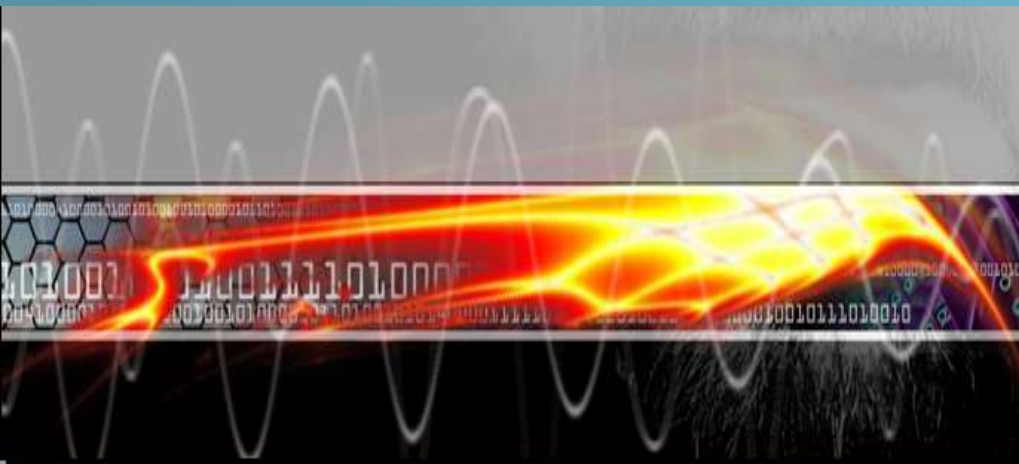


Проблеми компенсації реактивної потужності в електричних мережах з нелінійними навантаженнями

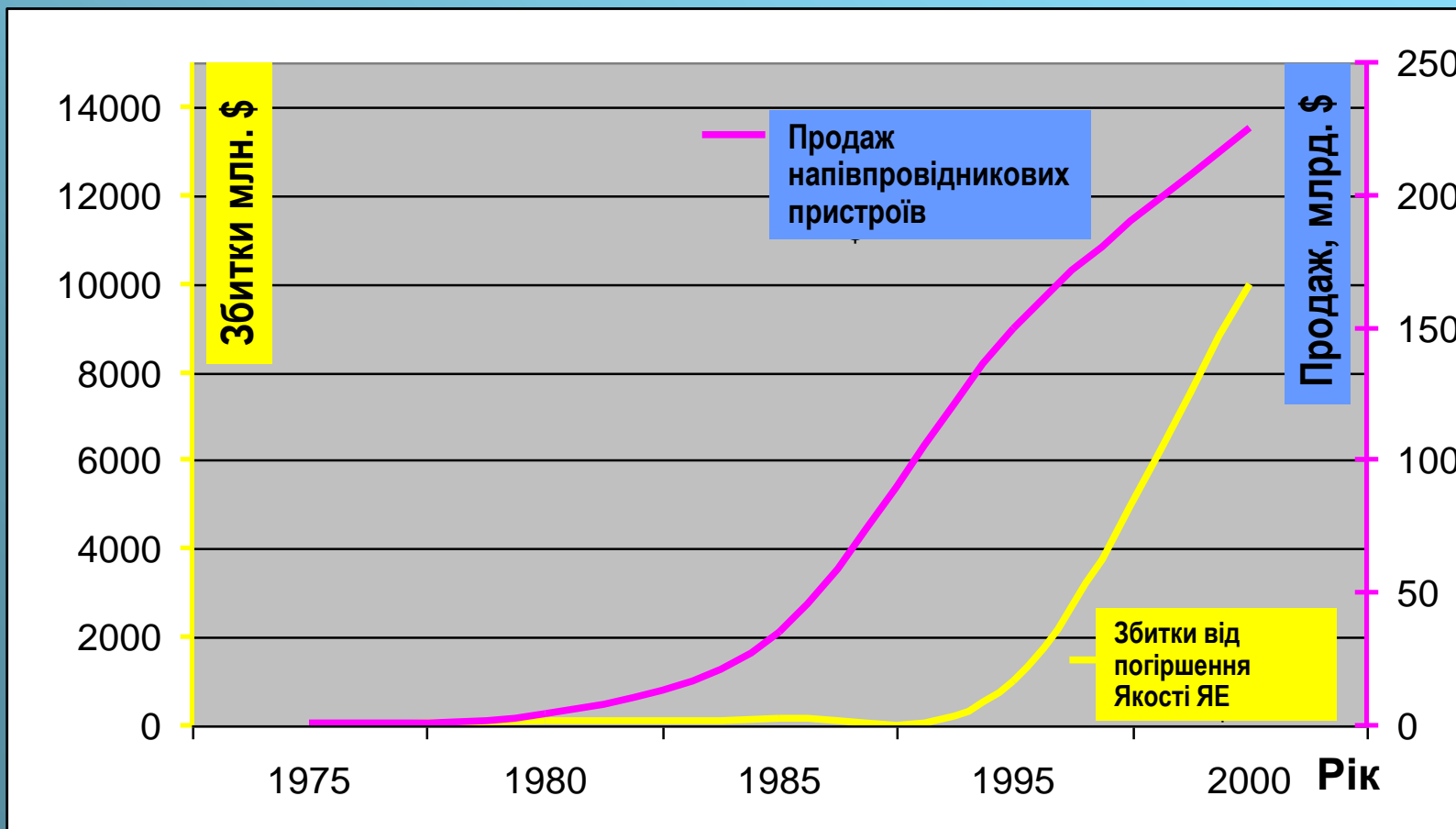
Національний Університет “Львівська політехніка”
Інститут Енергетики і Систем Керування
Кафедра електроенергетики і систем управління

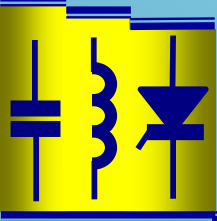
*Д.т.н., професор
Юрій Варецький*





Тенденції Smart споживання





Джерела гармонік струму

Типові рівні гармонік струму характерних нелінійних електроприймачів

Тип навантаження	Порядок гармоніки							
	1	3	5	7	9	11	13	15
6 пульс. випростувач	100	—	17	11	—	5	3	—
12 пульс. випростувач	100	—	3	2	—	5	3	—
18 пульс. випростувач	100	—	3	2	—	1	0.5	—
24 пульс. випростувач	100	—	3	2	—	1	0.5	—
Комп'ютер	100	56	33	11	5	4	2	1
Комп. фл. лампа	100	18	15	8	3	2	1	0.5
Офіс з комп. технікою	100	51	28	9	6	4	2	2
Рег. ел. привод зм. струму	100	1 – 9	40 – 65	17 – 41	1 – 9	4 – 8	3 – 8	0 – 2



Компенсація реактивної потужності і гармоніки

Дійсний коефіцієнт потужності True Power Factor

$$\text{TPF} = P/S \leq \cos \varphi_1$$

Синусоїдний струм

$$S^2 = P^2 + Q^2$$

$$\cos \varphi = P/S$$

$$\text{TPF} = \cos \varphi$$

Синусоїдна напруга
Несинусоїдний струм

$$U = U_1 \quad I = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}$$

$$P = U I_{i,1} \cos \varphi_1 \quad Q = U I_{i,1} \sin \varphi_1$$

$$S = UI \quad S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}$$

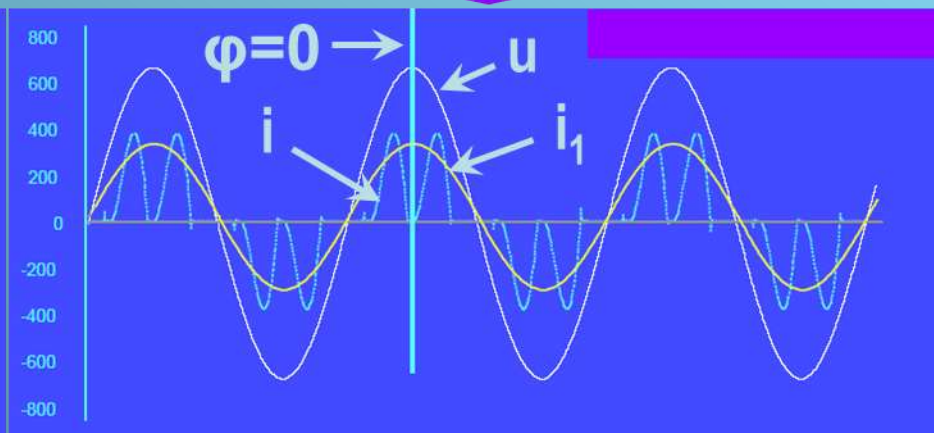
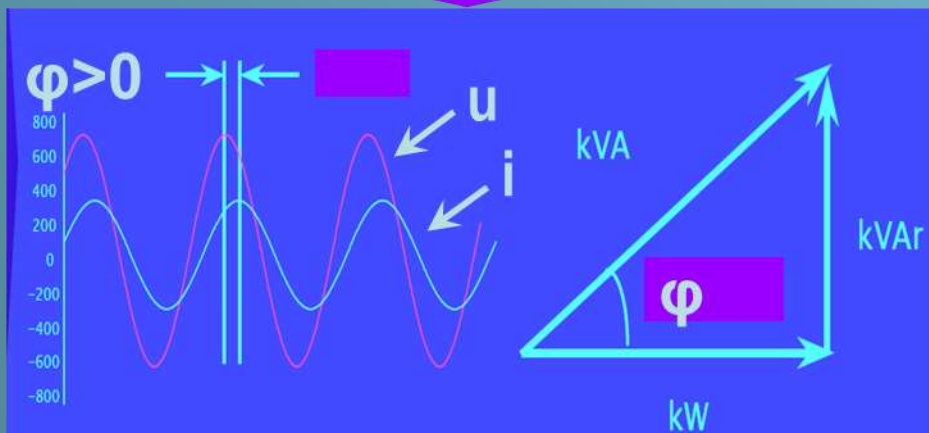
Несинусоїдний струм

