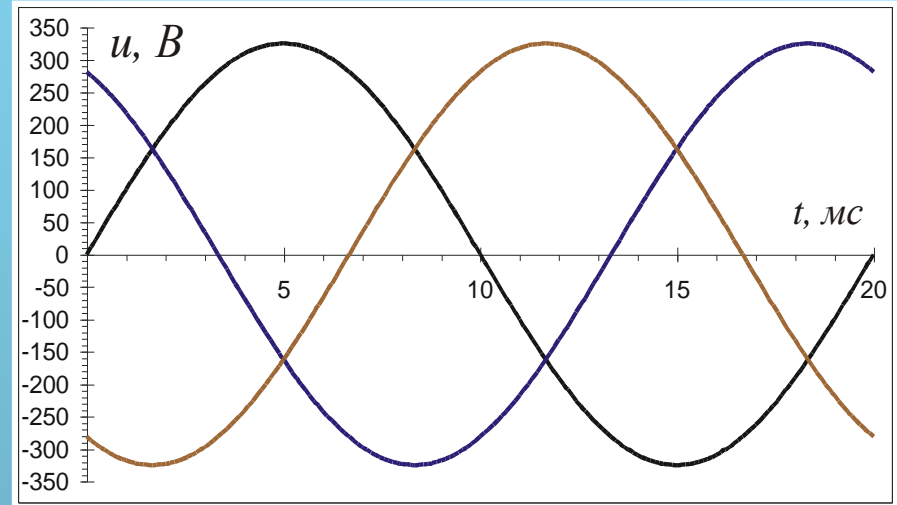
Кафедра електроенергетики і систем управління

J.Varetsky@gmail.com

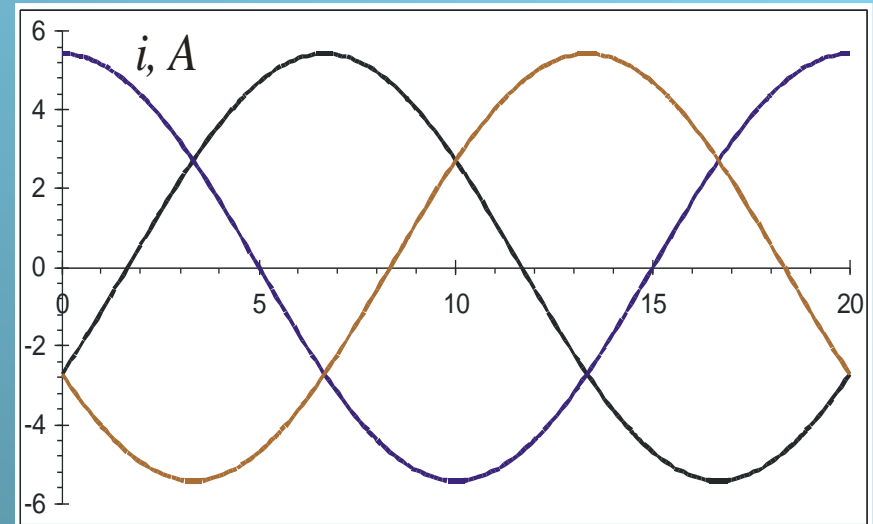


Старі Добрі Часи

**Ідеальна
трифазна
напруга**



**Трифазне
симетричне
навантаження**





Збурення в електричних мережах

Impulsive Transients	Spectral Content	Typical Duration	Voltage p.u.
Short	5-ns rise	< 50 ns	
Medium	1- μ s rise	50 ns-1 ms	
Long	.1-ms rise	> 1 ms	
Oscillatory Transients			
Low Frequency	<5 kHz	0.3-50 ms	0-4
Medium Frequency	5-500 kHz	20 μ s	0-8
High Frequency	0.5-5 MHz	5 ms	0-4

Short Duration			
Interruption		0.5-30 Hz	< 0.1
Sag		0.5-30 Hz	0.1-0.9
Swell		0.5-30 Hz	1.1-1.8

Momentary			
Interruption		30 Hz-3 s	< 0.1
Sag		30 Hz-3 s	0.1-0.9
Swell		30 Hz-3 s	1.1-1.4

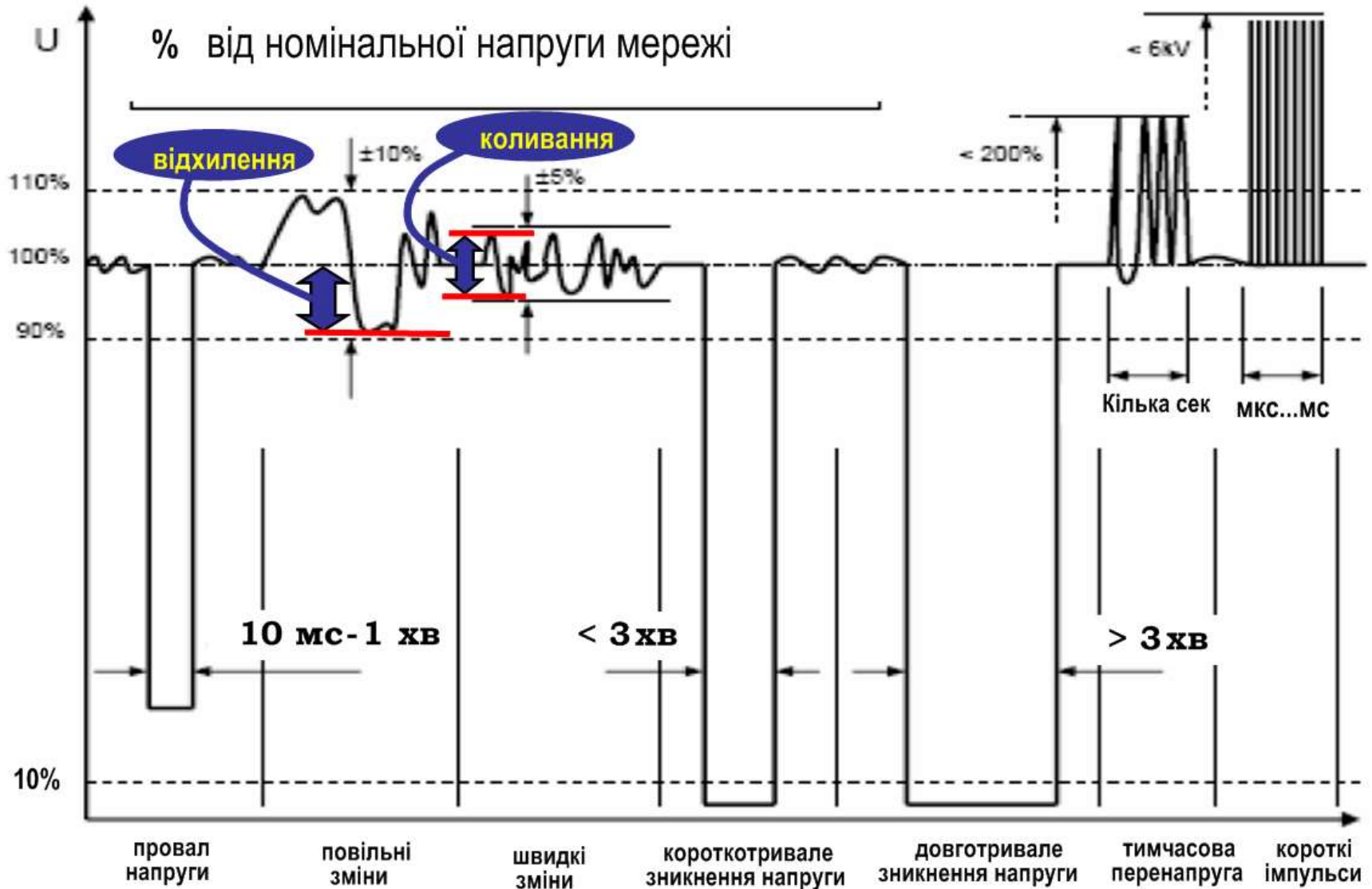
Temporary			
Interruption		3 s-1 min	< 0.1
Sag		3 s-1 min	0.1-0.9
Swell		3 s-1 min	1.1-1.2

