



Тема: Утицај нелинеарних
пријемника на нисконапонску
мрежу



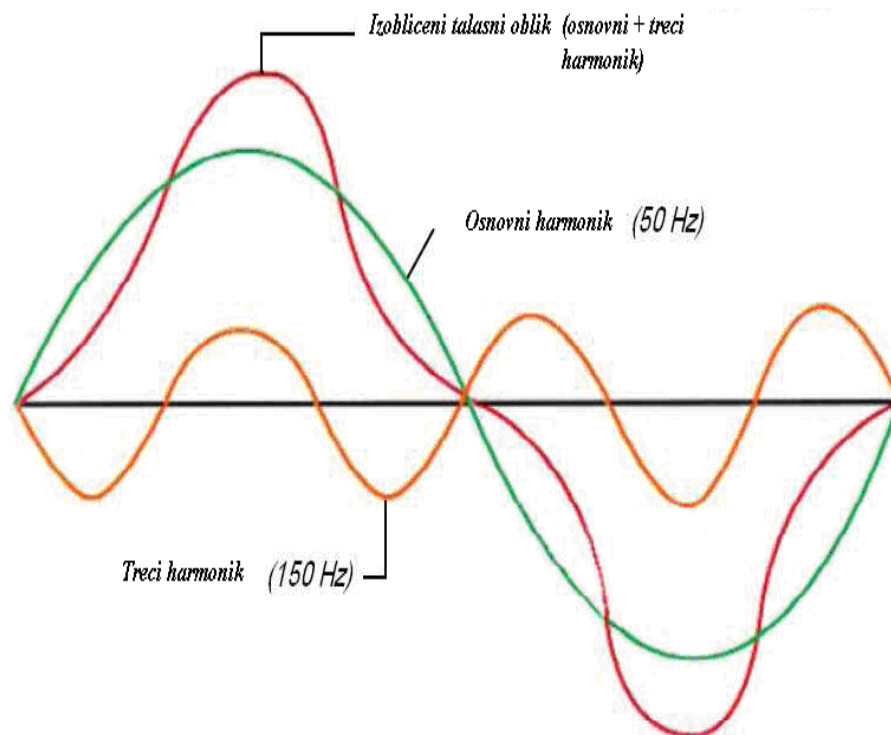
У домаћинствима још увек доминира велики број линеарних пријемника, који су обично веће снаге, а који се користе за загревање ваздуха и воде (грејалице и бојлери), машине за прање веша и судова итд. Већина уређаја за домаћинство произведених у земљама ЕУ се производе према одређеним директивама како би имале задовољавајућу енергетску ефикасност. Значајан број пријемника мањих снага су променили своје електричне карактеристике, а све у циљу повећања енергетске ефикасности. Такви пријемници електричне енергије су електрично осветљење, затим електронски уређаји и уређаји који у свом напојном делу имају кола енергетске електронике.



Присуство великог броја нелинеарних потрошача у дистрибутивним мрежама доводи до низа негативних ефеката који се одражавају како на саму мрежу тако и на остале прикључене потрошаче. Заједнички интерес потрошача и произвођача електричне енергије је последњих година довео у жижу интересовања проблеме везане за квалитет електричне енергије, односно садржај хармоника у дистрибутивној мрежи и друге аспекте квалитета електричне енергије (непрекидност напајања, присуство краткотрајних флукуација и дисторзија,...).

Појам и дефиниција хармоника

- Хармоници представљају синусоидне таласе напона или струја.
- Виши хармоници су само непарни са целобројним умношком основне учестаности већим од један.



Фазни распоред хармоника

- У трофазном уравнотежном систему h -ти хармоник напона у свакој фази може се изразити на следећи начин:

$$v_{ah}(t) = \sqrt{2}V_h \sin(h\omega_o t + \theta_h)$$

$$v_{bh}(t) = \sqrt{2}V_h \sin(h\omega_o t - 2h\pi / 3 + \theta_h)$$

$$v_{ch}(t) = \sqrt{2}V_h \sin(h\omega_o t + 2h\pi / 3 + \theta_h)$$



Најважнији извори виших хармоника су:


- Прекидачке напојне јединице
- Електронске пригушнице за флуо цеви
- Апарати у домаћинству као што су ТВ, микроталасна пећ итд.
- Регулисани електромоторни погони помоћу уређаја енергетске електронике
- Извори непрекидног напајања
- Енергетски исправљачи и претварачи
- Трансформатори са нелинеарним магнећењем
- Електролучне пећи
- Апарати за електролучно заваривање

Проблеми које стварају хармоници

- Прегрејавање нултог проводника
- Прегрејавање трансформатора
- Прегрејавање и неправилан рад електричних мотора
- Утицај хармоника на прекидаче и заштитне релеје
- Утицај на електронску опрему
- Утицај на рад статичких енергетских претварача
- Утицај на телекомуникационе везе
- Напрезање кондезатора за компензацију реактивне снаге
- Ефекти тока хармоника струја кроз проводнике и сабирнице
- Изобличење мрежног напона услед тока хармонијских струја

ТЕХНИЧКЕ ПОСЛЕДИЦЕ

- Најважнија последица која настаје услед појаве виших хармоника је смањење квалитета испоручене електричне енергије.
- Преоптерећење у општим дистрибутивним системима због повећања ефективне вредности струје, чиме онемогућавамо пренос веће количине потребне енергије потрошачима. Овим такође и повећавамо губитке у самом преносу.
- Мања искористивост снаге јер су каблови димензионисани на основу струје коју могу сигурно испоручити. Пошто мали фактор снаге повећава привидну струју из извора, износ корисне снаге коју може повући коло је смањен због топлотних ограничења.
- Преоптерећења у неутралним (нултим) водовима где се сабирају приближно утростручене вредности струја виших хармоника (генерисане у монофазним нелинеарним оптерећењима).

- 
- Преоптерећења, вибрације и превремено старење свих елемената снаге: генератора, мотора трансформатора.
 - Преоптерећење и превремено старење кондензатора који поправљају фактор снаге. Такође виши хармоници могу довести и до неочекиваног отказа елемента.
 - Изобличење напона напајања сто доводи до тога да осетљиви потрошачи не могу “нормално” да раде. Такав је случај на пример код медицинске опреме која захтева чист синусни облик напона.
 - Сметње на телекомуникационим водовима на којима се појављују шумови и сметње услед повећаног поља.
 - Утицај на рад енергетских претварача. Иако су ови претварачи главни извори виших хармоника они такође могу бити погођени утицајем виших хармоника.

ЕКОНОМСКЕ ПОСЛЕДИЦЕ

- Превремено старење уређаја доводи до тога да се исти мора мењати раније него што је призвођач предвидео па то доприноси додатним трошковима.
- Да би се испоручила потребна енергија потрошачима морамо узети из мреже више енергије него што нам је заиста потребно јер се вишак троши на покривање губитака које стварају виши хармоници.
- Изобличење тренутне вредности струје доводи до лажног реаговања уређаја заштите па то доводи до тренутног прекида напајања што може довести до заустављања неког производног процеса.
- Повећавају се Цулови губици јер хармоници стварају допунске енергетске губитке у проводницима и уређајима
- Неопходно је користити постројења и опрему са већим номиналним карактеристикама
- Лажно реаговање аутоматских прекидача и искључење електричних инсталација повећава губитке

Фазни поредак хармоника у трофазном уравнотеженом систему је приказан у табели

Fundamental	A 0°	B 120°	C 240°	A-B-C
3rd harmonic	A' $3 \times 0^\circ$ (0°)	B' $3 \times 120^\circ$ $(360^\circ = 0^\circ)$	C' $3 \times 240^\circ$ $(720^\circ = 0^\circ)$	<i>no rotation</i>
5th harmonic	A'' $5 \times 0^\circ$ (0°)	B'' $5 \times 120^\circ$ <small>$(600^\circ - 720^\circ = -120^\circ)$</small> (-120°)	C'' $5 \times 240^\circ$ <small>$(1200^\circ - 1440^\circ = -240^\circ)$</small> (-240°)	C-B-A
7th harmonic	A''' $7 \times 0^\circ$ (0°)	B''' $7 \times 120^\circ$ <small>$(840^\circ - 720^\circ = 120^\circ)$</small> (120°)	C''' $7 \times 240^\circ$ <small>$(1680^\circ - 1440^\circ = 240^\circ)$</small> (240°)	A-B-C
9th harmonic	A'''' $9 \times 0^\circ$ (0°)	B'''' $9 \times 120^\circ$ $(1080^\circ = 0^\circ)$	C'''' $9 \times 240^\circ$ $(2160^\circ = 0^\circ)$	<i>no rotation</i>