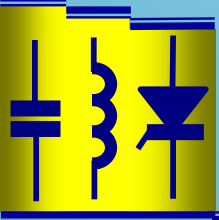
$$S = 100 \text{ kVA}$$

$$P = 56 \text{ kW}$$

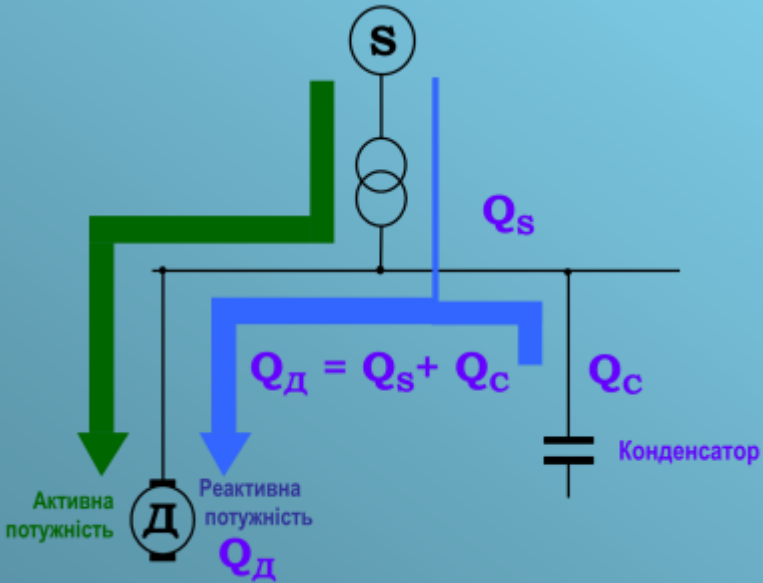
$$\cos \varphi = 1,0$$

$$\text{TPF} = 0,56$$





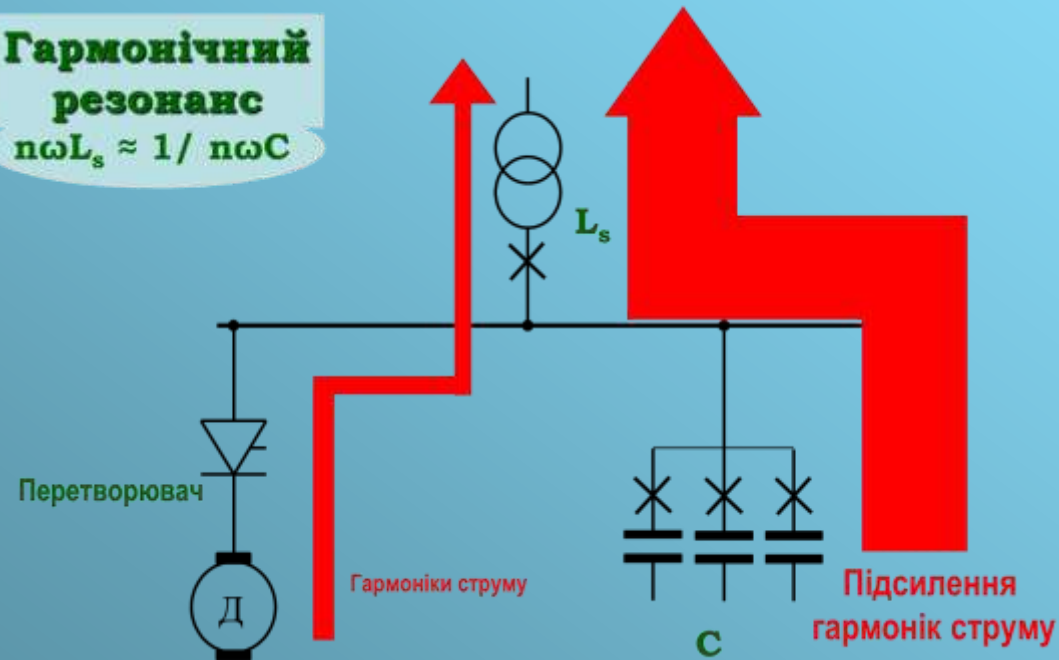
Компенсація реактивної потужності і гармоніки