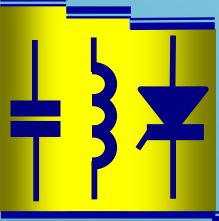
Категорії збурень згідно з МЕК

Long			
Interruption, Sustained		> 1 min	0.00
Undervoltages		> 1 min	0.8-0.9
Overt Voltages		> 1 min	1.1-1.2
Voltage Unbalance		Steady-state	0.05-0.2
DC Offset		Steady-state	0-0.01
Harmonics	0-100th harmonic	Steady-state	0-0.20
Interharmonics	0.6 kHz	Steady-state	0-0.02
Notching		Steady-state	
Noise	Broad-band	Steady-state	0-0.01
Voltage Fluctuations	< 25 Hz	Intermittent	0.01-0.7
Power Frequency Variations		< 10 s	

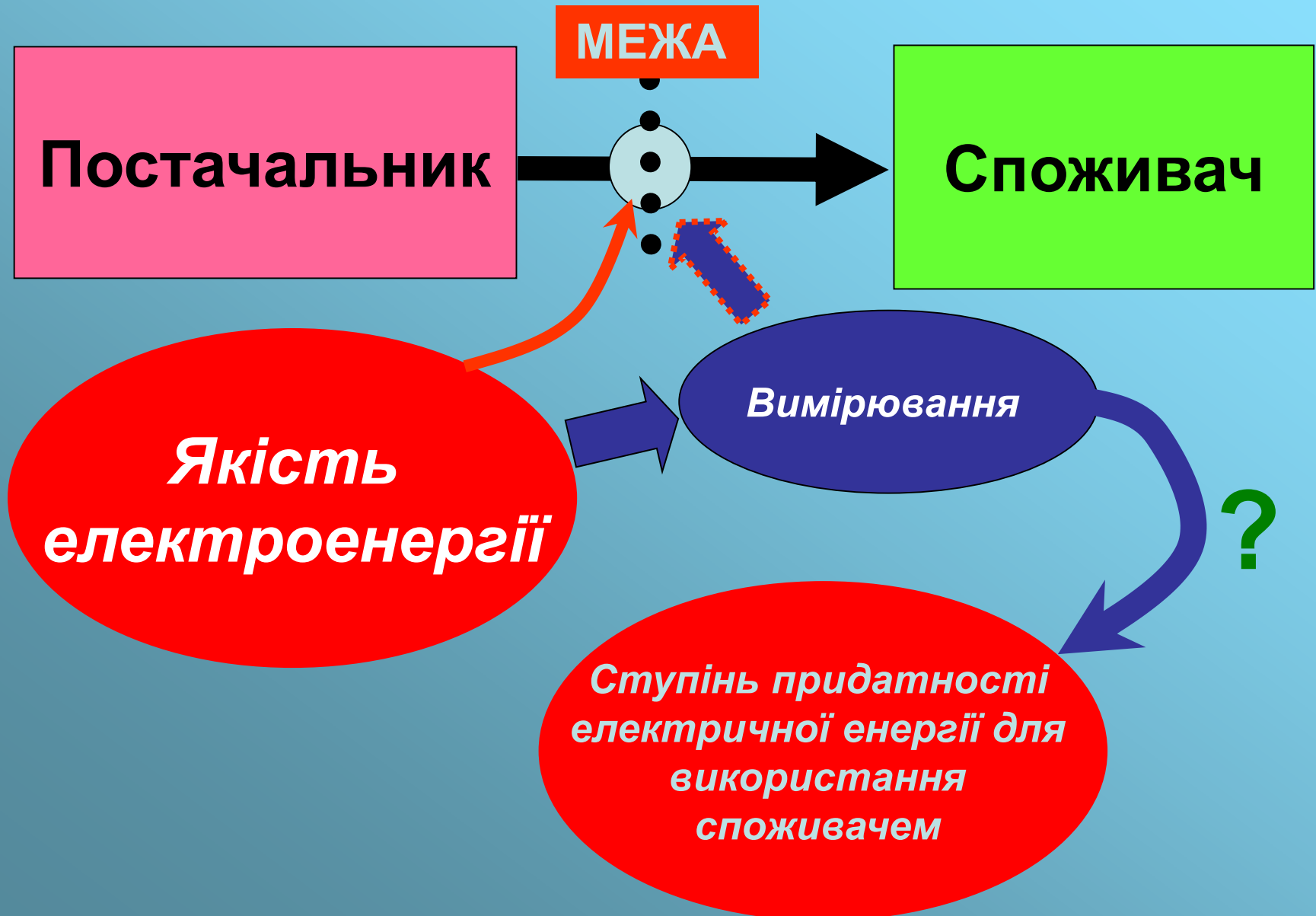


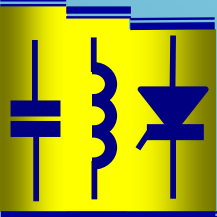
Зміни напруги в електричних мережах



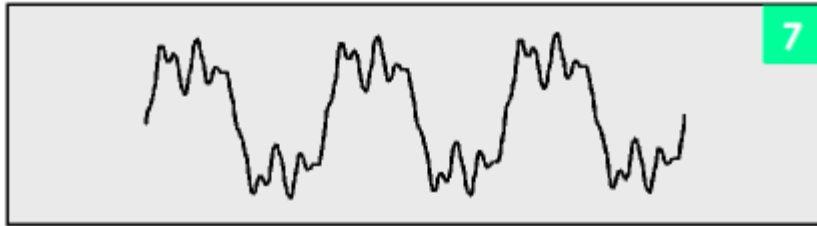


Якість електроенергії – проблема





Показники якості електроенергії

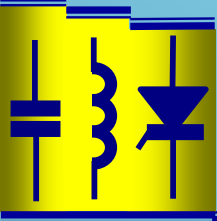


Спотворення форми кривої
напруги - гармоніки

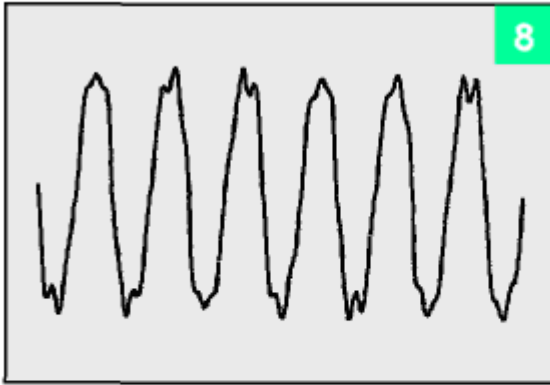
Гармоніка
складова розкладу в ряд Фур'є
змінної напруги чи струму
за період робочої
частоти

Гармоніки можуть викликати такі проблеми, як телефонні завади, перегрівання двигунів і трансформаторів, перегорання плавких запобіжників конденсаторів, збільшення струмів нейтральних провідників, проблеми в електронних системах керування.

Спотворення форми хвиль напруги та струми на заданому інтервалі часу оцінюють пристроями спектрального аналізу, які використовують алгоритми перетворення Фур'є для розрахунку амплітуд і кутів зсуву фаз окремих частотних складових.