Синусоидални напони и струје у монофазним КОЛИМА

напон $v(t) = \sqrt{2}V_{\text{RMS}}\sin(\omega_0 t)$

струја $i(t) = \sqrt{2}I_{\text{RMS}}\sin(\omega_0 t - \varphi)$

активна (P) и реактивна (Q) снага

$$P = V_{\text{RMS}} I_{\text{RMS}} \cos \varphi, \quad Q = V_{\text{RMS}} I_{\text{RMS}} \sin \varphi$$

Привидна снага

$$S = V_{\text{RMS}} I_{\text{RMS}} \quad S = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

Фактор снаге

$$PF = P/S. \quad PF = \cos \varphi.$$

Синусоидални напони и струје у полифазним колима

N је укупан број фаза, и φ_n фазна разлика струје и напона n -те фазе

$$P = \sum_{n=1}^N I_{n,\text{RMS}} V_{n,\text{RMS}} \cos \varphi_n,$$

$$Q = \sum_{n=1}^N I_{n,\text{RMS}} V_{n,\text{RMS}} \sin \varphi_n$$

АНАЛИЗА

URMS	IRMS	P	
230.548	0.279574	64.48095	
230.9627	0.206389	47.64982	
230.6732	0.304651	70.25522	
In	0.097214	In	0.088432
In%	12.29601		

URMS	IRMS	P	
230.548	0.279574	64.48095	
230.548	0.279574	64.48095	
230.548	0.279574	64.48095	
In	0.009042	Ines	0
In%	1.078012		

Нелинеарна оптерећења у монофазним колима

активна снага

$$P = \sum_{k=1}^M I_{k,\text{RMS}} \cdot V_{k,\text{RMS}} \cdot \cos \varphi_k = P_1 + P_{\text{H}}.$$

реактивна снага

$$Q = \sum_{k=1}^M I_{k,\text{RMS}} \cdot V_{k,\text{RMS}} \cdot \sin \varphi_k = Q_1 + Q_{\text{H}}.$$

снагу изобличења

$$D^2 = \sum_{\substack{j \neq k \\ j=1, k=1}}^M I_{j,\text{RMS}}^2 \cdot V_{k,\text{RMS}}^2$$

Привидна снага

$$S^2 = \underbrace{I_{1,\text{RMS}}^2 \cdot V_{1,\text{RMS}}^2}_{S_1^2} + \underbrace{I_{1,\text{RMS}}^2 \cdot V_{\text{H},\text{RMS}}^2}_{D_{\text{V}}^2} + \\ + \underbrace{V_{1,\text{RMS}}^2 \cdot I_{\text{H},\text{RMS}}^2}_{D_{\text{I}}^2} + \underbrace{V_{\text{H},\text{RMS}}^2 \cdot I_{\text{H},\text{RMS}}^2}_{S_{\text{H}}^2}$$

S_1 представља привидну снагу основног хармоника, D_{V} је снага изобличења напона, D_{I} је снага изобличења струје и S_{H} привидна снага хармоника

Фактори хармонијског изобличења, THD

$$THD_I = \frac{I_{H, RMS}}{I_{1, RMS}} = \frac{1}{I_{1, RMS}} \sqrt{\sum_{j=2}^M I_{j, RMS}^2} = \sqrt{\frac{I_{RMS}^2 - I_{1, RMS}^2}{I_{1, RMS}^2}}$$

$$THD_V = \frac{V_{H, RMS}}{V_{1, RMS}} = \frac{1}{V_{1, RMS}} \sqrt{\sum_{k=2}^M V_{k, RMS}^2} = \sqrt{\frac{V_{RMS}^2 - V_{1, RMS}^2}{V_{1, RMS}^2}}$$

Фактор снаге основног хармоника

$$PF_1 = \frac{P_1}{S_1} = \cos \varphi_1.$$

Укупни фактор снаге TRF

$$TRF = \frac{P}{S} = \frac{P_1 + P_H}{\sqrt{S_1^2 + D_I^2 + D_V^2 + S_H^2}}$$

Нелинеарна оптерећења у полифазним колима

$$P = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^M I_{n,k,\text{RMS}} \cdot V_{n,k,\text{RMS}} \cdot \cos \varphi_k$$

$$Q = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^M I_{n,k,\text{RMS}} \cdot V_{n,k,\text{RMS}} \cdot \sin \varphi_k$$

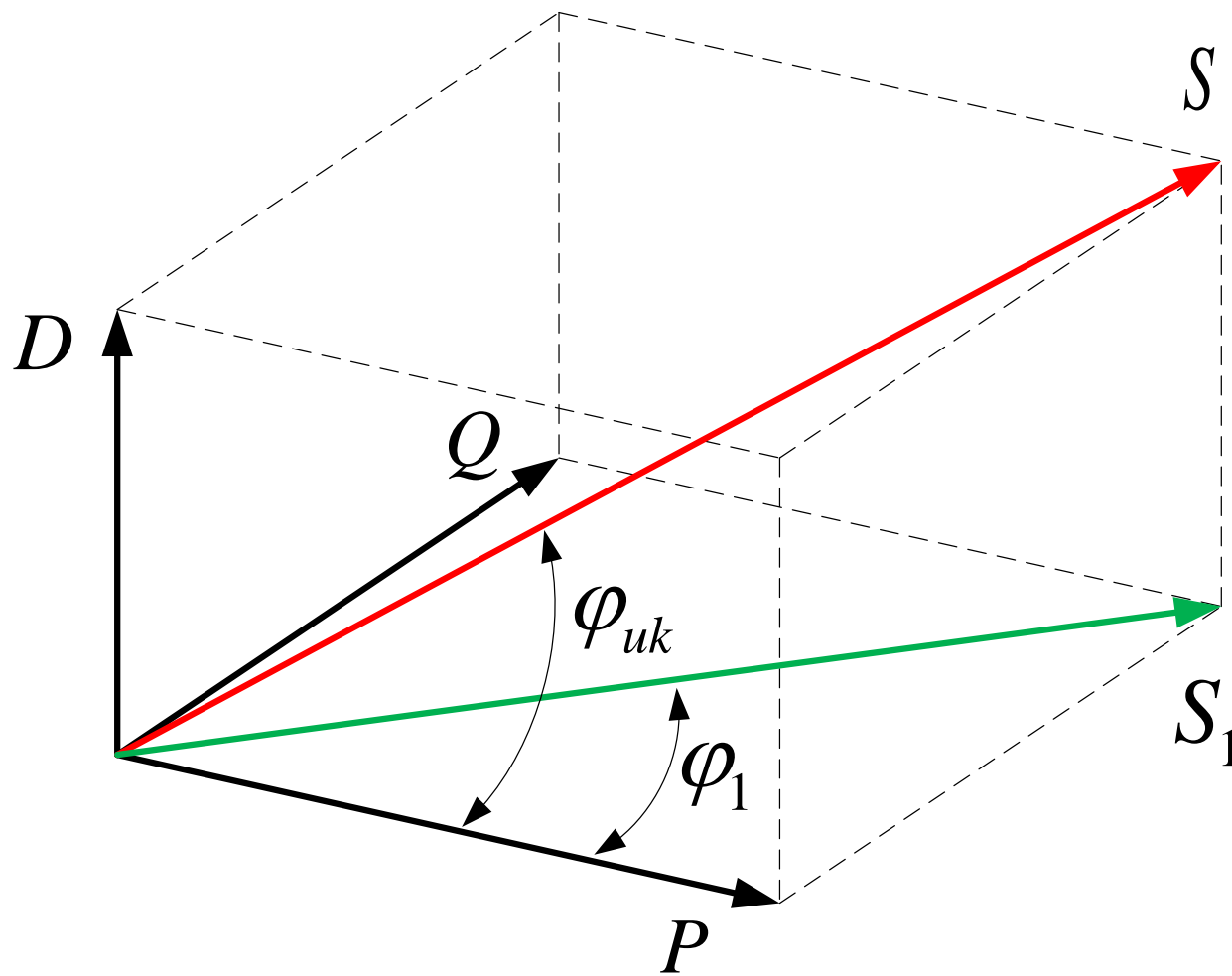
$$D^2 = \sum_{n=1}^N \sum_{\substack{j \neq k \\ j=1, k=1}}^M I_{n,j,\text{RMS}}^2 \cdot V_{n,k,\text{RMS}}^2 \cdot$$