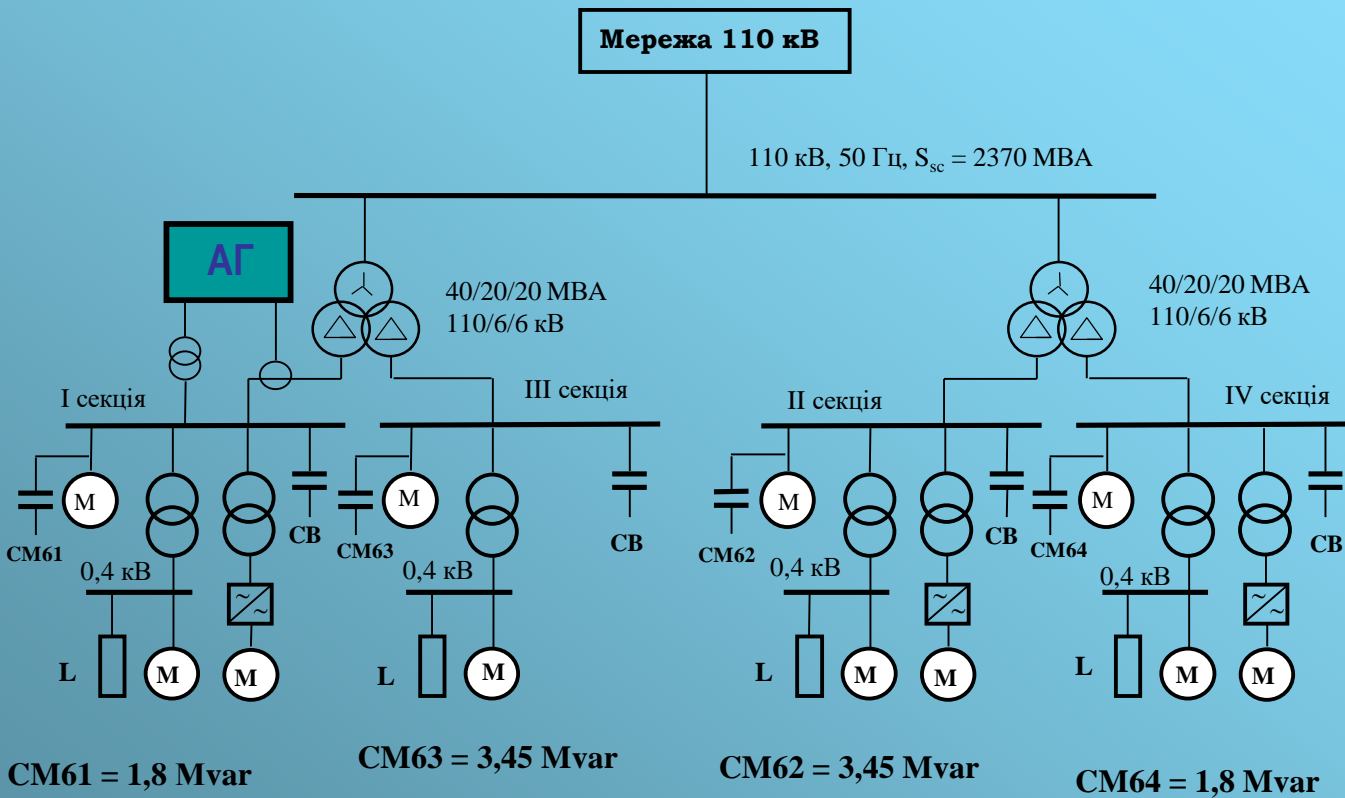
Лінійне навантаження

Нелінійне навантаження

Гармонічний резонанс
 $\omega L_s \approx 1 / \omega C$

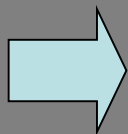


Компенсація реактивної потужності і гармоніки



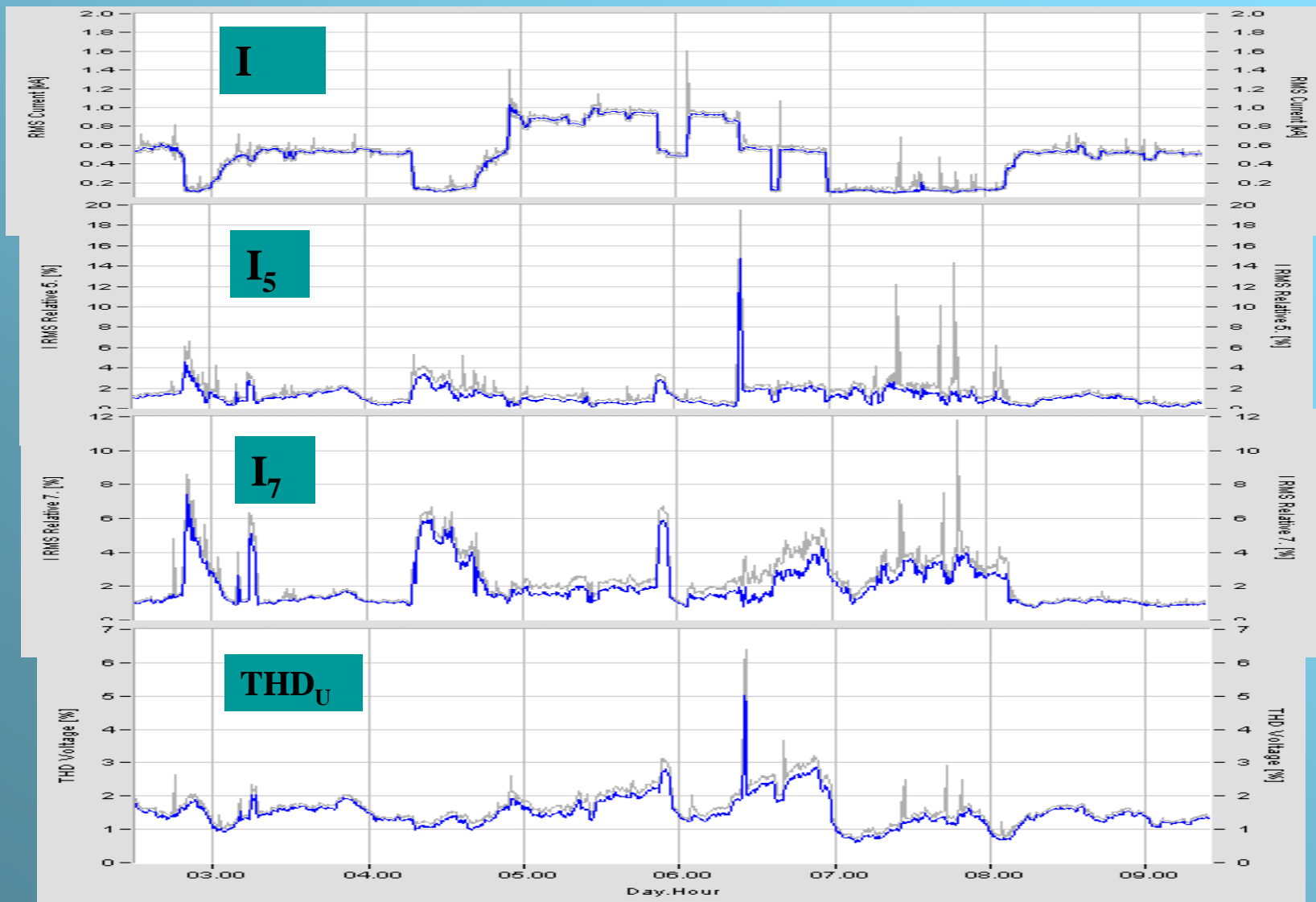
CB → 0,6 + 0,6 + 1,2 Mvar

РПЗС



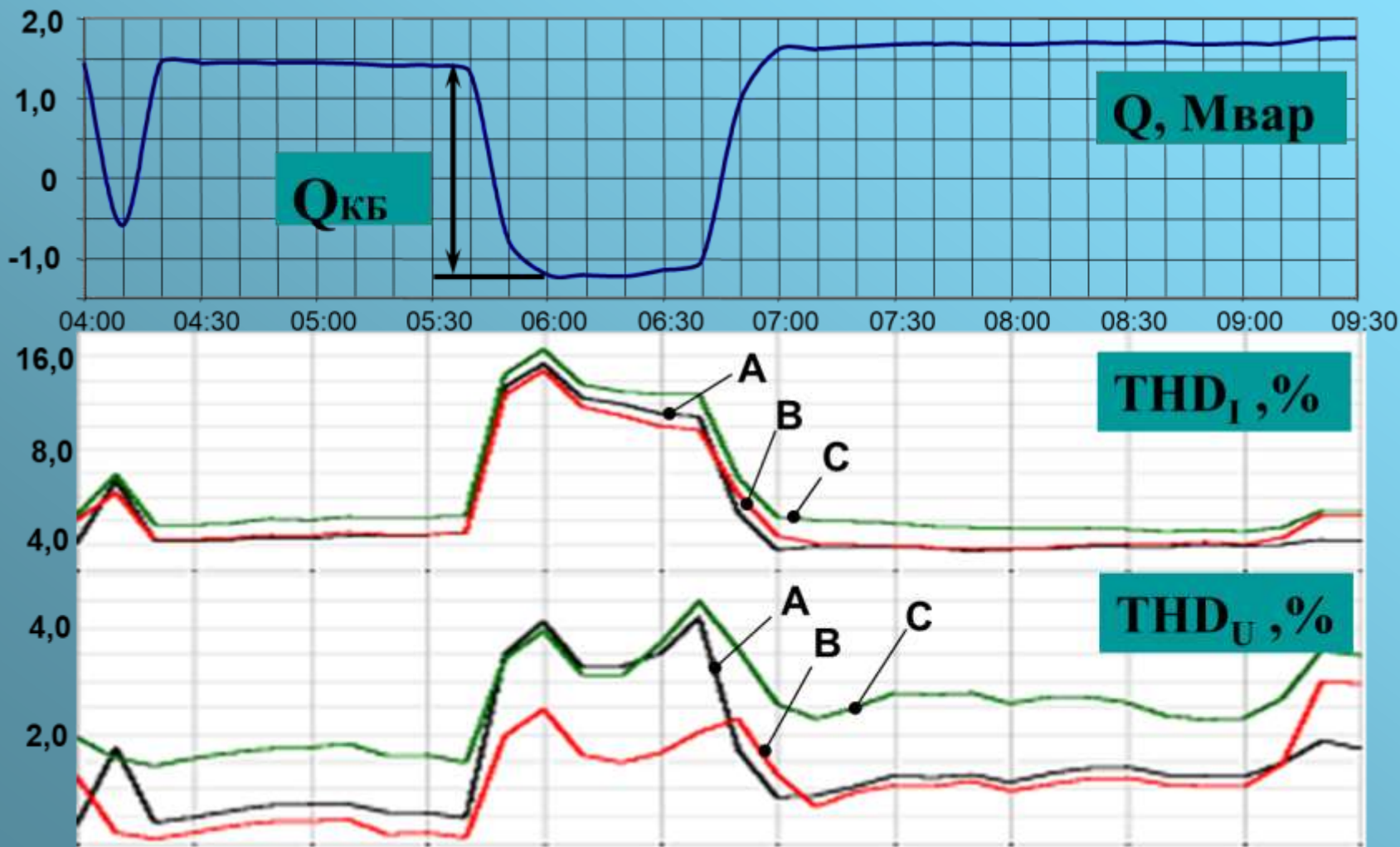
Порядок гармоніки	5	7	11	13	17	19	23	25
Струм гармоніки, А	17,5	6,9	22,8	18,7	1,8	1,4	5,4	4,8