Показники якості електроенергії

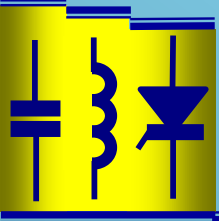


Спотворення форми кривої напруги - інтергармоніки

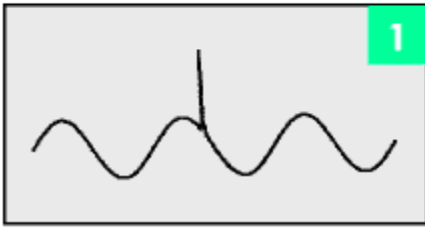
Можуть виникнути під час роботи регульованих приводів змінного струму з невідповідним фільтром в колі постійного струму. Внаслідок недостатнього відфільтровування гармонік інвертора зі сторони ланки постійного струму. Це явище може також має місце в системах електропостачання регульованих приводів змінного струму з безпосередніми перетворювачами частоти, які не мають ланки постійного струму, а також електродугових печей, які генерують безмежний спектр паразитних частот.

Інтергармоніка

Частотна складова змінної напруги чи струму не кратного до робочої частоти порядку



Показники якості електроенергії

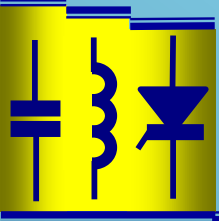


Імпульс
напруги

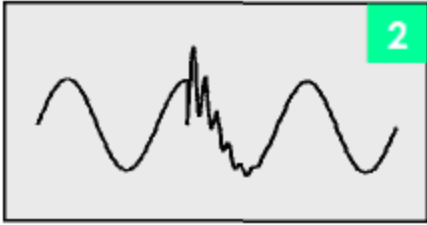
Імпульс

*Раптова зміна напруги
тривалістю декілька мілісекунд
зі швидким збільшенням
і наступним повільнішим
неколивним зменшенням
її значень*

Загальновідомі, як комутаційні імпульси або імпульси напруги. Імпульси можуть бути викликані невідрегульованими автоматичними вимикачами, ввімкненнями конденсаторних батарей, блискавкою, або короткими замиканнями в мережі. Вони характеризуються раптовою швидкою зміною, високою амплітудою, певним часом згасання і високою енергією.



Показники якості електроенергії



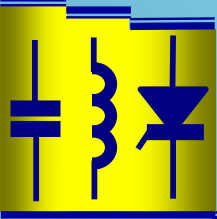
Коливний імпульс
напруги

Коливний імпульс

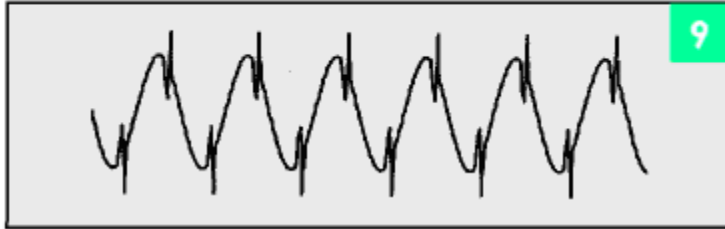
Раптова коливна зміна напруги з вищою від робочої частотою зі згасаючим колювання тривалістю до кількох мілісекунд

Коливний імпульс як імпульсний перехідний процес може бути результатом реакції системи електропостачання чи навантаження на певні зміни їх схеми або режиму (планові чи аварійні комутації, короткі замикання, пошкодження ізоляції тощо).

Частоти власних колювань знаходяться в межах 5...500 кГц залежно від причин і умов виникнення.



Показники якості електроенергії



Комутаційні спотворення форми кривої напруги

Западання напруги

Періодичне збурення напруги, яке виникає під час нормальної роботи силових електронних приладів, таких як тиристори чи транзистори

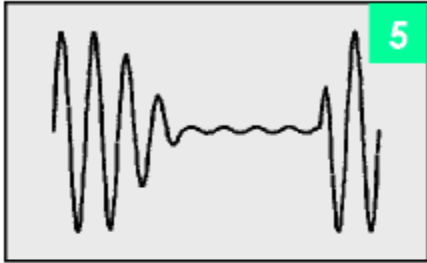
Западання напруги не є, як правило, проблемою, якщо правильно вибрано елементи демпфувальних кіл, які приєднано до комутаційних приладів.

Западання напруги можуть бути значною проблемою у слабких електричних мережах, де вони можуть спричиняти струми шуму, які викликають хибну роботу систем керування.

Западання напруги можуть викликати додаткові переходи кривої напруги через нульову лінію, викликаючи хибну роботу систем керування деякого обладнання.



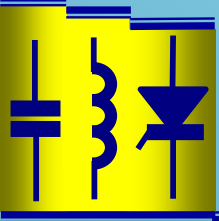
Показники якості електроенергії



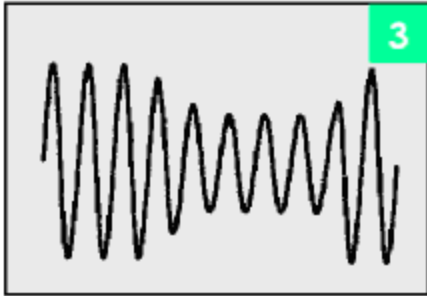
Тимчасова перерва електропостачання

**Зникнення напруги
(перерва електропостачання)
Зменшення напруги до нуля
чи практично до нуля
в електропостачальній
системі**

Дев'яносто процентів усіх коротких замикань на повітряних лініях розподільних мереж мають тимчасовий характер. Звичайно, ці короткі замикання виникають внаслідок дії блискавки, торкання гілок дерев, чи інших зовнішніх причин. Лінії розподільних мереж захищаються вимикачами з автоматичним повторним увімкненням (АПВ). Ці вимикачі спочатку вимикають пошкоджену ділянку, а потім автоматично відновлюють схему мережі, вмикаючи її, і, якщо пошкодження самоусунулося, то вимикач залишається ввімкненим. Якщо пошкодження залишається, то вимикач автоматично вимикається і знову вмикається. Такий процес, звичайно, має трикратне повторення перед повним вимкненням.



Показники якості електроенергії

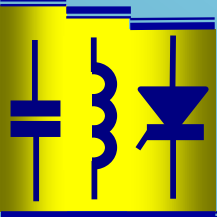


Провал напруги

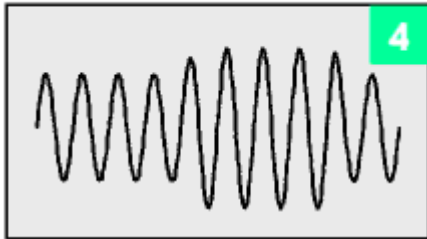
Це короткочасне, тривалістю декілька періодів, зменшення напруги до значення, яке знаходиться в межах від 10% до 90% номінальної напруги. Провали напруга є результатом короткочасних значних спадів напруги, запуску великих двигунів, коротких замикань на сусідніх лініях електропередачі.