аритметичка привидна снага (S_A) и векторска привидна снага (S)

$$S_A = \sum_{n=1}^N V_{n,\text{RMS}} \cdot I_{n,\text{RMS}}$$

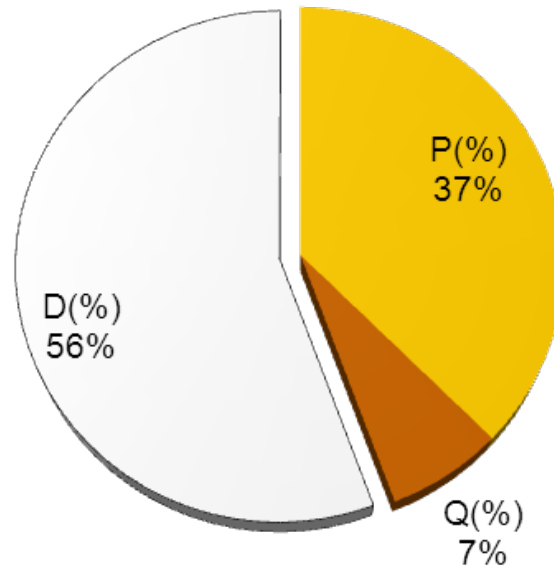
$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}$$

Векторски приказ активне, реактивне, дисторзионе и привидне снаге



CFL

URMS	IRMS	S ₁	D _v	D _i	S _H	U	cos φ	PF
229.733	0.13174	20.1521	0.40564	22.5747	0.19000	30.2671	0.91824	0.61137
P	Q	D	THDi	THDv	P(%)	Q(%)	D(%)	U(%)
18.5083	7.97836	22.5793	112.021	2.01288	37.3931	6.948392	55.65181	100.0



Анализа виших хармоника датих сијалица

Граничне вредности виших хармоника смо добили користећи образац $H = \frac{3,85}{n}$, где је n редни број хармоника.


Редни број хармоника	Граничне вредности
H3	3.4
H5	1.9
H7	1
H9	0.5
H11	0.35
H13	0.296153846
H15	0.256666667
H17	0.226470588
H19	0.202631579
H21	0.183333333
H23	0.167391304
H25	0.154
H27	0.142592593
H29	0.132758621
H31	0.124193548
H33	0.116666667
H35	0.11
H37	0.104054054
H39	0.098717949

Вредности виших хармоника сијалица

Harmonik	H3	H5	H7	H9	H11	H13	H15	H17	H19	H21	H23	H25	H27	H29	H31	H33	H35	H37	H39
Granicne	3.400	1.900	1.000	0.500	0.350	0.296	0.257	0.226	0.203	0.183	0.167	0.154	0.143	0.133	0.124	0.117	0.110	0.104	0.099
1	3.36	2.12	1.78	1.62	1.14	0.84	0.76	0.58	0.55	0.55	0.47	0.43	0.39	0.30	0.26	0.23	0.19	0.21	0.21
9	3.37	2.09	1.89	1.60	1.03	0.86	0.73	0.58	0.60	0.50	0.42	0.40	0.33	0.35	0.36	0.34	0.34	0.33	0.33
10	3.50	2.17	1.87	1.63	1.06	0.82	0.72	0.54	0.53	0.47	0.36	0.35	0.29	0.24	0.26	0.21	0.20	0.19	0.16
12	3.56	2.24	1.95	1.71	1.16	0.92	0.82	0.62	0.60	0.55	0.45	0.44	0.37	0.31	0.32	0.29	0.28	0.29	0.25
13	3.50	2.27	1.86	1.73	1.31	0.97	0.85	0.67	0.56	0.58	0.54	0.50	0.49	0.43	0.37	0.34	0.30	0.27	0.26
16	2.31	1.32	1.16	0.58	0.49	0.41	0.37	0.37	0.27	0.31	0.23	0.26	0.20	0.17	0.17	0.14	0.16	0.14	0.15
17	3.06	1.76	1.56	0.79	0.65	0.53	0.50	0.50	0.37	0.42	0.32	0.35	0.27	0.22	0.22	0.19	0.22	0.17	0.19
18	2.70	1.61	1.10	0.55	0.64	0.47	0.48	0.32	0.35	0.23	0.26	0.21	0.26	0.18	0.19	0.14	0.17	0.12	0.14
19	3.59	2.39	1.83	1.72	1.38	0.99	0.86	0.75	0.59	0.57	0.57	0.51	0.51	0.51	0.44	0.39	0.37	0.32	0.28
20	3.57	2.38	1.89	1.79	1.42	1.03	0.88	0.74	0.60	0.59	0.57	0.50	0.50	0.48	0.41	0.38	0.36	0.31	0.29
21	3.38	2.09	1.84	1.55	0.99	0.81	0.68	0.55	0.61	0.53	0.44	0.42	0.33	0.31	0.33	0.30	0.31	0.29	0.24
2	3.38	2.05	1.78	1.59	1.09	0.86	0.75	0.59	0.59	0.52	0.39	0.37	0.31	0.27	0.29	0.25	0.24	0.24	0.20
3	3.42	2.12	1.85	1.51	0.95	0.78	0.63	0.49	0.51	0.42	0.36	0.33	0.23	0.23	0.22	0.20	0.23	0.20	0.19
4	3.54	2.18	1.88	1.61	1.05	0.85	0.73	0.55	0.55	0.49	0.39	0.37	0.28	0.24	0.25	0.21	0.21	0.21	0.18
5	3.42	2.10	1.73	1.50	0.98	0.73	0.64	0.45	0.43	0.40	0.30	0.29	0.24	0.17	0.18	0.14	0.12	0.13	0.10
6	3.30	2.24	1.72	1.66	1.44	1.09	0.91	0.82	0.67	0.58	0.57	0.52	0.48	0.48	0.46	0.41	0.41	0.40	0.37
7	3.25	1.94	1.84	1.26	0.77	0.74	0.52	0.56	0.48	0.41	0.42	0.35	0.41	0.40	0.39	0.38	0.33	0.32	0.29
8	3.50	2.16	1.79	1.56	1.02	0.76	0.66	0.46	0.42	0.38	0.28	0.26	0.21	0.15	0.16	0.13	0.12	0.12	0.09
11	3.18	1.98	1.77	1.51	0.98	0.79	0.67	0.51	0.53	0.46	0.39	0.38	0.30	0.27	0.27	0.24	0.25	0.24	0.23
14	3.08	1.79	1.65	1.09	0.67	0.64	0.45	0.50	0.41	0.35	0.35	0.29	0.34	0.30	0.28	0.27	0.21	0.23	0.19
15	3.67	2.42	1.92	1.85	1.49	1.09	0.96	0.82	0.66	0.64	0.62	0.55	0.54	0.51	0.44	0.42	0.41	0.37	0.34
22	3.42	2.09	1.89	1.43	0.85	0.80	0.65	0.63	0.63	0.48	0.46	0.40	0.38	0.45	0.42	0.41	0.38	0.36	0.38