Параметри стаціонарного режиму роботи

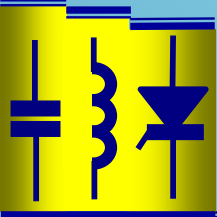




Вплив конденсаторів на несинусоїдний режим

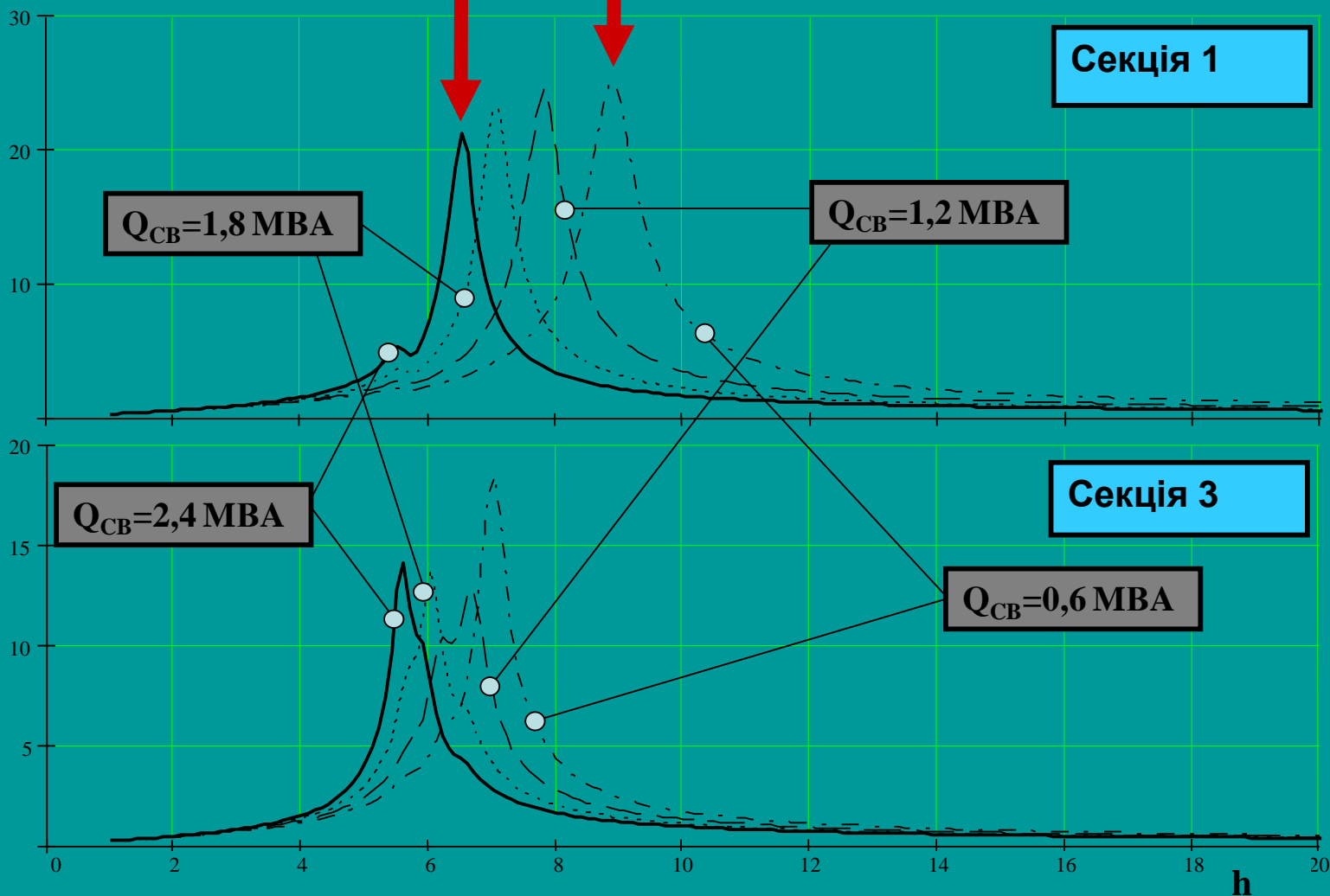


Зміна резонансних частот з перемиканням конденсаторних установок



резонанс

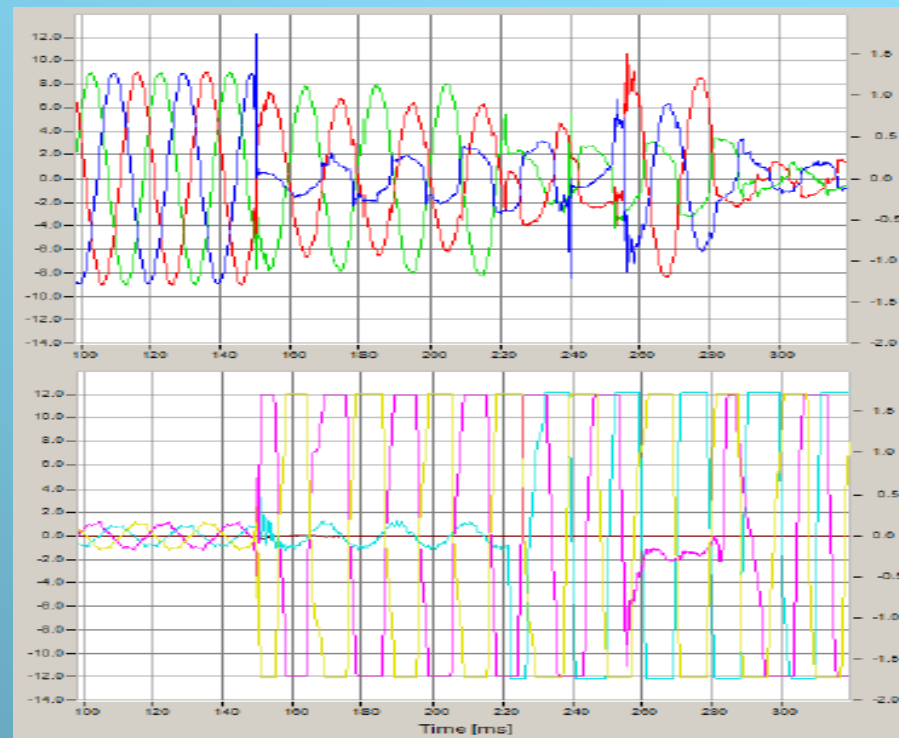
Z, Ω



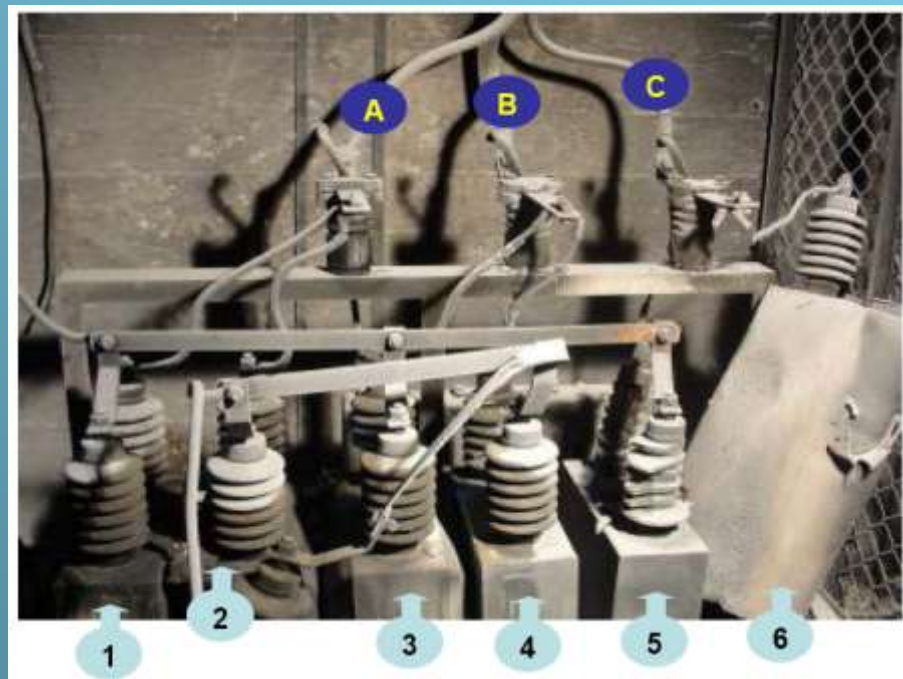


Пошкодження конденсаторів внаслідок резонансу

напруги



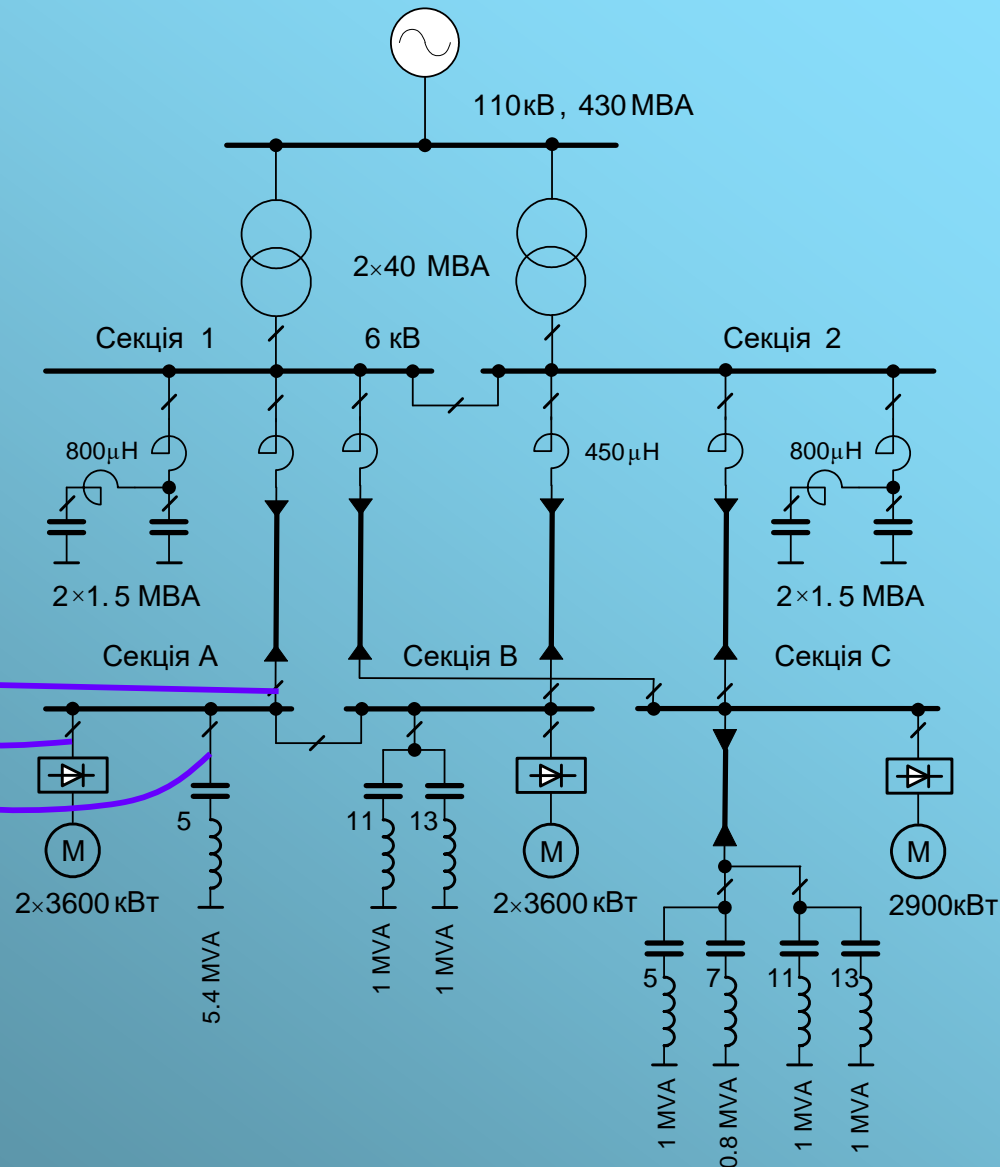
струми



Компенсація реактивної потужності і гармоніки

Система електропостачання електроприводів постійного струму

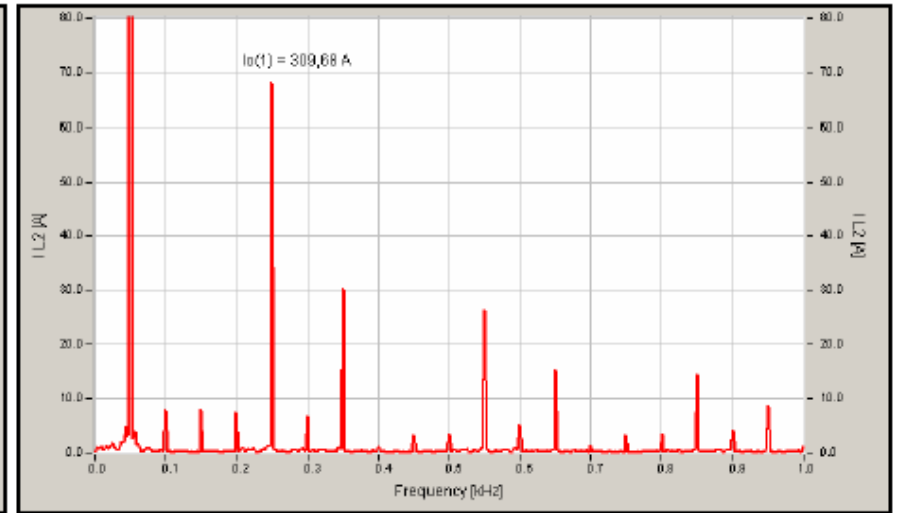
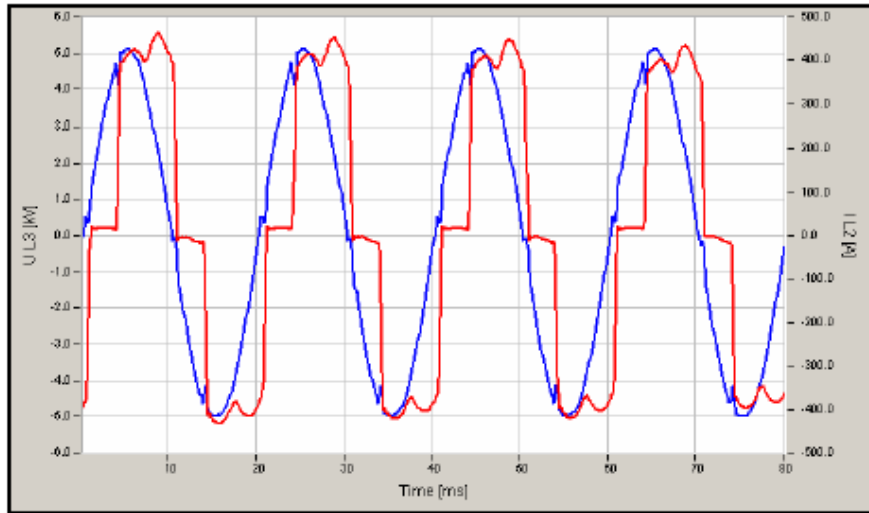
Вимірювання



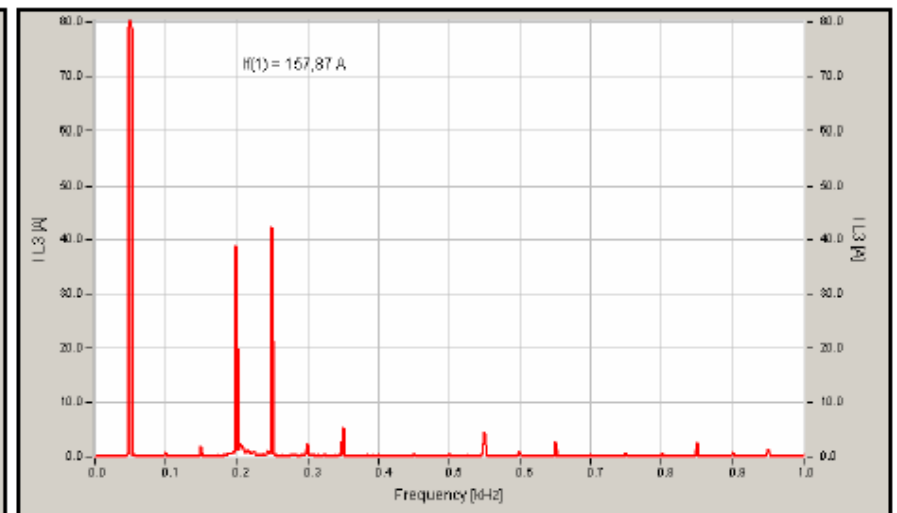
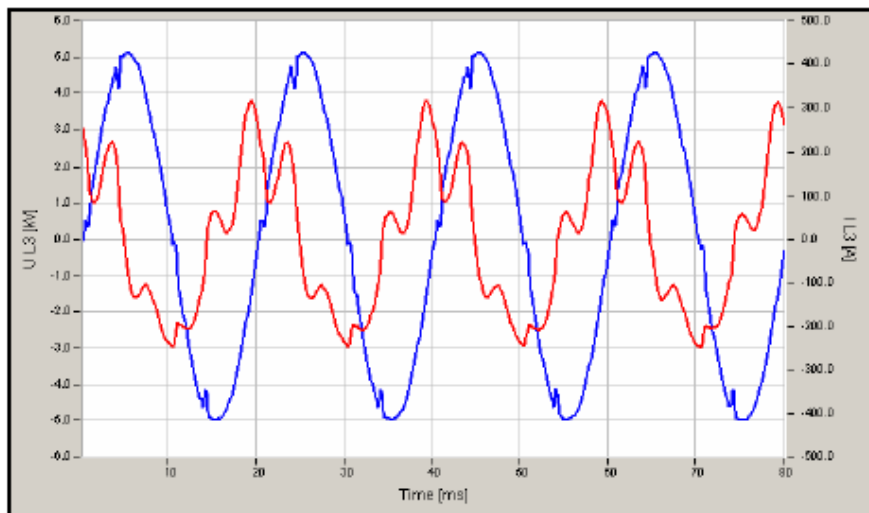


