

Техничко решење: Инструмент – подсистем за паралелно мерење фактора изобличења

Руководилац пројекта: Зоран Митровић

Одговорно лице: Зоран Митровић

Аутори: Небојша Пјевалица, Владимир Вујичић, Велибор Пјевалица

Развијено: у оквиру пројекта технолошког развоја ТР-32019

Година: 2012.

Примена: 01.04.2012.

Кратак опис

У вишеканални инструмент за мерење параметара мреже на трофазном систему имплементиран је подсистем за паралелно мерење фактора изобличења на свим мерним каналима.

Проблем мерења хармонијског садржаја мрежног напона постаје све важнији како се користи све већи број уређаја који уносе више хармонике и увођења норме EN50160 која дефинише границе дозвољеног хармонијског изобличења.

На Факултету техничких наука реализован је инструмент који мери параметре на три напонска и четири струјна канала (струје три фазе и струја нуле). Инструмент је намењен мерењима напона, струје, активне и реактивне снаге, фазног угла и фактора изобличења (према Европској норми EN50160). Велики број података и велика захтевана брзина рада наметнули су решење засновано на програмабилном FPGA интегрисаном колу.

Као посебан подсистем у овај инструмент имплементиран је део за паралелно мерење хармоника. Мере се хармоници на свим каналима до 50-тог реда.

Реализатори:

Факултет техничких наука у Новом Саду

Корисници:

ФТН као произвођач. Могућ је пренос технологије према свим заинтересованим фирмама.

Подтип решења:

Индустријски прототип (М 82)

Стање у свету

Тачно и прецизно мерење електричних величина у дистрибутивној мрежи и то:

- Ефективних вредности струја
- Ефективних вредности напона
- Фреквенције основног хармоника
- Спектралног састава сигнала
- Фактора изобличења (THD)
- Фазног помераја
- Активне снаге
- Реактивне снаге
- Привидне снаге,

спада међу најважније задатке метрологије данас. Потреба за тачним и прецизним (и по могућности јефтиним) мерењима настала је из техничких и економских разлога. Основни економски мотив свакако је потреба да се испоручена електрична енергија правилно измери, тарифира и наплати. Као и у свакој трговини природно је поставити питање односа страна учесница у процесу купопродаје електричне енергије.

Пожељно је да напон напајања буде, у погледу таласног облика, што ближи идеалној синусоиди са константном фреквенцијом и амплитудом. У пракси постоје многи фактори који доводе до одступања од овога. Повећање потрошње електричне енергије доводи до пораста електричних струја у систему, што опет, има за последицу повећање пада напона. Величина напона напајања појединачног корисника зависи од збирних падова напона на свим компонентама система. Ово је разлог што је напон напајања потрошача променљив. Зато је било нужно увођење стандарда који би дефинисао карактеристике напона коришћењем термина вероватноће и статистике. У економском интересу потрошача је да се стандард претежно бави нормалним очекиваним условима, али је такође битно предвидети и нерегуларности у напајању.

С обзиром на то да електрична енергија са генераторског система долази до потрошача преко преносног и дистрибутивног система, а да је сваки од система подложен оштећењу или квару услед хемијског, електричног или механичког напрезања, јасно је да су бројни фактори који могу довести до нерегуларности у снабдевању електричном енергијом. Одржавање учестаности константном захтева да део генераторског система буде стално усклађиван са тренутним стањем на потрошачкој страни. Капацитети генераторског система, као и ниво потрошње могу се мењати континуално, али и у дискретним износима, поготово у случају кварова на генераторском, преносном или дистрибутивном систему. Услед дискретних промена, постоји опасност од неусаглашености, што резултује променом учестаности сигнала у мрежи, било смањењем, било повећањем. Ова опасност може да се смањи повезивањем више мањих генераторских система у један јако велики, тако да генераторски капацитет буде много већи од очекиваних промена у потрошњи.

Следећи утицајан фактор до чије промене може доћи је таласни облик сигнала. Промена таласног облика ређе може да се јави услед нередовних дешавања на преносној и/или дистрибутивној мрежи (квар прекидача, квар на трафо станици, удар грома), а чешће је последица дејства који могу да мењају таласни облик директно, или суперпонирањем. Стога, стандард EN 50160-2000 дефинише где је могуће нормално очекивати промену карактеристика сигнала. У осталим случајевима стандард даје могуће показатеље око тога што би се могло очекивати.