Вредности одступања хармоника изражени у процентима

Harmoni	H3	H5	H7	H9	H11	H13	H15	H17	H19	H21	H23	H25	H27	H29	H31	H33	H35	H37	H39
Sijalica	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1	99	112	178	324	325	284	294	257	270	302	278	280	277	223	210	201	173	198	210
9	99	110	189	319	294	290	285	258	294	271	253	262	233	261	292	288	306	322	336
10	103	114	187	325	303	276	282	237	260	257	216	228	200	178	206	184	180	187	163
12	105	118	195	342	330	310	319	276	294	298	270	286	259	234	259	246	257	276	255
13	103	120	186	347	374	326	333	297	278	318	321	324	345	321	297	295	277	262	264
16	68	69	116	117	140	138	146	163	131	167	140	167	143	131	134	123	149	130	153
17	90	93	156	158	186	180	195	221	181	229	193	227	189	169	175	166	198	167	196
18	79	85	110	109	182	159	187	140	173	125	156	136	182	139	154	124	156	120	144
19	106	126	183	344	395	334	334	331	293	311	340	331	356	380	355	333	332	307	288
20	105	125	189	358	407	347	344	327	294	323	338	325	348	358	331	329	324	297	296
21	99	110	184	310	283	273	265	243	299	289	265	274	228	237	269	258	286	280	244
2	99	108	178	318	312	290	294	261	290	284	236	241	217	205	234	218	218	227	201
3	101	111	185	302	271	264	247	217	254	228	213	215	163	176	181	175	207	194	192
4	104	115	188	322	301	286	286	243	272	267	235	242	197	177	199	178	194	203	184
5	101	111	173	300	279	248	250	197	212	216	176	189	167	128	141	118	113	125	104
6	97	118	172	332	411	369	356	361	330	316	338	335	335	364	368	355	368	383	376
7	95	102	184	252	219	250	204	248	236	223	254	229	285	302	312	326	300	306	290
8	103	114	179	311	291	255	256	201	209	210	167	172	148	117	133	113	109	114	92
11	93	104	177	301	279	267	261	224	260	253	235	249	211	205	219	204	227	233	229
14	91	94	165	218	190	215	174	223	202	191	212	189	240	226	228	229	195	218	195
15	108	127	192	370	426	369	373	362	324	347	367	356	376	385	356	356	374	359	340
22	101	110	189	286	243	270	253	276	309	264	275	257	269	337	341	349	347	343	383



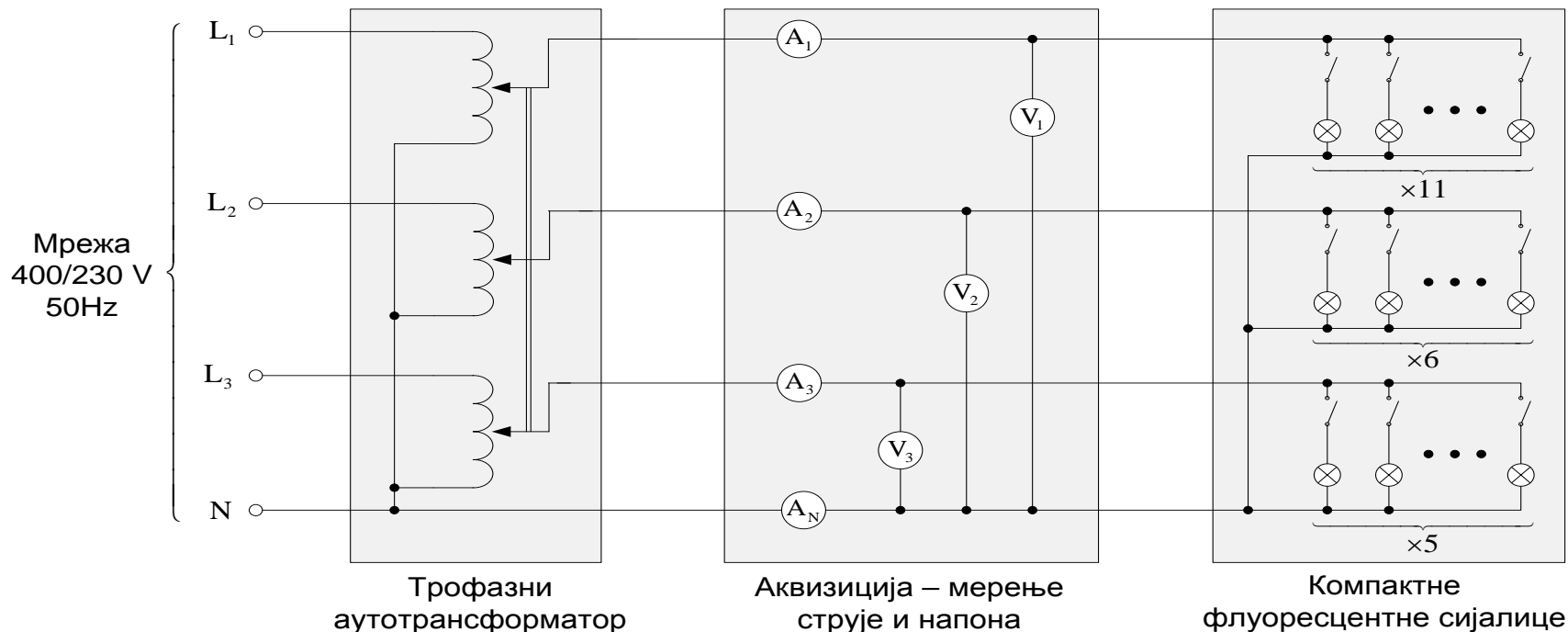
Анализом мерених вредности виших хармоника уочили смо одступања од граничних вредности. Код неких хармоника та одступања су мала, а код неких су знатно велика. Уочили смо најмања одступања код трећег хармоника, где је највеће одступање преко граничне вредности имала сијалица под редним бројем 15 и оно износи 7,86%, а највеће одступање испод граничне вредности сијалица под редним бројем 16 и оно износи 32,17%. Даљом анализом хармонијских вредности уочили смо да су одступања знатно већа код виших хармоника. Крећу се и до чак 350%.

АНАЛИЗА

URMS	IRMS	P	
230.16	0.32	46.21438	
230.16	0.32	46.21438	
230.16	0.32	46.21438	
ln	0.47443	ln	0
ln%	49.6294		

URMS	IRMS	P	
229.73	0.13	18.50835	
229.81	0.14	20.51636	
230.32	0.13	17.53967	
ln	0.21012	ln	0.00777
ln%	52.1362		

Блок шема за мерење струја нелинеарних потрошача (CFLs)



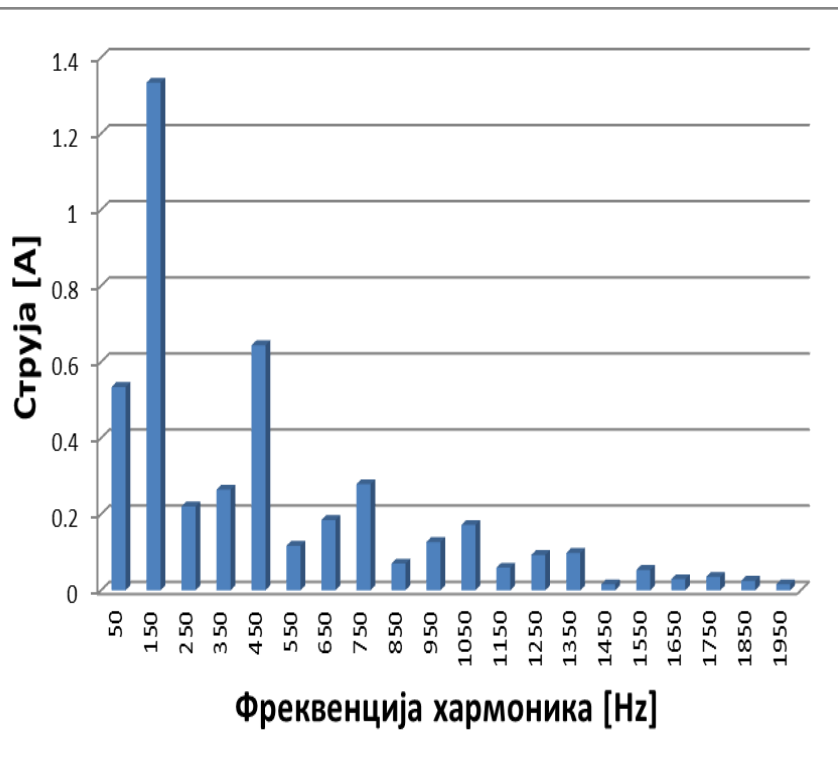
Компактне флуоресцентне сијалице које су узете као пример нелинеарног пријемника, спрегнуте у звезду. У појединим фазама оптерећења нису иста: компактне флуоресцентне сијалице су разлитог типа и снага; и у појединим фазама није исти укупни број сијалица. У фазама L₁, L₂ и L₃ постоје 11, 6 и 5 компактних флуо сијалица, респективно. Тиме је омогућено неравномерно оптерећење по фазама. Појединачо укључивање ЦФЛ је остварено прекидачима. У овом примеру коришћене су CFL у опсегу снага од 18-30 W.