Результати вимірювань

Напруга на шинах і струм приводу



Напруга на шинах і струм фільтра





Результати вимірювань

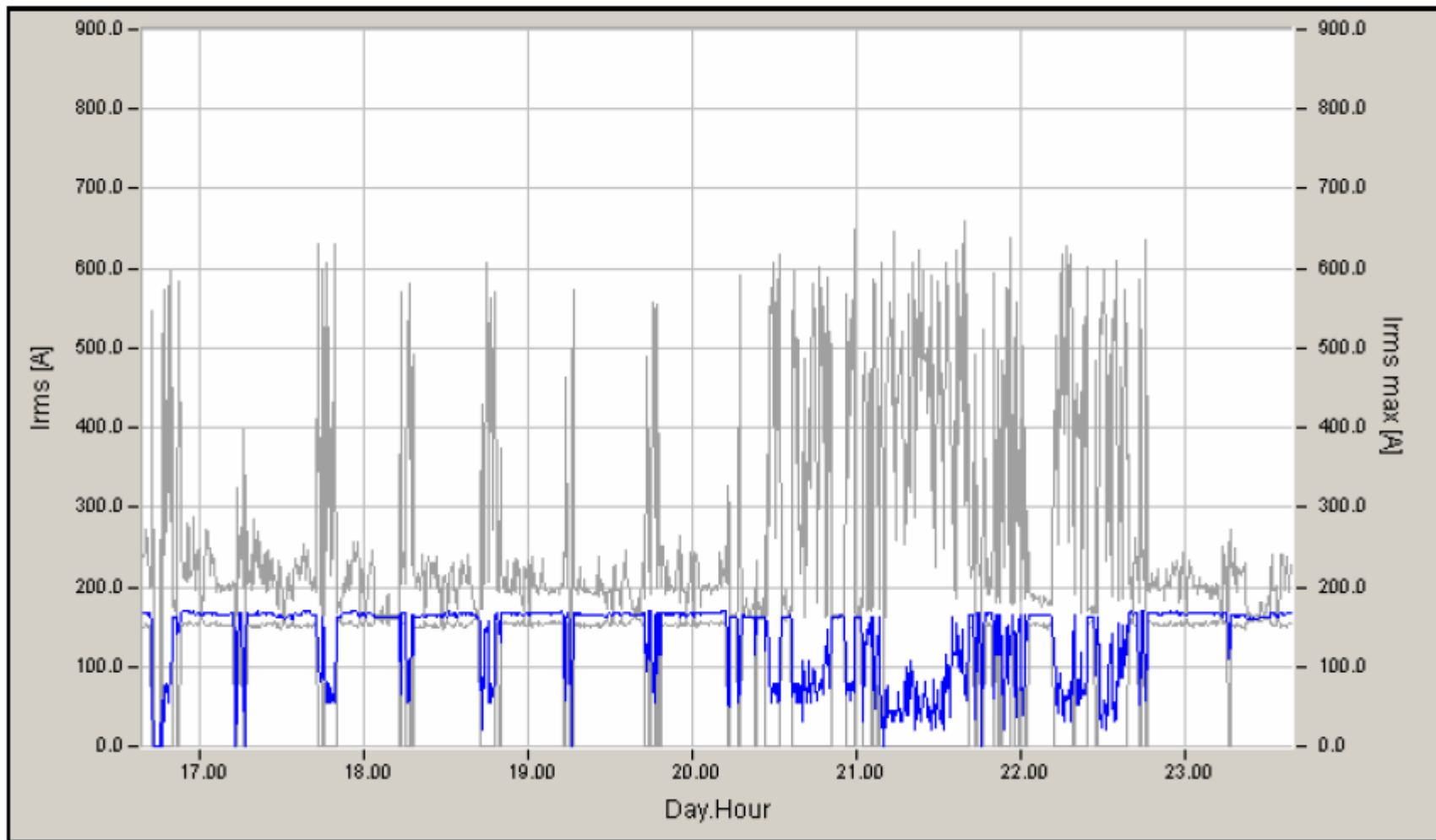
Гармонічний аналіз

Номер Гарм.	струм вводу I_z			струм приводу I_o		струм фільтра I_f		
	$I_{z(n)}$	$I_{z(n)} / I_{z(1)}$	$I_{z(n)} / I_{o(1)}$		$I_{z(n)} / I_{o(1)}$	$I_{f(n)}$	$I_{f(n)} / I_{f(1)}$	$I_{f(n)} / I_{o(1)}$
	A	-	-	A	-	A	-	-
1	241,49	100,0%	78,0%	309,68	100,0%	157,87	100,0%	51,0%
2	8,49	3,5%	2,7%	8,04	2,6%	0,61	0,4%	0,2%
3	9,75	4,0%	3,1%	8,03	2,6%	1,77	1,1%	0,6%
4	41,62	17,2%	13,4%	7,51	2,4%	39	24,7%	12,6%
5	27,02	11,2%	8,7%	68,09	22,0%	42,54	26,9%	13,7%
6	4,31	1,8%	1,4%	6,75	2,2%	2,42	1,5%	0,8%
7	25,43	10,5%	8,2%	30,21	9,8%	5,28	3,3%	1,7%
8	0,74	0,3%	0,2%	0,85	0,3%	0,28	0,2%	0,1%
9	2,81	1,2%	0,9%	3,36	1,1%	0,57	0,4%	0,2%
10	2,92	1,2%	0,9%	3,49	1,1%	0,57	0,4%	0,2%
11	22,09	9,1%	7,1%	26,36	8,5%	4,33	2,7%	1,4%
12	4,16	1,7%	1,3%	5,04	1,6%	0,89	0,6%	0,3%
13	12,7	5,3%	4,1%	15,43	5,0%	2,77	1,8%	0,9%
14	1,21	0,5%	0,4%	1,49	0,5%	0,27	0,2%	0,1%
15	2,79	1,2%	0,9%	3,37	1,1%	0,59	0,4%	0,2%
16	2,84	1,2%	0,9%	3,41	1,1%	0,59	0,4%	0,2%
17	12,14	5,0%	3,9%	14,57	4,7%	2,48	1,6%	0,8%
18	3,52	1,5%	1,1%	4,28	1,4%	0,73	0,5%	0,2%
19	7,35	3,0%	2,4%	8,74	2,8%	1,38	0,9%	0,4%
20	0,97	0,4%	0,3%	1,14	0,4%	0,18	0,1%	0,1%



Результати вимірювань

Зміни діючого значення струму фільтра





Параметри фільтрів

Фільтр	Трифазні реактори		
Секція С F5 $n_5 = 4.81$	Номінальна напруга	7.2	kV
	Номінальний струм	120.0	A
	Індуктивність	6.0	mH
	Технологічні допуски	± 5	%
Секція А F5 $n_5 = 4.9$	Номінальна напруга	7.2	kV
	Номінальний струм	600.0	A
	Індуктивність	0.85	mH
	Технологічні допуски	± 5	%
Секція С F7 $n_7 = 6.98$	Номінальна напруга	7.2	kV
	Номінальний струм	100.0	A
	Індуктивність	3.54	mH
	Технологічні допуски	± 5	%
Секція В, С F11 $n_{11} = 10.94$	Номінальна напруга	7.2	kV
	Номінальний струм	130.0	A
	Індуктивність	1.16	mH
	Технологічні допуски	± 5	%
Секція В, С F13 $n_{13} = 13.02$	Номінальна напруга	7.2	kV
	Номінальний струм	130.0	A
	Індуктивність	0.82	mH

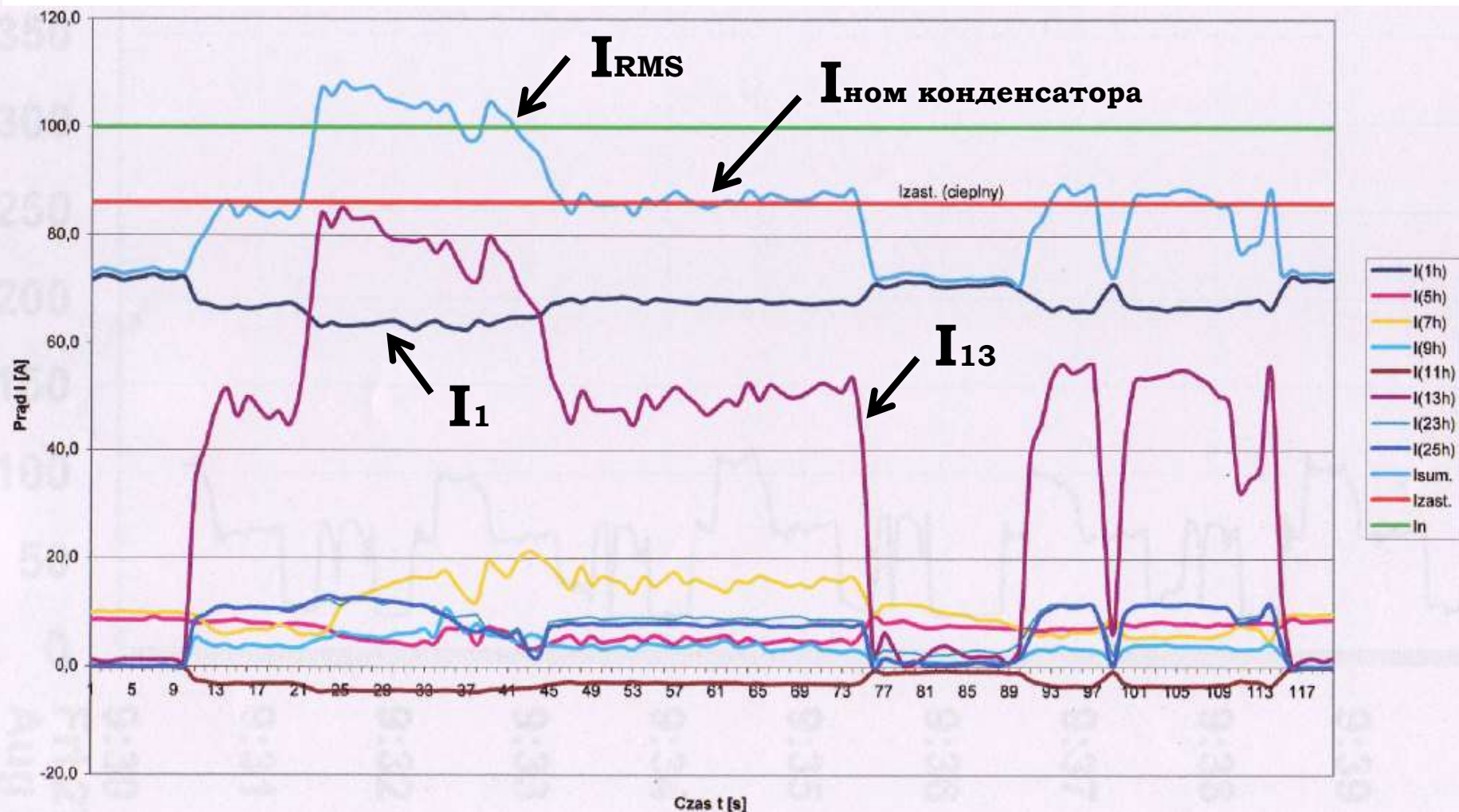
Фільтр	Батарея конденсаторів		
Секція С F5 $n_5 = 4.81$	Номінальна напруга	6.6	kV
	Номінальний струм	87.4	A
	Ємність	73.1	μF
	Технологічні допуски	-5...+10	%
Секція А F5 $n_5 = 4.9$	Номінальна напруга	6.6	kV
	Номінальний струм	470	A
	Ємність	477	μF
	Технологічні допуски	-5...+10	%
Секція С F7 $n_7 = 6.98$	Номінальна напруга	6.6	kV
	Номінальний струм	70.0	A
	Ємність	58.4	μF
	Технологічні допуски	-5...+10	%
Секція В, С F11 $n_{11} = 10.94$	Номінальна напруга	6.6	kV
	Номінальний струм	87.4	A
	Ємність	73.1	μF
	Технологічні допуски	-5...+10	%
Секція В, С F13 $n_{13} = 13.02$	Номінальна напруга	6.6	kV
	Номінальний струм	87.4	A
	Ємність	73.1	μF