По питању праћења стања у мрежи, најједноставније је окарактерисати нормално напонско стање присуством само једног, т.ј. првог хармоника. Појава осталих хармонијских компоненти најдиректније сигнализира нерегуларност. Подсистем за паралелно мерење хармоника на основу спектралног састава сигнала у мрежи одређује стање система, уз мерење свих релевантних вредности. У том смислу, искоришћена је генерализована СААДК-2Г метода, развијена на Катедри за електрична мерења Факултета Техничких наука, Универзитета у Новом Саду.

Метода одређивања хармоника

Европска норма EN 50160 дефинише поред осталих карактеристика и дозвољено хармонијско изобличење мрежног напона. Конкретно, дозвољено хармонијско изобличење напона на 0,4 kV износи 8%. На основу овога, јасно је да хармонијски састав свих сигнала на енергетској мрежи (фазних напона и струја и струје кроз нулти проводник) мора бити

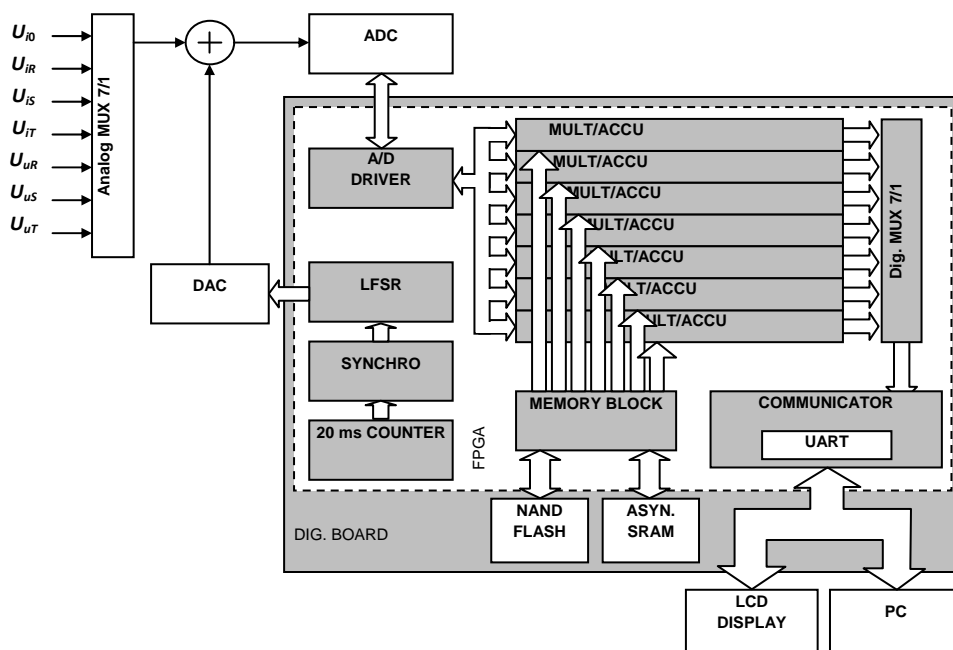
редовно праћен (мерен). Конструисано мерило има следеће добре карактеристике:

- Горња граница апсолутне грешке мерења независна је од таласног облика сигнала који се мери;
- Горња граница апсолутне грешке независна је од реда хармоника;
- Дуже временско трајање мерења даје већу тачност резултата, која расте са кореном броја одбирака у мерењу.

На слици је дат изглед инструмента:



Упростићена блок шема инструмента који мери 3 напона и 4 струје приказана је на слици:



Грешка мерења амплитуде хармоника

Нека је амплитуда неког хармоника A , а фазни угао ξ и нека је испуњено:

$$\Delta_2 \ll \Delta_1 \quad (1)$$

при чему је Δ_2 резолуција меморисане базисне функције, а Δ_1 резолуција A/D ковертора.