Број CFL у појединим фазама, ефективне вредности фазних и нулте струје и процентуални удео трећег хармоника у нултој струји

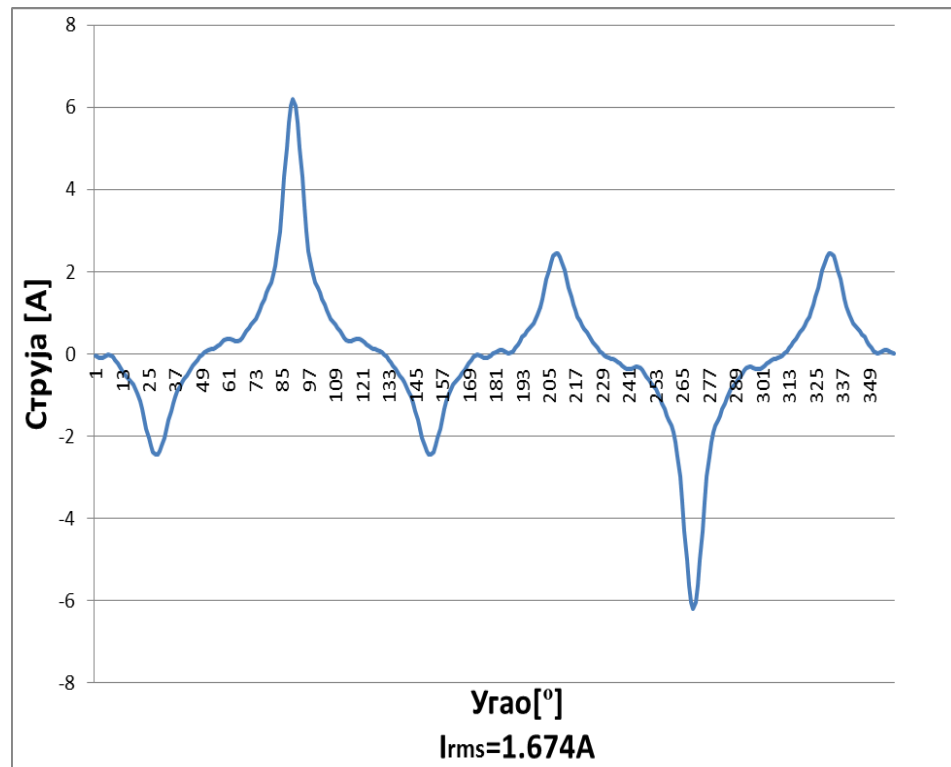
Merenje	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Broj CFL u L ₁	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Broj CFL u L2	1	2	3	4	5	6	6	6	6	6	6
Broj CFL u L3	1	2	3	4	5	5	5	5	5	5	5
L1 (A)	0,136	0,27	0,409	0,545	0,695	0,842	0,987	1,144	1,289	1,446	1,597
L2 (A)	0,146	0,293	0,441	0,572	0,729	0,862	0,862	0,862	0,862	0,862	0,862
L3 (A)	0,132	0,295	0,437	0,582	0,725	0,725	0,725	0,725	0,725	0,725	0,725
In (A)	0,414	0,858	1,287	1,699	2,149	2,429	2,574	2,731	2,876	3,033	3,184
Third harmonic content of phase current (%)	76,18	83,90	86,00	87,10	87,36	87,00	85,52	84,44	82,62	81,21	79,50

0.136						
0.146						
0.132				L1	L2	L3
0.414	0.223	0.538647		0.136	0.146	0.132
0.134						
0.147						
0.163						
0.858	0.448	0.522145		0.27	0.293	0.295
0.139						
0.148						
0.144						
1.289	0.646	0.501164		0.409	0.441	0.439
0.136						
0.131						
0.14						
1.696	0.84	0.495283		0.545	0.572	0.579
0.15						
0.17						
0.145						
2.161	1.057	0.489125		0.695	0.742	0.724
0.147						
0						
0.133						
2.441	1.184	0.485047		0.842	0.742	0.857
0.165						
2.606	1.285	0.493093		1.007		
0.148						
2.754	1.374	0.498911		1.155		
0.149						
2.903	1.47	0.506373		1.304		
0.161						
3.064	1.569	0.512076		1.465		
0.156						
3.22	1.678	0.521118		1.621		

- Види се да су троструки хармоници (3–ћи, 9–ти, 15–ти,...), који се називају триплени, нарочито изражени, док се струје основног хармоника поништавају у звездишту па је та компонента струје у нултом проводнику веома мала (постоји извесна мала вредност јер систем није идеално симетричан).



Хармонијски спектар за мерење бр. 11

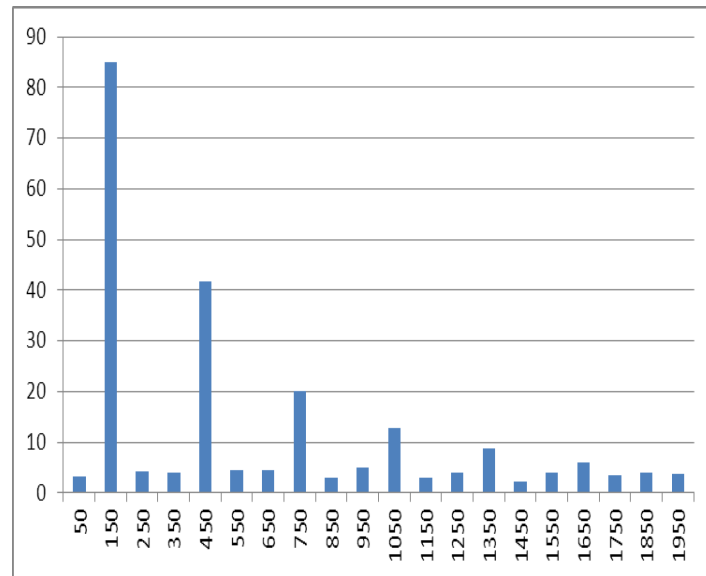
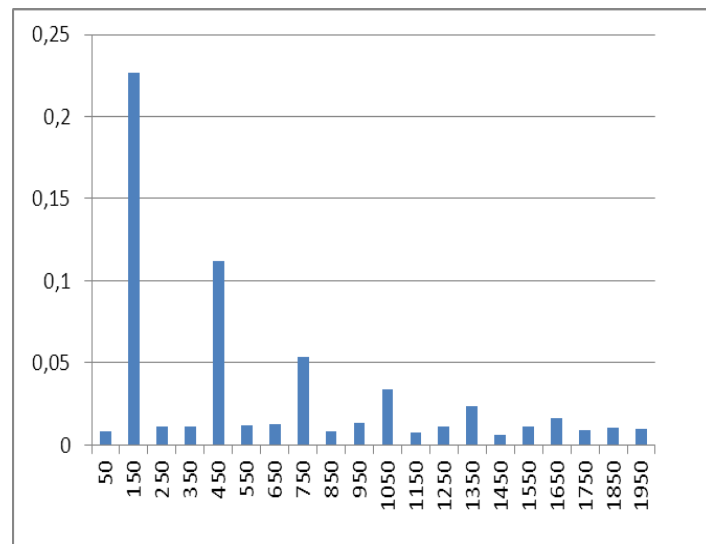