Провал напруги

Раптове короткочасне зменшення напруги в електропостачальній системі на час від півперіода робочої частоти до хвилини



Показники якості електроенергії

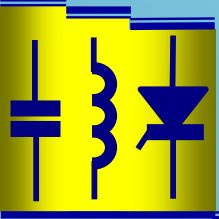


Перенапруга

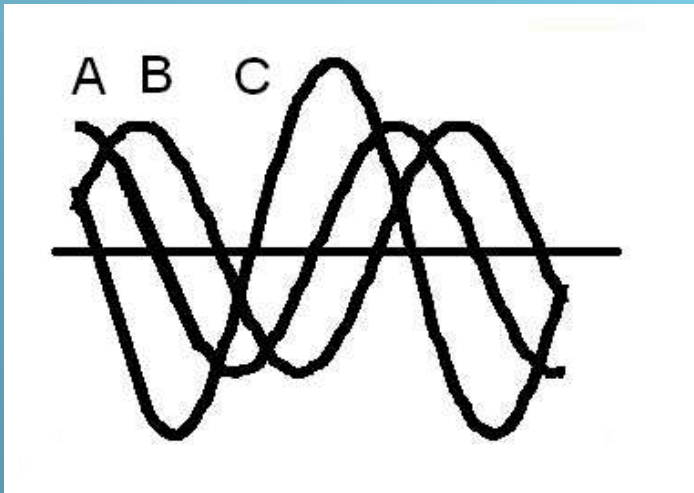
Перенапруга

Тимчасове збільшення напруги, значення якої перевищує допустиме стандартом значення найбільшої робочої напруги в електропостачальній системі

Це тимчасове збільшення напруги знаходиться в межах від 110% до 180% номінальної напруги. Короткотривала перенапруга може виникнути від однофазного замикання в електричній мережі, яке спричинює збільшення напруги на двох інших фазах. Вона може також виникнути після вимкнення потужного навантаження або ввімкнення батареї конденсаторів.



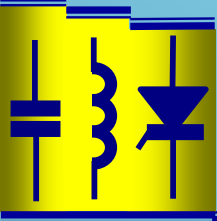
Показники якості електроенергії



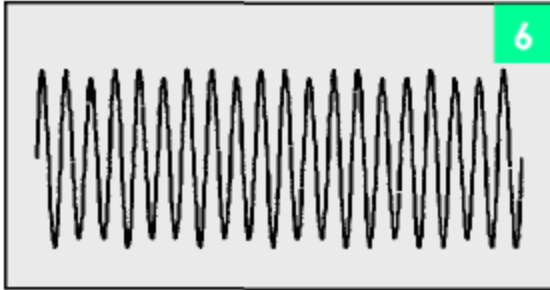
Несиметрія напруг

Порушення симетрії напруг у трифазній системі, спричинене пофазною неоднаковістю характеристик її елементів чи електроприймачів

Основними причинами несиметрії напруги є: несиметрія параметрів ЛЕП, потужні несиметричні навантаження (дугові печі, зварювальні установки, тяговий транспорт тощо), пошкодження конденсаторних батарей. Несиметрія напруг на Вашому підприємстві може бути викликана зовнішніми причинами, тобто тими, які виникли в системі електропостачання чи на сусідньому підприємстві. Особливо це стосується "сусідства" з переліченими потужними навантаженнями.



Показники якості електроенергії



Коливання напруги

Коливання напруги

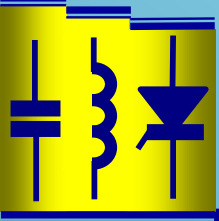
*Серія одноразових змін напруги
чи неперервне повторення змін
обгинальної середньоквадратичних
значень напруги*

Мигтіння (флікер) викликається надто швидкими змінами освітлення від ламп розжарення та флуоресцентних ламп, які відчуває людське око. Вони спричинюються різкими змінами (коливаннями) напруги в межах нормальних допустимих відхилень від 90 до 110%. Коливання напруги можуть спричинятися електричними дуговими печами, зварювальними пристроями чи іншими швидко-змінними навантаженнями. В слабкій електричній мережі вони можуть виникати під час роботи великих регульованих приводів змінного струму з невідповідним фільтром в ланці постійного струму. При цьому гармоніки, які не є функціями основної частоти, інвертуються в мережу живлення і викликають пульсування струму основної частоти.



Рецидиви низької якості

- € Збільшення струмів і втрат в електричних мережах
- € Зниження енергетичної ефективності обладнання
- € Зниження функційної здатності /збільшення інвестицій
- € Перегрівання і зменшення термінів експлуатації
- € Пошкодження обладнання
- € Неправильна робота систем керування процесами
- € Низька якість продукції кінцевих виробництв
- € Порушення виробничих процесів



ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ

ЦЕ здатність електроприймачів та іншого електроустаткування задовільно функціювати у спільній системі електроспоживання без створення **недопустимих електромагнітних завад**

Простіше -

- не генерувати забагато завад
- мати достатній імунітет до завад

Якість електроенергії і втрати виробництва



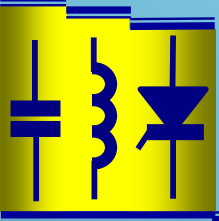
LEONARDO ENERGY
POWER QUALITY

European Power Quality Survey

POOR POWER QUALITY COSTS EUROPEAN BUSINESS MORE THAN €150 BILLION A YEAR

Reliability and consistency of electricity supply is critical to many industrial and service activities. When the Power Quality is inadequate, business suffers. It is both surprising and alarming that companies often do not recognize that the causes of poor reliability are of their own making and that cost-efficient solutions are in their own hands. This was one of the main conclusions drawn from a European-wide survey in 2007.

Надійність та неперервність електропостачання є критично важливими для багатьох промисловості та сфери обслуговування. Коли якість електроенергії невідповідна, бізнес страждає. Це і дивно, і насторожує, що компанії часто не усвідомлюють, що причини низької якості пов'язані з їх власною діяльністю, а економічно ефективні рішення - у власних руках. Це стало одним з головних висновків, проведених в рамках загальноєвропейського опитування 2007 року.



Зміна концепції оцінки електроенергії

КІЛЬКІСТЬ

ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЯ

ВАРТІСТЬ

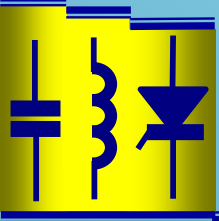


КІЛЬКІСТЬ

ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЯ

ВАРТІСТЬ

ЯКІСТЬ



Вплив відхилень напруги на втрати електроенергії

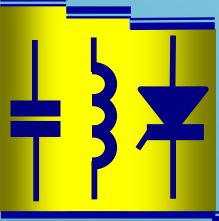
Асинхронні двигуни при навантаженні 100%

Зниження напруги на 10%

Ковзання \rightarrow +23 %

Струм \rightarrow +11 %

Приріст температури \rightarrow + 6-7%

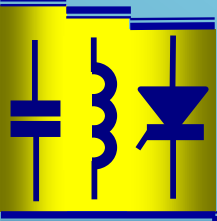


Вплив відхилень напруги на втрати електроенергії

Конденсаторні батареї

Підвищення напруги

Додатні відхилення напруги призводять до збільшення генерованої реактивної потужності, що викликає **збільшення втрат активної потужності** в конденсаторах і, яка наслідок, **підвищення їх температури**. А це, в свою чергу, призводить до прискорення процесів старіння ізоляції, які відбуваються значно інтенсивніше ніж в інших типах електроприймачів.



Вплив несиметрії напруги на втрати електроенергії

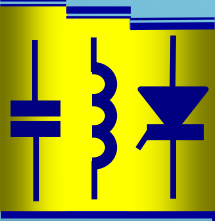
Асинхронні двигуни

Несиметрія напруги є **головною причиною** пошкодження двигунів.

Збільшення температури негативно впливає на ізоляцію обмоток двигуна суттєво зменшуючи час його експлуатації.