Тада је апсолутне грешке мерења G_A :

$$G_A = \sqrt{(A \cos \xi + \varepsilon)^2 + (A \sin \xi + \varepsilon)^2} - A \quad (2)$$

Са ε је означена горња граница апсолутне грешке мерења синусне и/или косинусне компоненте датог хармоника. Без губитка на општости, усвојено је да је грешка синусне и/или косинусне компоненте са позитивним предзнаком. Ако је ова грешка много мања од амплитуде хармоника, онда важи:

$$G_A \approx \sqrt{A^2 + 2A\varepsilon(\cos \xi + \sin \xi)} - A \quad (3)$$

Горња граница апсолутне грешке мерења добија се када је G_A максимално, односно када је:

$$\cos \xi = \sin \xi \quad (4)$$

односно за

$$\xi = \frac{\pi}{4} + 2k\pi, (k = \dots, -1, 0, 1, 2, \dots) \quad (5)$$

Тада је:

$$|G_A|_{MAX} \approx \sqrt{A^2 + 2\sqrt{2}A\varepsilon} - A \quad (6)$$

Односно

$$|G_A|_{MAX} \approx A \sqrt{1 + 2\sqrt{2} \frac{\varepsilon}{A}} - A \quad (7)$$

Приближна једнакост

$$|G_A|_{MAX} \approx A \sqrt{1 + 2\sqrt{2} \frac{\varepsilon}{A}} - A \quad (7) \text{ се за}$$

$$A \gg \varepsilon \quad (8)$$

своди на

$$|G_A|_{MAX} \approx \sqrt{2}\varepsilon \quad (9)$$

Из $|G_A|_{MAX} \approx \sqrt{2}\varepsilon$

(9) произилази да је горња граница апсолутне грешке мерења амплитуде хармоника уз испуњене услове $\Delta_2 \ll \Delta_1$ (1) и $A \gg \varepsilon$ (8) константна и

независна од амплитуде хармоника, и од реда хармоника.

Грешка мерења фактора изобличења

Кад се датим мерилом мери фактор изобличења (THD фактор) неке од величина на мрежи (означимо величину чији се THD фактор мери са V), и ако се величина V може једнозначно представити преко својих хармонијских компоненти, а са V_i означимо ефективну вредност појединачног, i -тог хармоника, тада је фактор Q :

$$Q = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^q V_i^2}}{V_1} \quad (10)$$

По дефиницији, релативна грешка мерења фактора Q је:

$$\Gamma_Q = \frac{Q_m - Q}{Q} = \frac{Q_m}{Q} - 1 \quad (11)$$

у $\Gamma_Q = \frac{Q_m - Q}{Q} = \frac{Q_m}{Q} - 1$ (11), Q_m је мерена вредност фактора изобличења, а Q је тачна (стварна) вредност фактора изобличења. Ако се са γ означи горња граница апсолутне грешке мерења амплитуде једног хармоника из $|G_A|_{MAX} \approx \sqrt{2}\varepsilon$ (9), онда важи:

$$|\Gamma_Q| = \left| \frac{\frac{\sqrt{\sum_{i=2}^q (V_i + \gamma)^2}}{V_1 + \gamma}}{\frac{\sqrt{\sum_{i=2}^q V_i^2}}{V_1}} - 1 \right| \quad (12)$$

$$|\Gamma_{\varrho}| = \left| \frac{\frac{\sqrt{\sum_{i=2}^q (V_i + \gamma)^2}}{V_1 + \gamma}}{\frac{\sqrt{\sum_{i=2}^q V_i^2}}{V_1}} - 1 \right|$$

Ако за сваки од хармоника важи $V_i \gg \gamma$, онда се

(12) може развити по параметру γ и добија се израз који дефинише горњу границу релативне грешке код мерења фактора изобличења:

$$|\Gamma_{\varrho}|_{MAX} \approx \left| \gamma \left(\frac{\sum_{i=2}^q V_i}{\sum_{i=2}^q V_i^2} - \frac{1}{V_i} \right) \right| \leq \gamma \left(\frac{\sum_{i=2}^q V_i}{\sum_{i=2}^q V_i^2} + \frac{1}{V_i} \right) \quad (13)$$

Види се да горња граница релативне грешке мерења линеарно зависи од горње границе апсолутне грешке мерења амплитуде појединачног хармоника.