Временски облик струје за мерење бр. 11

Три идентичне КФС спрегнуте у звезду

Ред хармоника	$I_{1,RMS}$ (mA)	$I_{2,RMS}$ (mA)	$I_{3,RMS}$ (mA)	$I_{n,RMS}$ (mA)
1	0,109743	0,109743	0,109743	0,008463
3	0,076872	0,076872	0,076872	0,226755
5	0,047265	0,047265	0,047265	0,011582
7	0,044465	0,044465	0,044465	0,010921
9	0,039077	0,039077	0,039077	0,111792
11	0,027326	0,027326	0,027326	0,012316
13	0,023575	0,023575	0,023575	0,01236
15	0,019808	0,019808	0,019808	0,053589
17	0,01573	0,01573	0,01573	0,008018
19	0,016286	0,016286	0,016286	0,01316
21	0,013532	0,013532	0,013532	0,034161
23	0,01092	0,01092	0,01092	0,007941
25	0,010246	0,010246	0,010246	0,011062
27	0,008503	0,008503	0,008503	0,023508
29	0,007622	0,007622	0,007622	0,006208
31	0,008565	0,008565	0,008565	0,011053
33	0,007923	0,007923	0,007923	0,016375
35	0,007841	0,007841	0,007841	0,009227
37	0,007597	0,007597	0,007597	0,010557
39	0,006	0,006	0,006	0,009922
	0,165	0,165	0,165	0,267

Хармоници струја

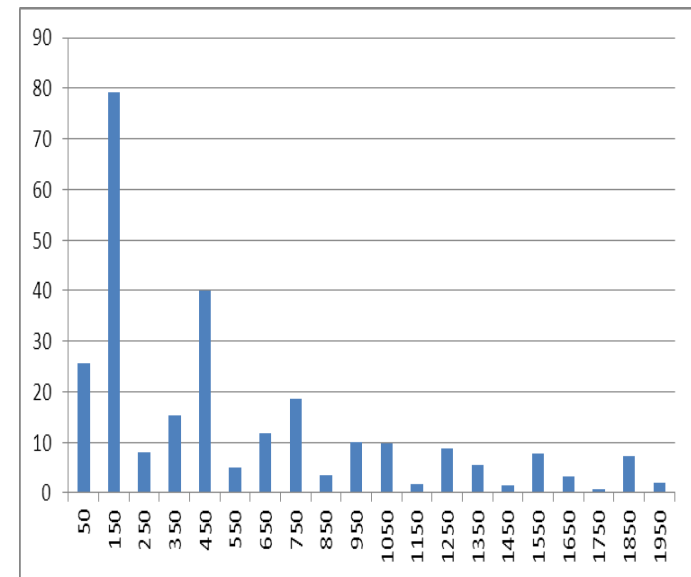
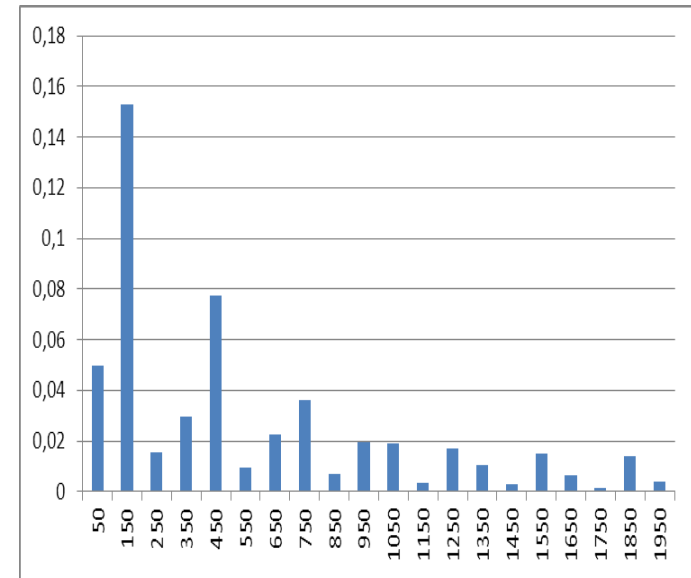


Спектар струје неутралног вода

Три различите КФС

Ред хармоника	$I_{1,RMS}$ (mA)	$I_{2,RMS}$ (mA)	$I_{3,RMS}$ (mA)	$I_{n,RMS}$ (mA)
1	0,109743	0,067788	0,052465	0,049644
3	0,076872	0,047187	0,035447	0,152781
5	0,047265	0,029307	0,021046	0,01564
7	0,044465	0,027323	0,020486	0,02963
9	0,039077	0,024317	0,016351	0,077359
11	0,027326	0,017229	0,010609	0,009628
13	0,023575	0,014671	0,0093	0,022842
15	0,019808	0,012329	0,006792	0,03606
17	0,01573	0,009707	0,005875	0,006888
19	0,016286	0,010015	0,005475	0,019496
21	0,013532	0,007926	0,004003	0,019055
23	0,01092	0,006556	0,004071	0,003337
25	0,010246	0,00615	0,003693	0,01706
27	0,008503	0,005425	0,003574	0,010564
29	0,007622	0,005175	0,003865	0,003022
31	0,008565	0,005393	0,003353	0,014999
33	0,007923	0,005449	0,002334	0,006543
35	0,007841	0,0054	0,001833	0,001405
37	0,007597	0,004817	0,002201	0,01384
39	0,006	0,003141	0,002742	0,003996
	0,165	0,102	0,076	0,193

Хармоници струја

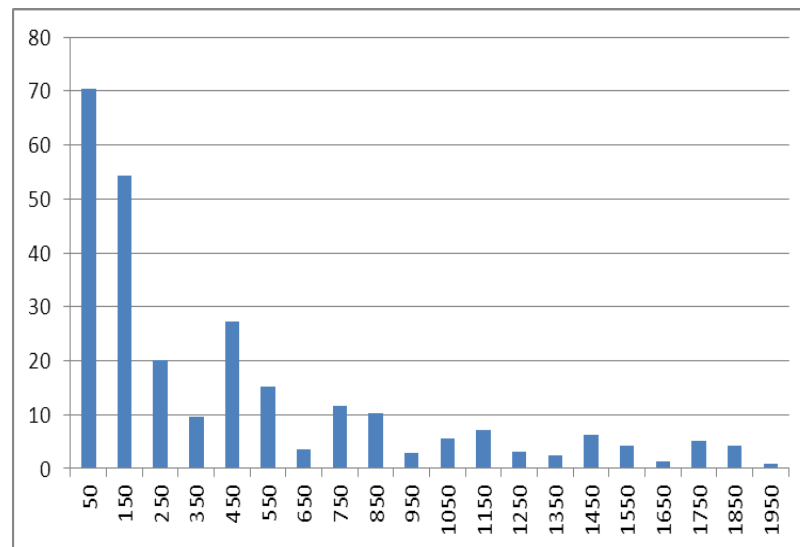
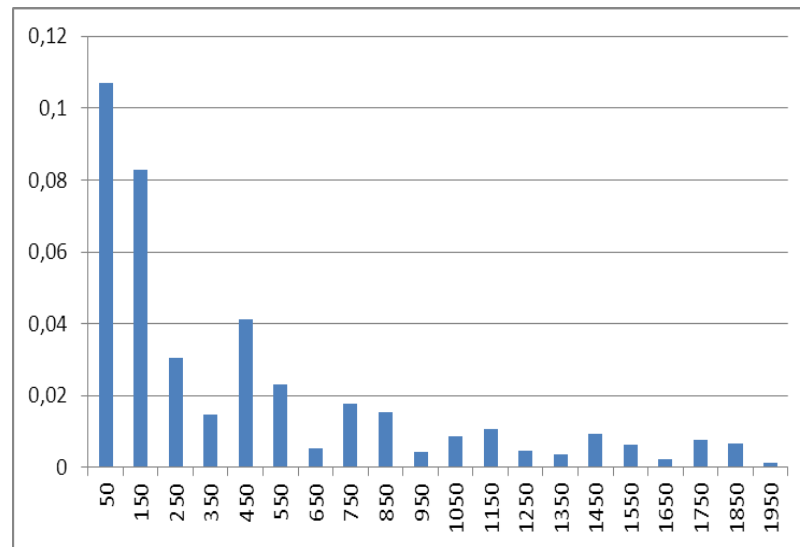