Для уникнення цих наслідків **потрібно знижувати навантаження двигуна.**

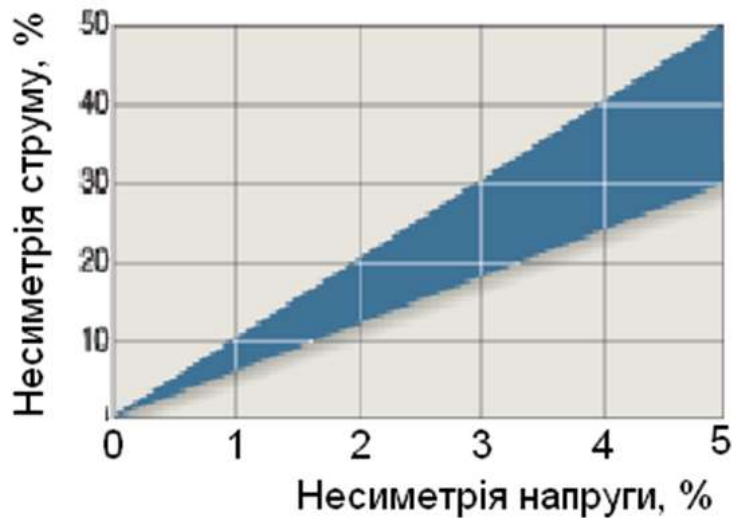
Вимірювання несиметрії напруги в мережі **потрібно здійснювати при вимкненому двигуні**, оскільки під'єднання двигуна до мережі призводить до зниження несиметрії напруги, що дещо злагоджує гостроту проблеми.



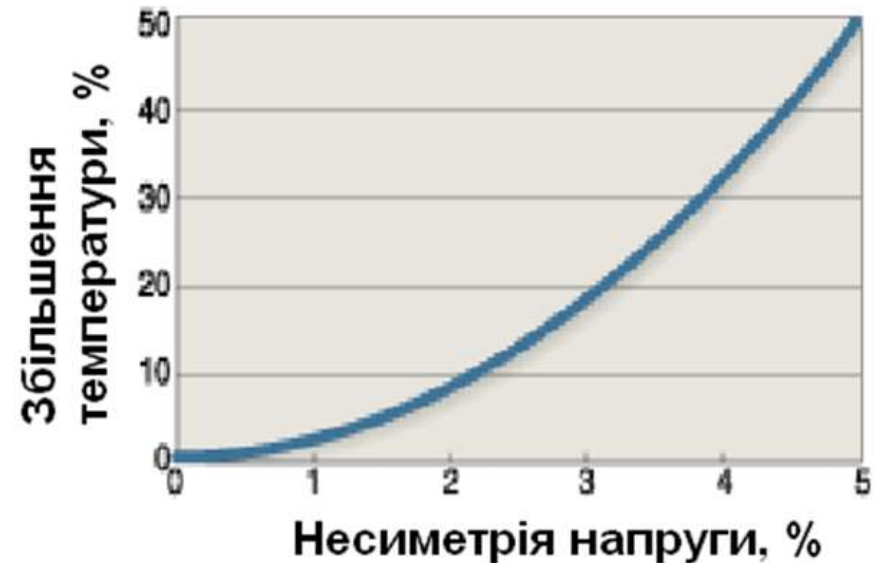
Вплив несиметрії напруги на втрати електроенергії

Асинхронні двигуни

Несиметрія напруги породжує набагато більшу несиметрію струму навантаженого двигуна



Несиметрія напруги суттєво збільшує температуру двигуна

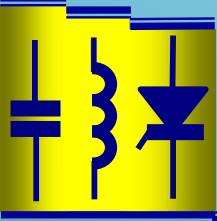




Вплив несиметрії напруги на втрати електроенергії

Вплив несиметрії напруги на робочі характеристики типового асинхронного двигуна з номінальним навантаженням

U_2/U_1 %	Температура обмотки (°C)	I^2R втрати (% загальних)	Зниження ККД	Очікуваний час експлуатації (років)
0	120	30%	—	20
1	130	33%	до 1/2%	10
2	140	35%	1-2%	5
3	150	38%	2-3%	2.5
4	160	40%	3-4%	1.25
5	180	45%	5% і більше	менше 1

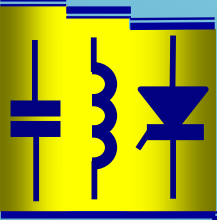


Вплив несиметрії напруги на втрати електроенергії

Асинхронні двигуни – деномінація (derating)