Ако би се датим мерилем мерила ефективна вредност неке величине V , тада је релативна грешка мерења:

$$\frac{|\Delta V|}{V} \leq \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^q (V_i + \gamma)^2} - \sqrt{\sum_{i=1}^q V_i^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^q V_i^2}} \quad (14)$$

$$\frac{|\Delta V|}{V} \leq \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^q (V_i + \gamma)^2} - \sqrt{\sum_{i=1}^q V_i^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^q V_i^2}}$$

У изразу **(14)**, ΔV је апсолутна грешка мерења

$$\frac{|\Delta V|}{V} \leq \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^q (V_i + \gamma)^2} - \sqrt{\sum_{i=1}^q V_i^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^q V_i^2}}$$

величине V . Развојем

(14), добија се:

$$\frac{|\Delta V|}{V} \leq \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^q V_i^2 + 2\gamma \sum_{i=1}^q V_i + q\gamma^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^q V_i^2}} - 1 \approx \gamma \frac{\sum_{i=1}^q V_i}{\sum_{i=1}^q V_i^2} \quad (15)$$

Из
$$\frac{|\Delta V|}{V} \leq \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^q V_i^2 + 2\gamma \sum_{i=1}^q V_i + q\gamma^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^q V_i^2}} - 1 \approx \gamma \frac{\sum_{i=1}^q V_i}{\sum_{i=1}^q V_i^2} \quad (15)$$
 следи да и горња граница релативне грешке мерења ефективне вредности неке величине датим мерилом линеарно зависи од горње границе апсолутне грешке мерења амплитуде појединог хармоника.

Експериментални резултати

Коначна експериментална провера мерења хармоника рађена је са седмоканалном верзијом уређаја након имплементације подсистема за паралелно мерење хармоника. Рађено је мерење хармоника три напонска сигнала за следеће таласне облике:

- Синус ефективне вредности 220,0 V,
- Четвртке са фактором испуне 50%, ефективне вредности 310 V,
- Троугао ефективне вредности 180,9 V.

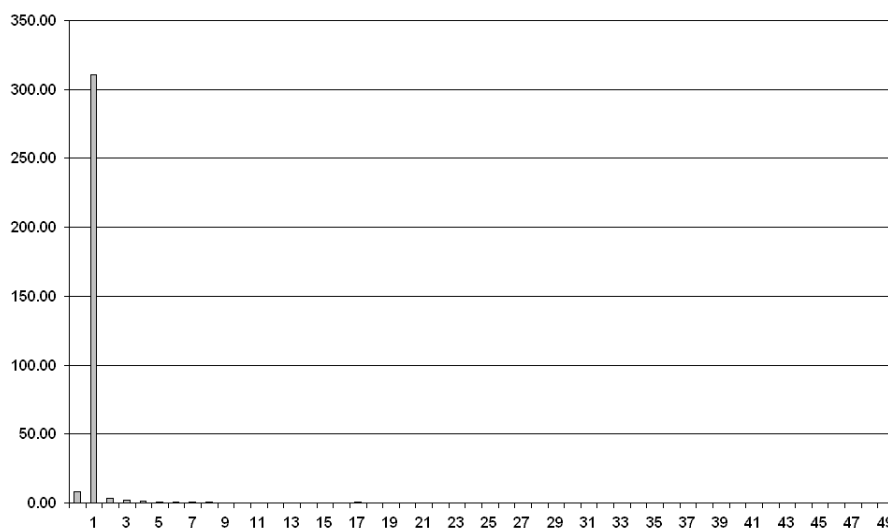
Висок ниво стабилности мрежне учестаности определио је мерење хармоника у трајању од једне периоде сигнала (20 ms). Значајно је напоменути да се анализирана тачност односи на мрежне величине чија основна учестаност износи фиксно 50 Hz.