Спектар струје неутралног вода

Две различите КФС и једна волфрамова сијалица

Ред хармоника	$I_{1,RMS}$ (mA)	$I_{2,RMS}$ (mA)	$I_{3,RMS}$ (mA)	$I_{n,RMS}$ (mA)
1	0,165735	0,067788	0,052465	0,049644
3	0,001387	0,047187	0,035447	0,152781
5	0,003376	0,029307	0,021046	0,01564
7	0,002278	0,027323	0,020486	0,02963
9	0,000233	0,024317	0,016351	0,077359
11	0,000275	0,017229	0,010609	0,009628
13	0,000694	0,014671	0,0093	0,022842
15	0,000293	0,012329	0,006792	0,03606
17	8,81E-05	0,009707	0,005875	0,006888
19	0,000388	0,010015	0,005475	0,019496
21	0,000182	0,007926	0,004003	0,019055
23	0,000225	0,006556	0,004071	0,003337
25	0,000104	0,00615	0,003693	0,01706
27	4,24E-05	0,005425	0,003574	0,010564
29	0,00014	0,005175	0,003865	0,003022
31	0,000123	0,005393	0,003353	0,014999
33	6,97E-05	0,005449	0,002334	0,006543
35	0,000125	0,0054	0,001833	0,001405
37	0,000113	0,004817	0,002201	0,01384
39	0,000175	0,003141	0,002742	0,003996
	0,166	0,102	0,076	0,152

Хармоници струја

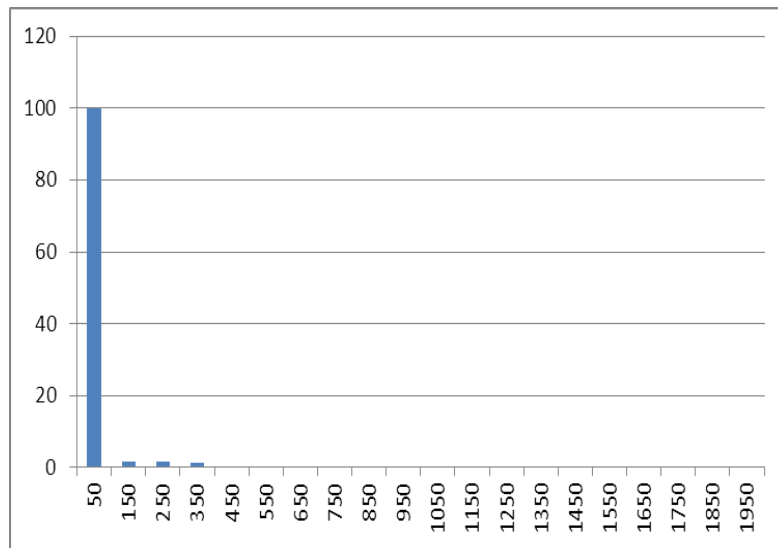
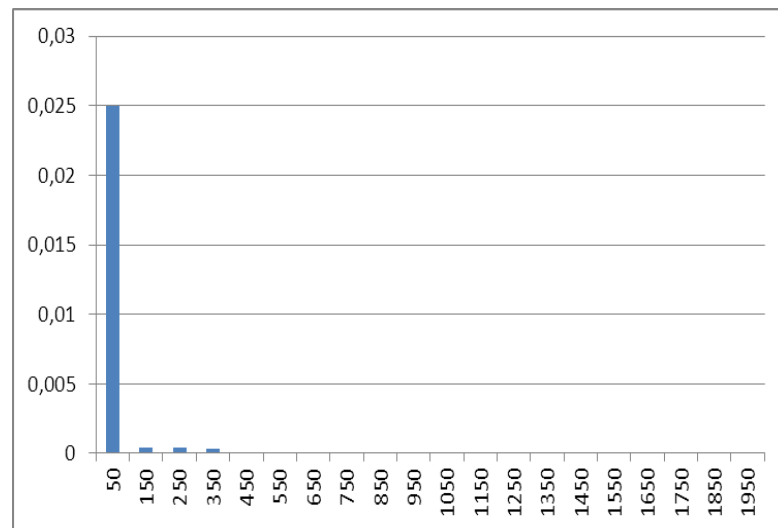


Спектар струје неутралног вода

Три идентичне волфрамове сијалице

Ред хармоника	$I_{1,RMS}$ (mA)	$I_{2,RMS}$ (mA)	$I_{3,RMS}$ (mA)	$I_{n,RMS}$ (mA)
1	0,643732	0,643732	0,643732	0,02498
3	0,001888	0,001888	0,001888	0,000398
5	0,013457	0,013457	0,013457	0,000457
7	0,008108	0,008108	0,008108	0,000306
9	0,001441	0,001441	0,001441	0,000121
11	0,001343	0,001343	0,001343	7,8E-05
13	0,002225	0,002225	0,002225	6,57E-05
15	0,000995	0,000995	0,000995	8,17E-05
17	0,000756	0,000756	0,000756	4,3E-05
19	0,001793	0,001793	0,001793	3,22E-05
21	0,000582	0,000582	0,000582	3,46E-05
23	0,000773	0,000773	0,000773	2,53E-05
25	0,000719	0,000719	0,000719	9,63E-06
27	0,000471	0,000471	0,000471	6,13E-06
29	0,000248	0,000248	0,000248	1,15E-05
31	0,000289	0,000289	0,000289	7,94E-06
33	7,55E-05	7,55E-05	7,55E-05	1,14E-05
35	0,00015	0,00015	0,00015	1,09E-05
37	0,000344	0,000344	0,000344	2,52E-06
39	6,76E-05	6,76E-05	6,76E-05	6,97E-06
	0,644	0,644	0,644	0,025

Хармоници струја



Спектар струје неутралног вода

Процентуални однос ефективних вредности струја у фазним проводницима и струје у нултом проводнику

Mer.	I _{rms} /I _{n, trp} (%)			I _{rms} /I _{n, rms} (%)		
	L1	L2	L3	L1	L2	L3
1	71.4262	76.6782	69.3255	60.9865	65.4709	59.1928
2	63.0568	68.4283	68.8954	60.2679	65.6250	72.7679
3	65.3123	70.4230	69.7835	58.7644	63.3628	62.7874
4	66.2544	69.5367	70.7524	64.8810	68.0952	69.2857
5	66.8699	70.1413	69.7564	65.7521	68.9688	68.5904
6	72.6738	74.4000	63.7838	71.1149	72.8041	62.4155
7	67.7493	58.6570	58.3352	65.5253	56.7315	56.4202
8	76.4852	65.6676	67.4197	73.0713	62.7365	64.4105
9	72.8201	62.5209	64.1891	68.2993	58.6395	60.2041
10	69.3792	59.5666	61.1560	63.9898	54.9395	56.4054
11	76.3518	66.4872	68.5259	69.1895	60.2503	62.0977

Израчуаната струја која тече кроз неутрални проводник добијена је на основу следећег обрасца:

$$I_b' = I_N = \frac{I_b}{k_{tot}} \cdot 3 \cdot k_{III}$$

I_b - струја оптерећења кабла,

k_{tot} – укупни редукциони фактор који је једнак 1,

k_{III} – фактор који узима у обзир струју трећег хармоника.