Несиметрія напруги	Зниження навантаження
1%	0
2%	95%
3%	88%
4%	82%
5%	75%

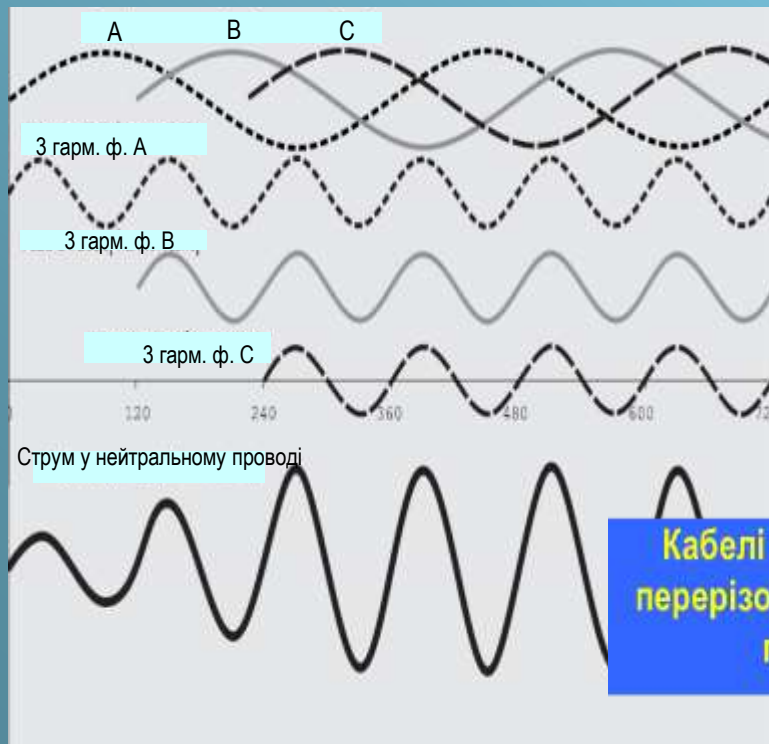




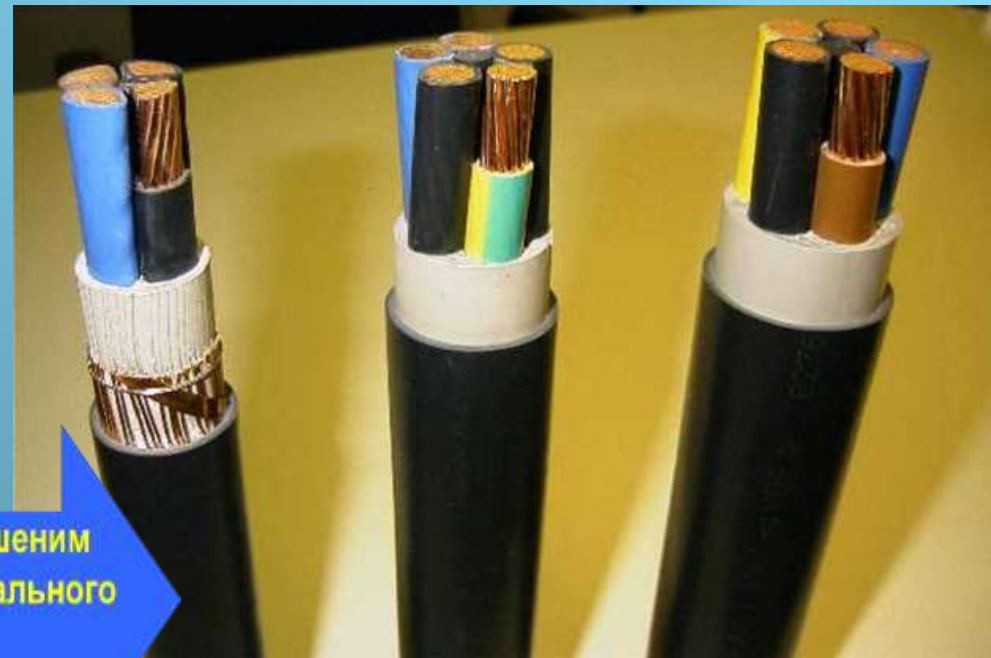
Вплив гармонік на втрати електроенергії

Проблеми з гармоніками струму в кабелях

Перегрівання нейтрального проводу



Кабелі зі збільшеним
перерізом нейтрального
проводу





Вплив гармонік на втрати електроенергії

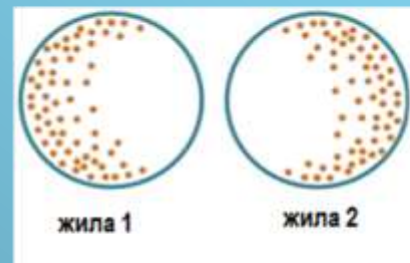
Характер втрат у кабелях з нелінійним навантаженням

Поверхневий ефект

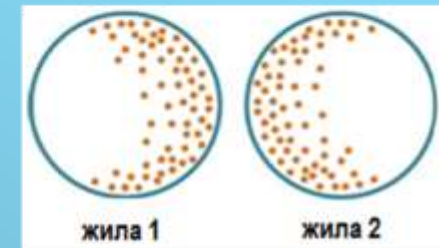


Поверхневий ефект *naskórkowości* (ang. *skin effect*), полягає в тому, що струм у провіднику не протікає рівномірно через увесь поперечний переріз, а його густина зростає з наближенням до поверхні.

Ефект зближення



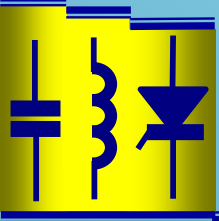
одно напрямлені струми



протилежно напрямлені струми

Ефект зближення (ang. *proximity effect*) виникає під час зближення провідників зі струмом. У випадку, коли струми провідників протікають у одному напрямку, найвища густина струму виникає в провідних частинах найбільш віддалених один від одного. У разі протилежних напрямів струму найвища густина струму буде найближчих частинах цих провідників.

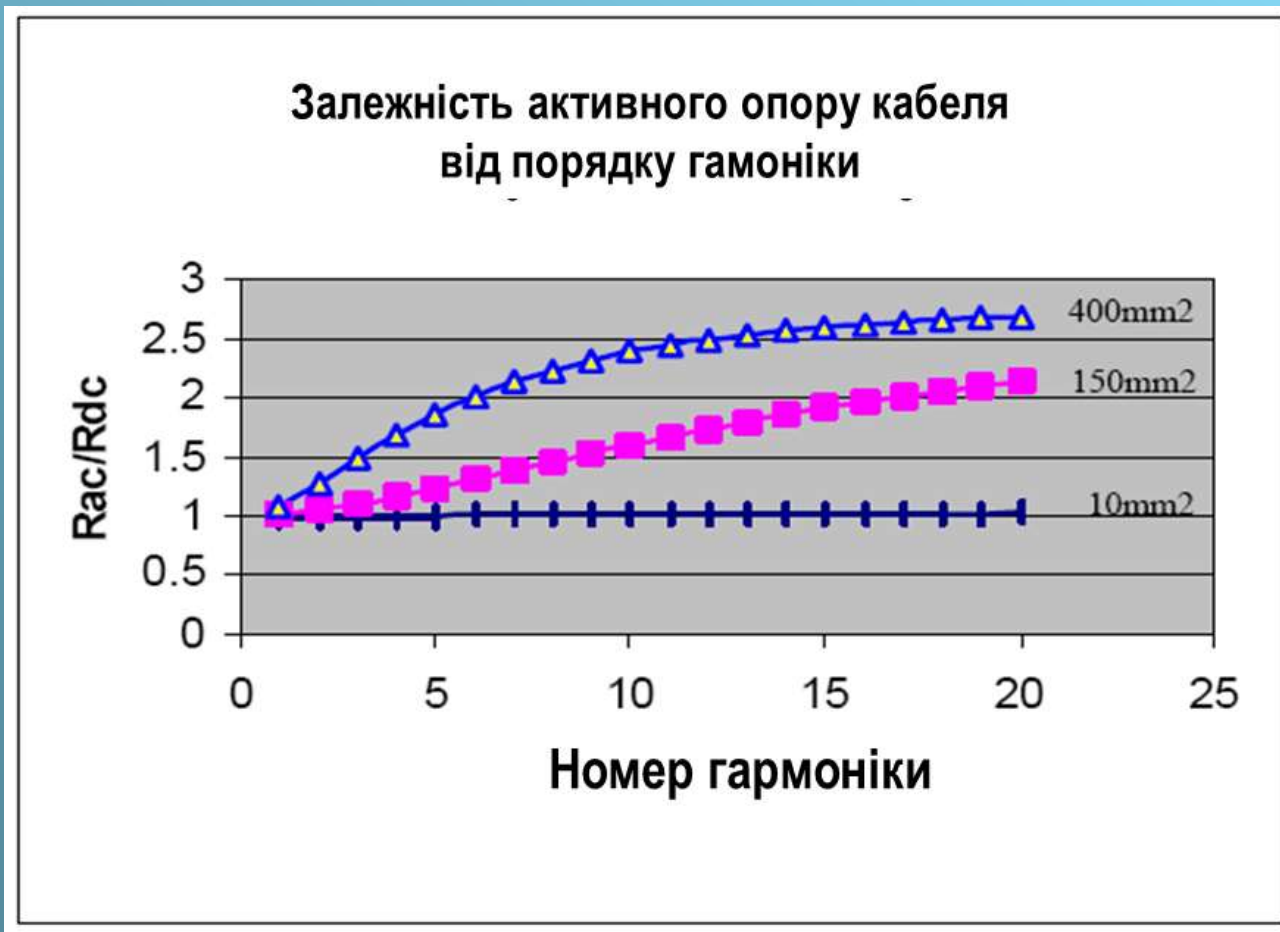
Зростання частоти інтенсифікує ефект витіснення струму в провідниках. Це призводить до додаткових втрат потужності і нарівання провідника.

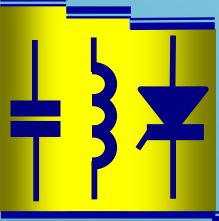


Вплив гармонік на втрати електроенергії

Характер втрат у кабелях з нелінійним навантаженням

Застосування багатопровідникових кабелів знижує гостроту проблеми.