Струмове навантаження фільтра 11 гармоніки



Струмове навантаження фільтра 13 гармоніки





Технологічні відхилення параметрів фільтрів

Порядок налаштування силового пасивного фільтра гармонік визначає залежність від робочої частоти мережі f , індуктивності L і ємності C його елементів .

$$n_r = \frac{1}{2\pi f \sqrt{LC}}$$

Зміна будь-якого з параметрів викликає його розлаштування.

$$\frac{n_d}{(1 + \Delta f_*) \sqrt{(1 + \Delta L_*)(1 + \Delta C_*)}} \leq n_r \leq \frac{n_d}{(1 - \Delta f_*) \sqrt{(1 - \Delta L_*)(1 - \Delta C_*)}}$$

Δf_* - відносна зміна частоти мережі;

$\Delta L_*, \Delta C_*$ - відносні зміни індуктивності і ємності фільтра;

n_d - порядок налаштування фільтра ($d = 5, 7, 11, 13$).



Технологічні відхилення параметрів фільтрів

Можливі відхилення частоти налаштування фільтра

$$0,93n_d \leq n_r \leq 1,05n_d$$

Для аналізованої системи отримано наступні відхилення :

фільтр 5 гармоніки - $4.3 \leq n_r \leq 5.1$

фільтр 7 гармоніки - $6.5 \leq n_r \leq 7.4$

фільтр 11 гармоніки - $10.2 \leq n_r \leq 11.5$

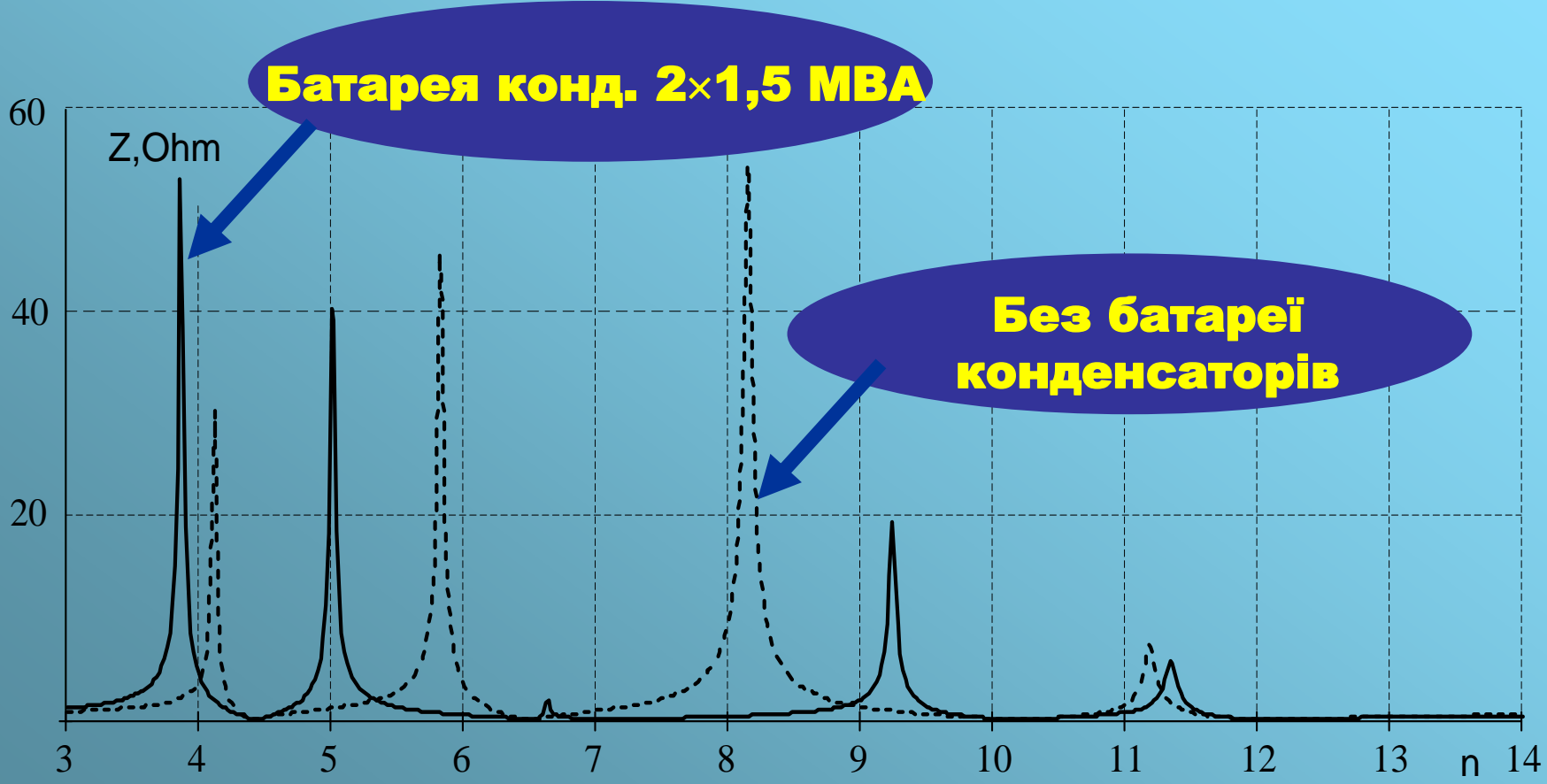
фільтр 13 гармоніки - $12.1 \leq n_r \leq 13.7$

“Чутливість” розлаштування фільтра при змінах ємності і індуктивності зростає з ростом порядку фільтра :

$$\Delta\omega_r \approx \frac{\partial \omega_r}{\partial L} \Delta L = \partial\left(\frac{1}{\sqrt{LC}}\right) \frac{\Delta L}{\partial L} = -\frac{\Delta L}{2L} \omega_r$$



Частотні характеристики системи з фільтрами на секції С



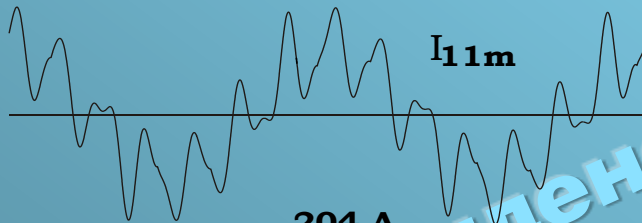


Струми фільтрів 11 і 13 гармонік

Спільна робота секцій В і С

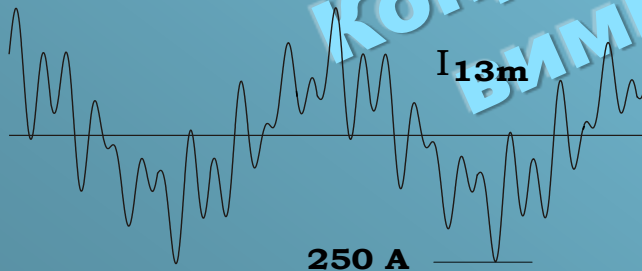
“Недолаштований” фільтр F11m завантажений більше від
“перелаштованого” фільтра F11p

RMS = 104 A



204 A

I_{11m}

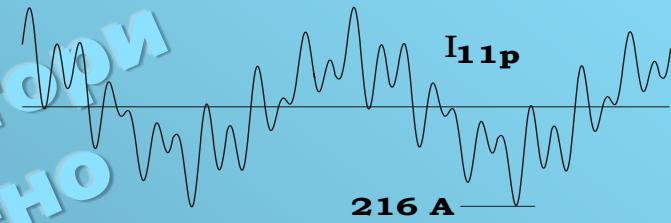


250 A

RMS = 108 A

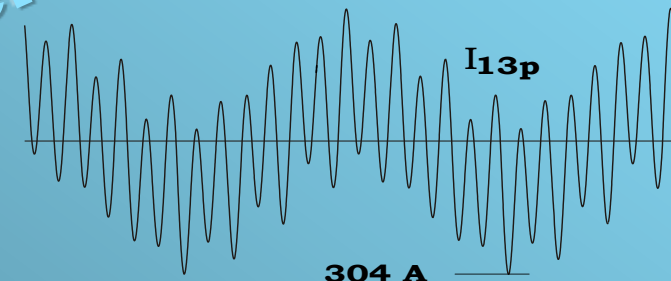


RMS = 94 A



216 A

I_{11p}



304 A

RMS = 143 A



“Недолаштований” фільтр F13m менш навантажений від “перелаштованого”
фільтра F13p