Овај образац је коришћен јер је удео струје трећег хармоника у свим мерењима већа од 45%.

Third harmonic content of phase current	Reduction factor			
	Size selection is based on phase current	Current to take in account for the cable selection I_b'	Size selection is based on neutral current	Current to take in account for the cable selection I_b'
%				
0 ÷ 15	1	$I_b' = \frac{I_b}{k_{tot}}$	-	-
15 ÷ 33	0.86	$I_b' = \frac{I_b}{k_{tot} \cdot 0.86}$	-	-
33 ÷ 45	-	-	0.86	$I_b' = \frac{I_N}{0.86}$
> 45	-	-	1	$I_b' = I_N$

Губици у проводнику изазвани вишим хармоницима струје пријемника

Вредност наизменичне отпорности може да се дефинише следећим изразом

$$r_{AC} = r_{DC} \left(1 + Y_{se} + Y_{pe} \right)$$

где је:

r_{ac} – отпорност проводника при наизменичној струји (Ω/m),

r_{dc} – отпорност проводника при једносмерној струји (Ω/m),

Y_{se} – фактор повећања услед скин-ефекта,

Y_{pe} – фактор повећања услед ефекта близине.

Укупни губици у каблу се могу дефинисати следећим изразом

$$P_{\text{cable losses}} = \sum_{c=1}^C \sum_{h=1}^H R_{c,h} I_{c,h}^2$$

где је:

$P_{\text{cable losses}}$ – укупни губици у каблу,

C – број прводника у каблу,

$R_{c,h}$ – отпорност при h -том хармоника струје у c -том прводнику кабла,

$I_{c,h}$ – ефективна вредност h -тог хармоника струје у c -том прводнику кабла.

ВОЛФРАМ

URMS	IRMS	P	Q	D
230.55	0.27957	64.48095	0.00000	1.62214
230.96	0.20639	47.64982	0.00000	1.30178
230.67	0.30465	70.25522	0.00000	1.65872

Pli/PN (%)	0.096338	0.176885	0.081182
------------	----------	----------	----------

ШТЕДЪИВА

URMS	IRMS	P	Q	D
230.16	0.31865	46.21438	19.69834	53.43790
230.16	0.31865	46.21438	19.69834	53.43790
230.16	0.31865	46.21438	19.69834	53.43790

Pli/PN (%)	207.3902	207.39016	207.3902
------------	----------	-----------	----------

URMS	IRMS	P	Q	D
230.73	0.34672	50.60727	21.26824	58.18667
230.73	0.34672	50.60727	21.26824	58.18667
230.73	0.34672	50.60727	21.26824	58.18667

Pli/PN (%)	175.1617	175.16171	175.1617
------------	----------	-----------	----------

URMS	IRMS	P	Q	D
230.10	0.42571	62.37075	29.52143	69.50945
230.10	0.42571	62.37075	29.52143	69.50945
230.10	0.42571	62.37075	29.52143	69.50945

Pli/PN (%)	116.1916	116.19163	116.1916
------------	----------	-----------	----------

ГУБИЦИ СНАГЕ У ВОДОВИМА МРЕЖЕ

3 klasične	la	lr	lh	$\Delta S1$	ΔS
sijalice	2.4756	0.0000	0.0000	1.6955	1.6980
	2.4754	0.0000	0.0000		

3 fluorescentne	la	lr	lh	$\Delta S1$	ΔS
sijalice	0.6444	1.2610	0.1419	0.314833	0.318
	0.6423	1.2618	0.1419		

3 fluo i 3 klasične	la	lr	lh	$\Delta S1$	ΔS
sijalice	3.1113	1.2295	0.1728	2.897241	2.902
	3.1094	1.2337	0.1728		

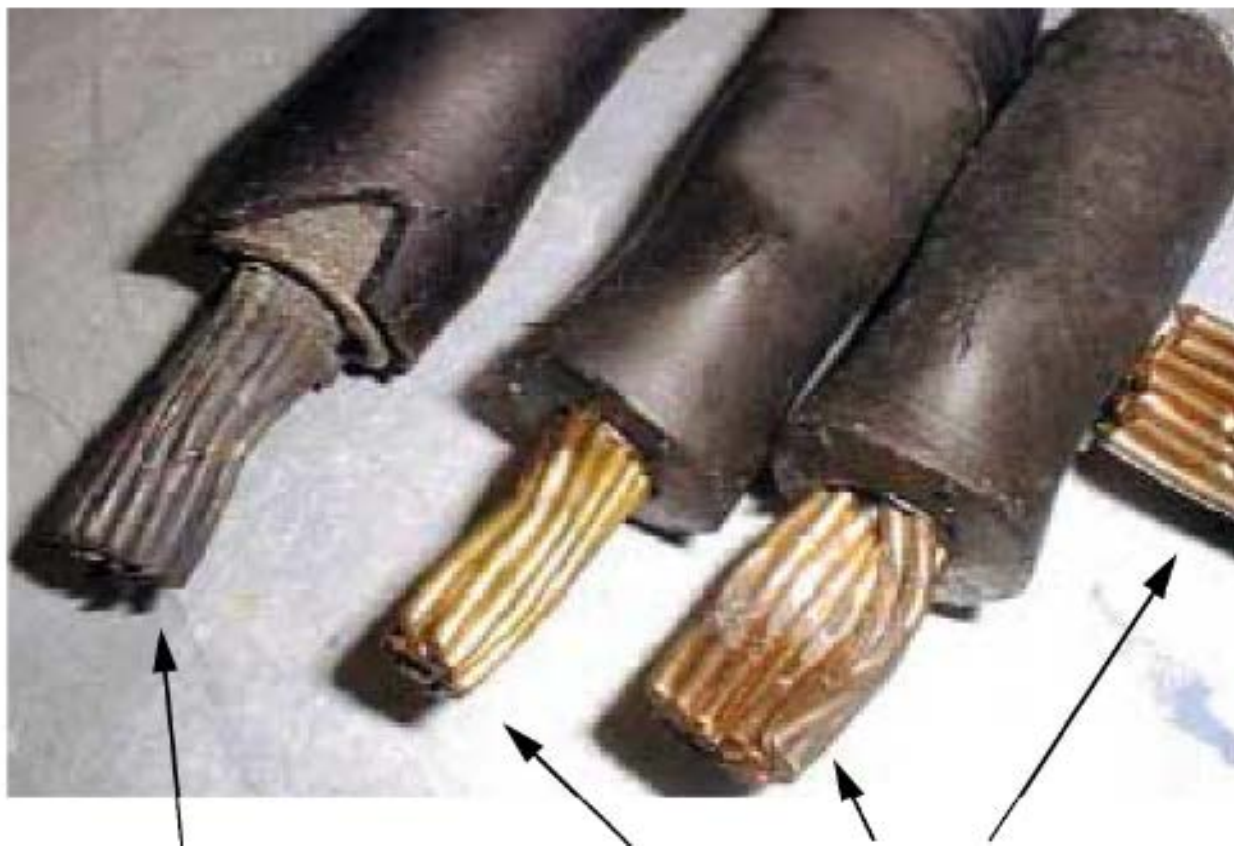
9 štedljivih	la	lr	lh	$\Delta S1$	ΔS
sijalica	0.7861	0.3613	0.8866	0.200725	0.268
	0.7848	0.3638	0.8866		

2 klasične i 9 šted.	la	lr	lh	$\Delta S1$	ΔS
sijalica	2.3177	0.3192	0.8642	1.496952	1.539
	2.3165	0.3269	0.8648		

3 fluo i 9 štedljivih	la	lr	lh	$\Delta S1$	ΔS
sijalica	1.3755	0.9503	0.9421	0.686167	0.769
	1.3732	0.9530	0.9421		

3 fluo, 2 klas i	la	lr	lh	$\Delta S1$	ΔS
9 štedljivih	2.9460	0.9339	0.9523	2.528567	2.646
	2.9438	0.9401	0.9523		

Ефекат преоптерећења троструких-п хармоника струја у нултом проводнику



Оксидован нултни проводник

Фазни проводници