Вплив гармонік на втрати електроенергії

Вплив гармонік струму на опір жили кабелю

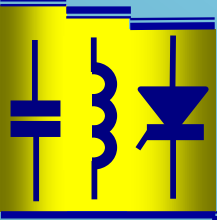
$$R_{(h)} = [1 + y_s(h) + y_p(h) + y_a(h)] \cdot R_{DC} = (1 + d_{(h)}) \cdot R_{DC}$$

$y_s(h)$ - коефіцієнт збільшення опору жили кабелю, зумовлений поверхневим ефектом, для гармоніки струму h ;

$y_p(h)$ - коефіцієнт збільшення опору жили кабелю, викликаний ефектом зближення;

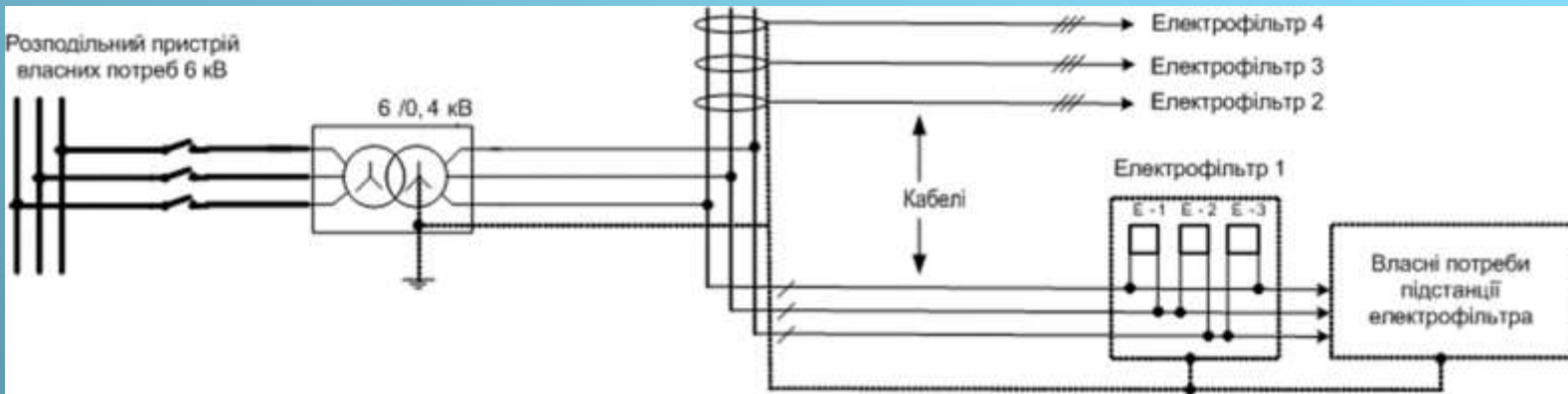
$y_a(h)$ - коефіцієнт збільшення опору, зумовлений впливом оболонки кабелю;

R_{DC} – активний опір провідника постійному струму при робочій температурі.



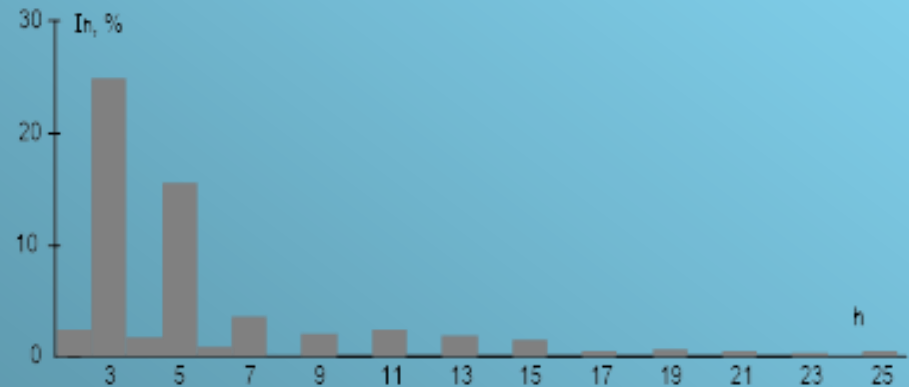
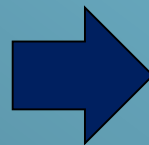
Вплив гармонік на втрати електроенергії

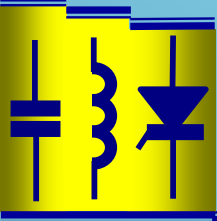
Приклад мережі живлення електрофільтрів ТЕЦ



Для електропостачання фільтрів використано кабель XLPE-0,6/1 кВ з алюмінієвими провідниками $4 \times 185 \text{ мм}^2$

Максимальні значення гармонік струму навантаження





Вплив гармонік на втрати електроенергії

Приклад мережі живлення електрофільтрів ТЕЦ

Сумарні додаткові втрати потужності ΔP_{Lh} від протікання струмів гармонік у фазних жилах:

- для кабелю з суцільними жилами – 1554 Вт;
- для кабелю з багатопровідними жилами – 1424 Вт ,

а сумарні втрати потужності ΔP_{Nh} від протікання струмів гармонік у нульових жилах складають:

- для кабелю з суцільними жилами – 3162 Вт;
- для кабелю з багатопровідними жилами – 3013 Вт.

Коефіцієнт зростання сумарних втрат активної потужності за присутності гармонік складе:

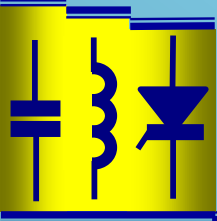
- для кабелю з суцільними жилами -

$$K_{\Delta P} = \frac{\Delta P}{\Delta P_1} * 100 = \frac{20562}{15846} 100 = 130\% ,$$

- для кабелю з багатопровідними жилами -

$$K_{\Delta P} = \frac{\Delta P}{\Delta P_1} * 100 = \frac{20283}{15846} 100 = 128\% .$$

В мережі живлення електрофільтрів дійсне навантаження кабелю не повинно перевищувати 87,8% від його розрахункового значення, визначеного за каталогом для синусоїдного режиму для кабелю з суцільними жилами, і 88,4% - для кабелю з багатопровідними жилами.



Вплив гармонік на втрати електроенергії

Додаткові втрати в трансформаторах

Втрати в трансформаторі ΔP прийнято поділяти на втрати, які не залежать від навантаження ΔP_C (втрати в осерді), і втрати, які залежать від навантаження ΔP_{LL} (втрати в обмотках і металевих елементах конструкції):

$$\Delta P = \Delta P_C + \Delta P_{LL}$$

Втрати активної потужності, які залежать від навантаження, визначаються рівнянням:

$$\Delta P_{LL} = \Delta P_{DC} + \Delta P_{EC} + \Delta P_{OSL}$$

$$\Delta P_{DC} = 3R_{DC} \cdot \sum_{n=1}^{n_{\max}} I_n^2$$

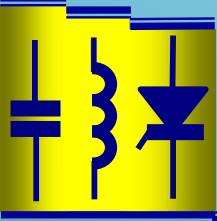
“омічні” втрати, що визначаються протіканням діючого значення струму в обмотці трансформатора

$$\Delta P_{EC} = \Delta P_{EC-R} \cdot \sum_{n=1}^{n_{\max}} \left(\frac{I_n^2}{I_1^2} n^2 \right)$$

втрати, що визначаються вихровими струмами, наведеними електромагнітним потоком в обмотках

$$\Delta P_{OSL} = \Delta P_{OSL-R} \cdot \sum_{n=1}^{n_{\max}} \left(\frac{I_n^2}{I_1^2} n^{0,8} \right)$$

втрати, що визначаються вихровими струмами, наведеними електромагнітним потоком в елементах конструкції



Вплив гармонік на втрати електроенергії

Додаткові втрати в трансформаторах - приклад

Параметри трансформатора ТСЗ-250/10

$$S_{\text{ном}} = 250 \text{ кВА}; U_{\text{ВН}} = 10 \text{ кВ}; U_{\text{НН}} = 0,4 \text{ кВ};$$

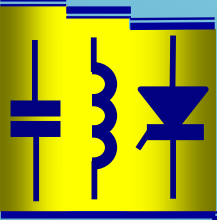
$$P_{\text{нх}} = 1 \text{ кВт}; P_{\text{кз}} = 3,8 \text{ кВт}; u_{\text{к}} = 5,5\%; I_{\text{х}} = 3,5\%.$$

$$\Delta P_{\text{DC}} = 3,420 \text{ кВт} \quad \Delta P_{\text{EC-R}} = 0,250 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_{\text{OSL-R}} = 0,125 \text{ кВт}.$$

Трансформатор живить споживачів з різним вмістом навантаження перетворювачів частоти 0,4 кВ з шестипульсними випростувачами на вході.