Навантаження фільтрів при паралельній роботі

Струми (в Амперах) в колах приводу і фільтрів 11 і 13 гармонік

Коло	1 г ампл	5 г ампл	7 г ампл	11 г ампл	13 г ампл	RMS	Коло	1 г ампл	5 г ампл	7 г ампл	11 г ампл	13 г ампл	RMS
Привод	552	120	57	40	27	403	Привод	552	120	57	40	27	403
F11 _м	107	15	3	110	3	110	F13 _м	108	13	0,6	2	238	185
F11 _р	127,0	15,4	2,2	63,0	3,4	101	F13 _р	126	15	0,5	2	145	136

$$I_{\text{ном БК}} = 87,4 \text{ А}$$

$$I_{\text{ном Р}} = 130 \text{ А}$$

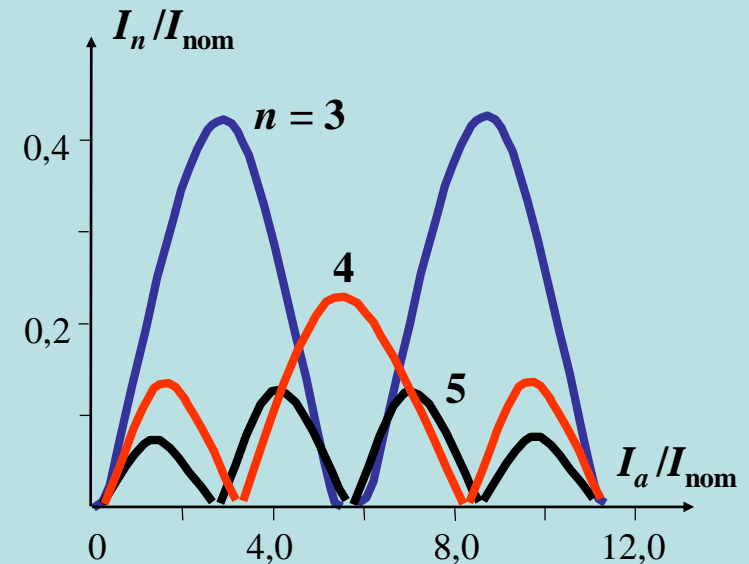
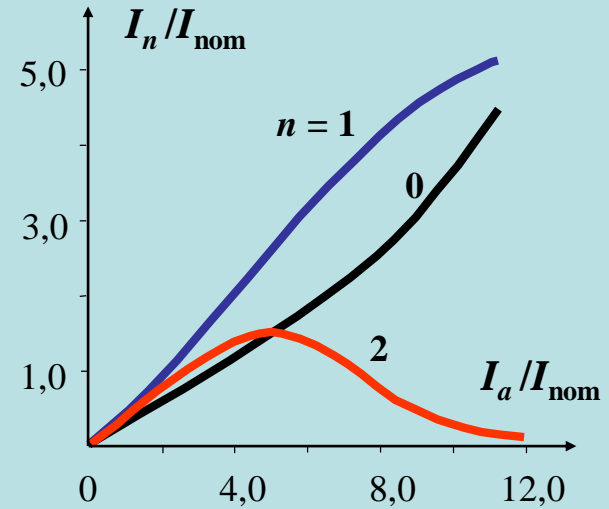
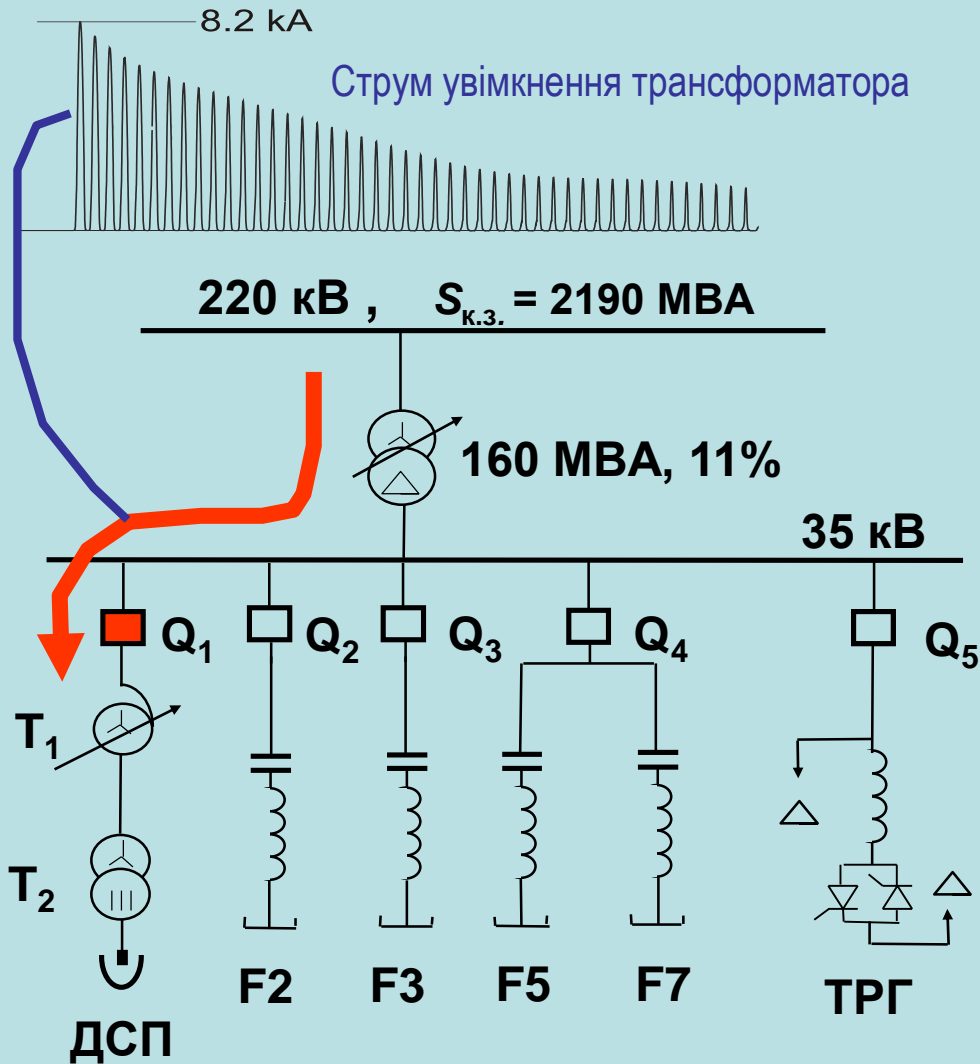


Пошкодження фільтрового реактора 11 гармоніки

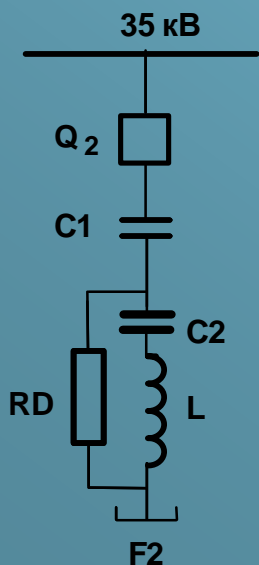
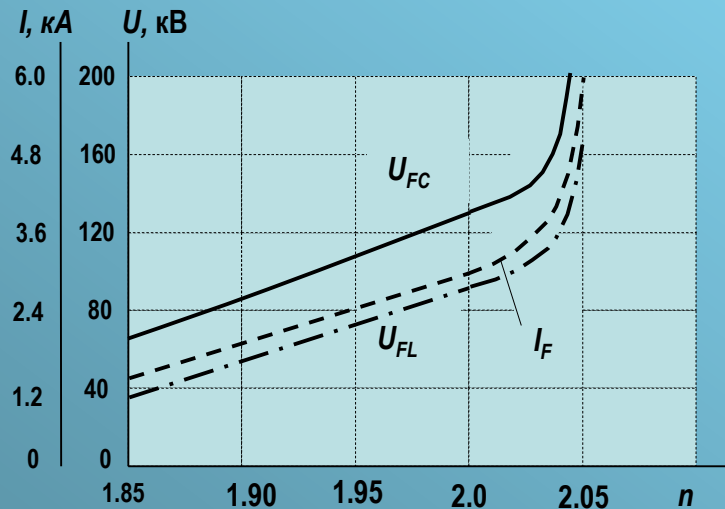




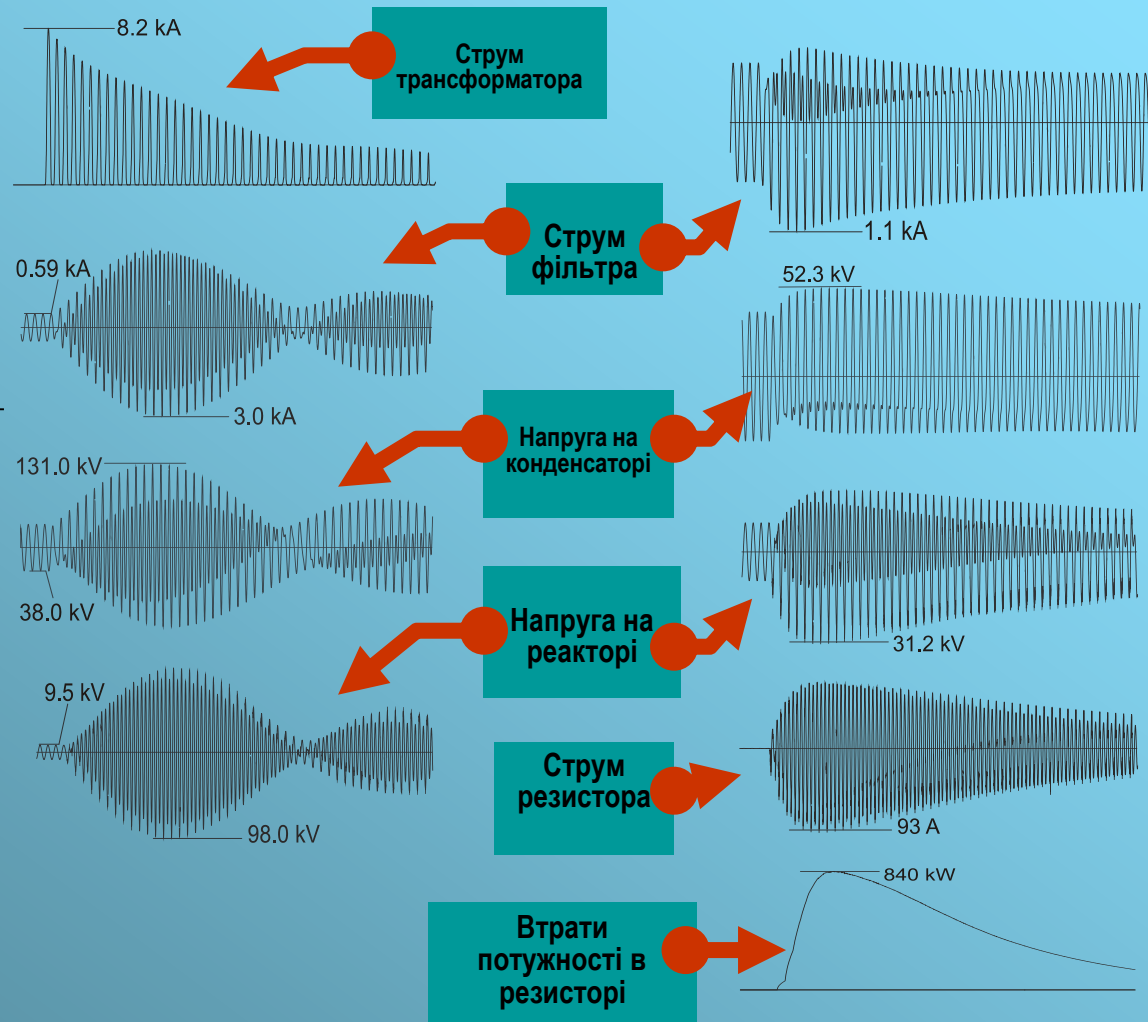
Гармоніки в перехідних режимах



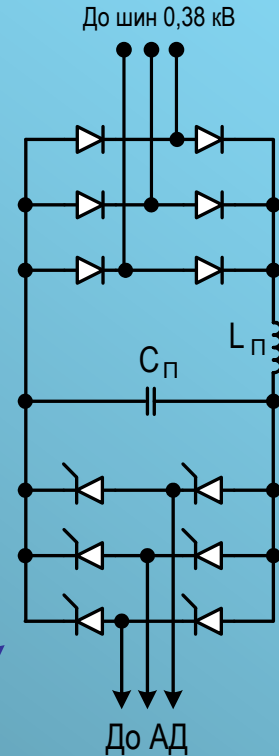
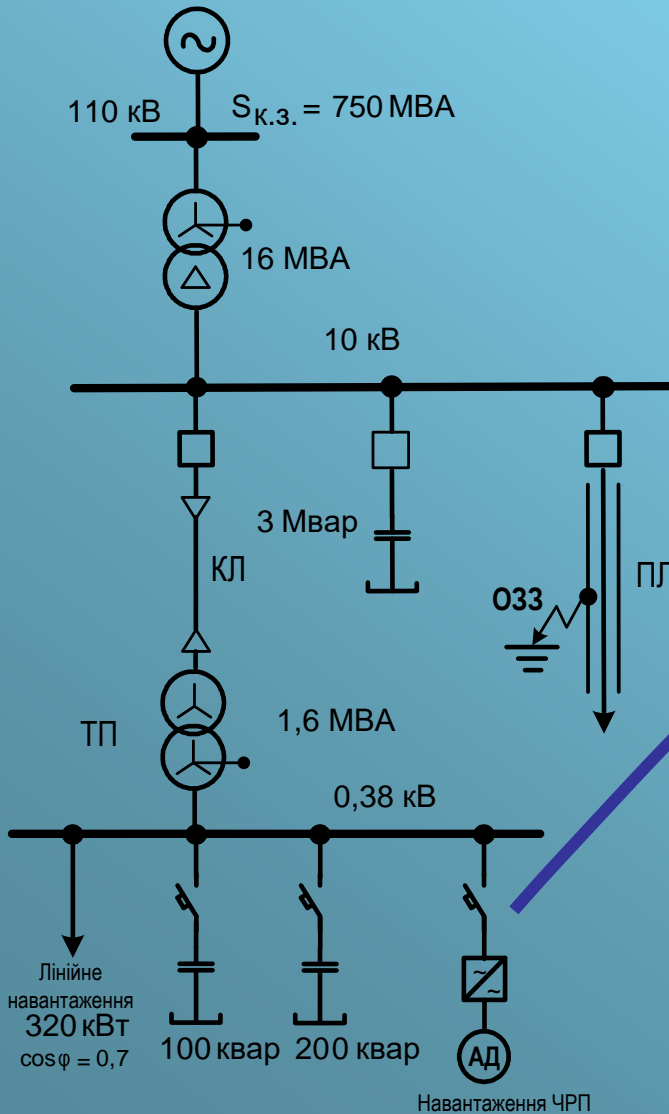
Вплив технологічних відхилень параметрів LC фільтрів на характер перехідного процесу



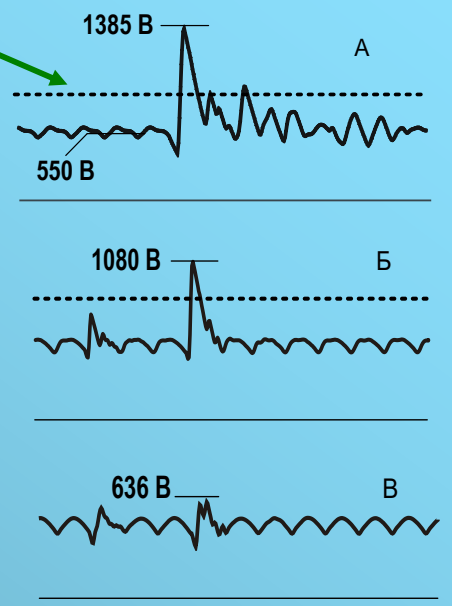
Фільтр типу "С"



Вплив комутаційних перенапруг на роботу ЧРП



Рівень захисту



Напруг на конденсаторі $C_{п}$:

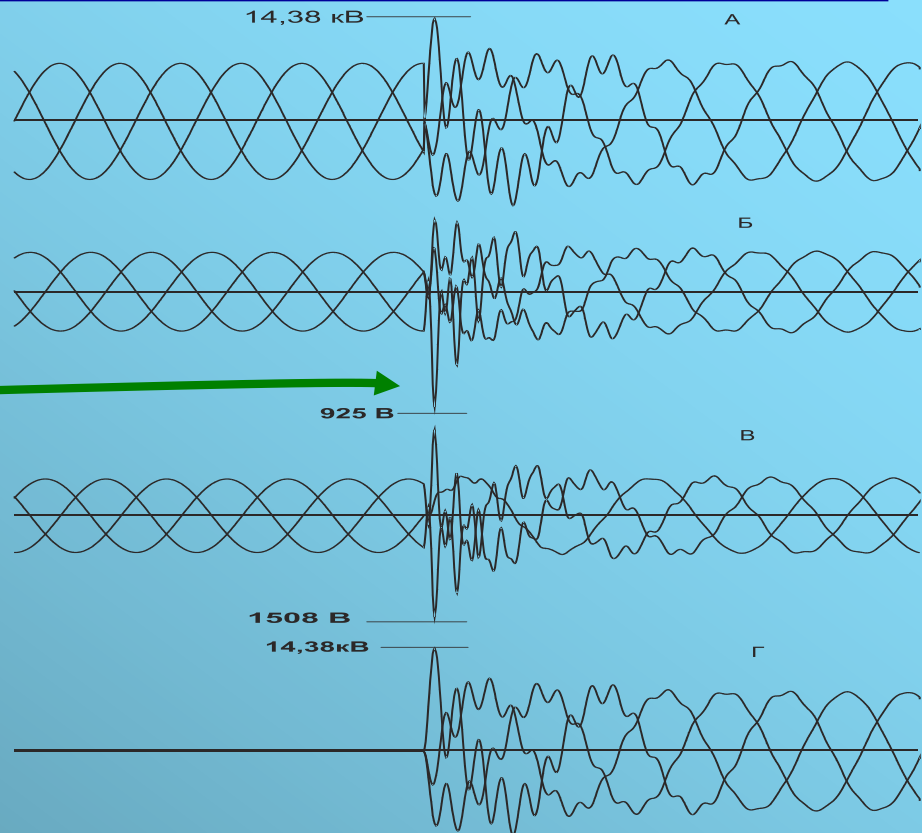
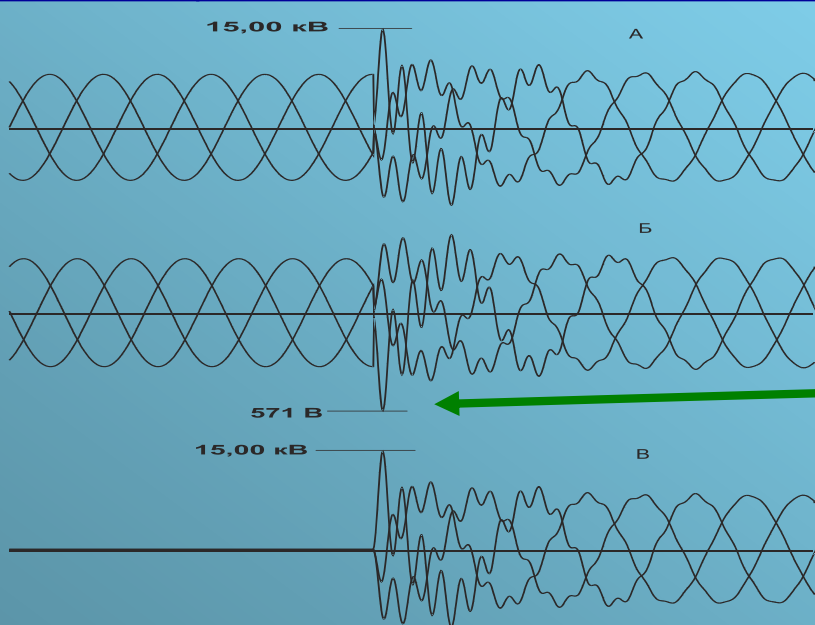
- А – увімкнення конденсаторної батареї 10 кВ;
- Б – замикання на землю в мережі 10 кВ без КБ;
- В – замикання на землю в мережі 10 кВ з КБ

$$100 \text{ квар} = 2 \times 10 + 2 \times 40$$

$$200 \text{ квар} = 1 \times 10 + 2 \times 20 + 3 \times 50$$

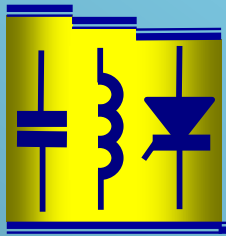


Підсилення перехідних перенапруг в мережі НН



Напруги на елементах електричної мережі при звімкненні конденсаторної батареї 10 кВ (вимкнено конденсатори 0,38 кВ):
А – фазна напруга на шинах 10 кВ;
Б – фазна напруга на шинах 0,38 кВ;
В – фазна напруга на конденсаторній батареї 10 кВ

Напруги на елементах електричної мережі при звімкненні конденсаторної батареї 10 кВ (увімкнено конденсатори 0,38 кВ потужністю 100 квар):
А – фазна напруга на шинах 10 кВ;
Б – фазна напруга на шинах 0,38 кВ;
В – лінійна напруга на конденсаторах 0,38 кВ;
Г – фазна напруга на конденсаторній батареї 10 кВ

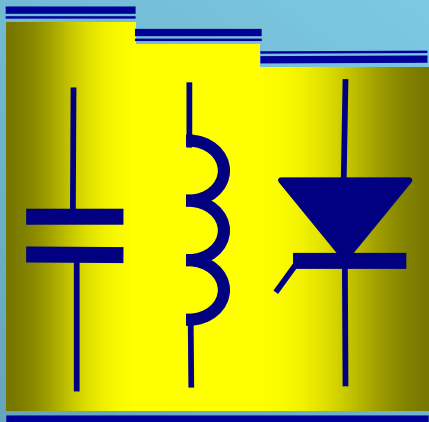


Висновки

В сучасних електричних мережах загострюється проблема компенсації реактивної потужності, що спричинюється зростанням впровадження засобів розосередженого генерування і енергоощадних технологій електроспоживання в комунальній і промисловій сферах.

Структури і засоби регулювання компенсації реактивної потужності в електричних мережах повинні врахувати цю тенденцію.

Дякую за увагу



СТК ?

Фільтр ?

Статком ?

Конденсатор ?