Вміст нелінійного навантаження	Складові втрат потужності			
	ΔP_{DC} , кВт	ΔP_{EC} , кВт	ΔP_{OSL} , кВт	ΔP_{LL} , кВт
100%	3,80	1,81	0,19	5,80
50%	3,52	0,64	0,14	4,30
25%	3,44	0,35	0,13	3,92



Вплив гармонік на втрати електроенергії

Додаткові втрати в трансформаторах – допустиме навантаження трансформатора

Порядок гармоніки	Струм, I_n в.о.	I_n^2	$I_n^2 \times n^2$
1	1,00	1,000	1,000
3	0,016	0,000	0,002
5	0,261	0,068	1,703
7	0,050	0,003	0,123
9	0,00	0,000	0,001
11	0,089	0,008	0,958
13	0,031	0,001	0,162
15	0,002	0,000	0,001
17	0,048	0,002	0,666
19	0,026	0,001	0,244
21	0,001	0,000	0,000
23	0,033	0,001	0,576
25	0,021	0,000	0,276
Сума		1,084	5,712

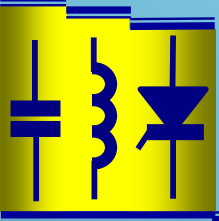
$$K = \frac{\sum I_n^2 \cdot n^2}{\sum I_n^2}$$

$$I_{Ln} = \sqrt{\frac{1 + \Delta P_{обм ном}}{1 + K \cdot \Delta P_{обм ном}}}$$

$$K = \frac{5,712}{1,084} = 5,3$$

$$I_{Ln} = \sqrt{\frac{1 + 0,08}{1 + 5,3 \cdot 0,08}} = 0,87$$

Навантаження трансформатора потрібно зменшувати!



Вплив гармонік на втрати електроенергії

Асинхронні двигуни

Гармонічні спотворення спричиняють збільшені втрати потужності, викликані вихровими струмами в обмотках.

Збільшуються втрати в обмотках і осердях

Різні обертові магнітні поля, котрі намагаються пришвидшити рух ротора (+) чи протидіяти (-) йому, або залишаються нерухомими відносно ротора (0)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0

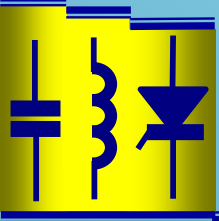


Гармоніки статора	1	5	7	11	13	17	19
Гармоніки ротора	-	6	6	12	12	18	18

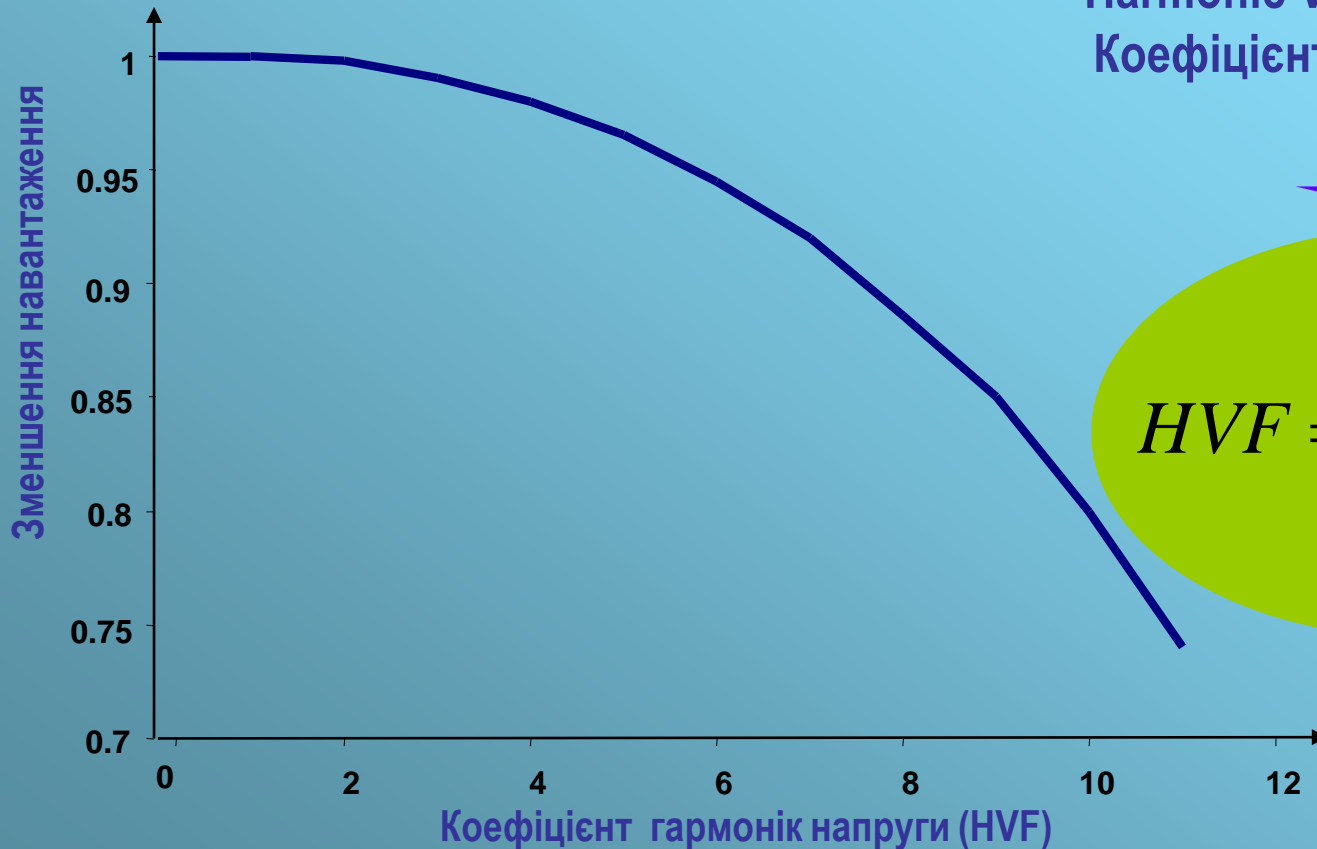
Наслідок – перегрівання двигуна і пульсації електромагнітного моменту!

Індуковані струми вищих гармонік збільшують втрати в роторі.

Якщо в напрузі живлення присутні гармоніки, допустиме навантаження двигунів повинно розраховуватися з їх врахуванням.



Вплив гармонік на втрати електроенергії

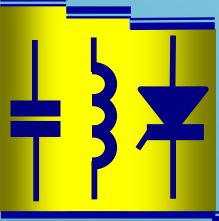


Harmonic Voltage Factor (HVF)
Коефіцієнт гармонік напруги



$$HVF = \sqrt{\sum_{n=5}^{n=\infty} \frac{U_n^2}{n}}$$

Зниження допустимого (номінального) навантаження двигуна при спотвореннях напруги!



Висновки

Зниження показників якості електроенергії призводить до додаткових втрат активної потужності в обладнанні електричних мереж.

Для вибору параметрів і допустимих навантажень кабелів, трансформаторів, двигунів для конкретних застосувань потрібно враховувати рівень показників якості електроенергії в електричній мережі і здійснювати оцінку можливих додаткових втрат потужності у цьому обладнанні.

Неврахування додаткових втрат активної потужності є причиною перегрівання обладнання та прискореного старіння ізоляції, що суттєво збільшує ймовірність пошкодження і виходу з ладу обладнання.



Якість електричної енергії та додаткові втрати потужності в обладнанні електричних мереж

Дякую за увагу