У недостатку тачног инструмента за мерење хармоника којим би се урадила овера новог седмоканалног инструмента, рађена су мерења за проверу прецизности. Ефективна вредност напона мерена је инструментом HP3458A, а с обзиром на то да се ради о таласним облицима чији је хармонијски састав познат, на бази добијених резултата се може добити слика о прецизности инструмента. Приликом мерења напонског сигнала синусног таласног облика, инструмент HP 3458A је показивао ефективну вредност од 220,0 V, а седмоканални инструмент је измерио амплитуде хармоника, чије су средње вредности дате у табели 1, а график на слици 1. Статистика је рађена у серији од 200 мерења.

Ред харм.	0	1	2	3	4
Ср. вр. ампл.	7,89V	310,89V	3,41V	2,12V	1,65V
Ред харм.	5	6	7	8	9
Ср. вр. ампл.	0,98V	0,53V	0,58V	0,39V	0,18V
Ред харм.	10	11	12	13	14
Ср. вр. ампл.	0,16V	0,16V	0,17V	0,17V	0,16V
Ред харм.	15	16	17	18	19

Ср. вр. ампл.	0,16V	0,20V	0,40V	0,17V	0,17V
Ред харм.	20	21	22	23	24
Ср. вр. ампл.	0,17	0,19V	0,15V	0,16V	0,19V
Ред харм.	25	26	27	28	29
Ср. вр. ампл.	0,16V	0,18V	0,17V	0,22V	0,17
Ред харм.	30	31	32	33	34
Ср. вр. ампл.	0,18V	0,17V	0,17V	0,15V	0,16
Ред харм.	35	36	37	38	39
Ср. вр. ампл.	0,25V	0,18V	0,20V	0,20V	0,15V
Ред харм.	40	41	42	43	44
Ср. вр. ампл.	0,15V	0,18V	0,19V	0,16V	0,18V
Ред харм.	45	46	47	48	49
Ср. вр. ампл.	0,16V	0,18V	0,16V	0,16V	0,25V

Табела 1: Средње вредности амплитуда хармоника синусног напона ефективне вредности 220,0V



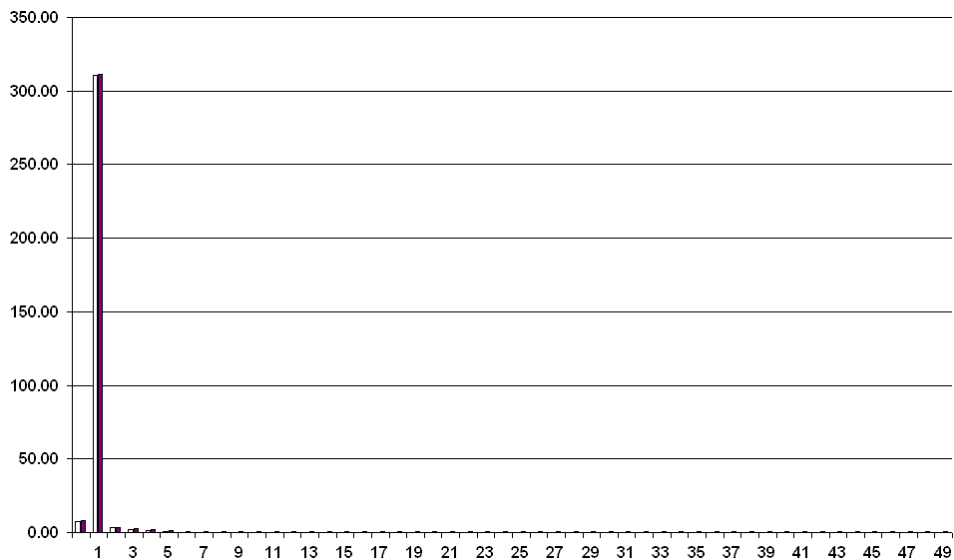
Слика 1: Средње вредности амплитуда хармоника синусног напона ефективне вредности 220,0V

Опсег измерених вредности амплитуда за све хармонике дат је у табели 2 и на слици 2.

Ред харм.	0	1	2	3	4
Мин.	7,70V	310,64V	3,13V	1,83V	1,39V
Макс.	8,27V	311,15V	3,70V	2,38V	1,89V
Ред харм.	5	6	7	8	9
Мин.	0,69V	0,19V	0,27V	0,19V	0,00V

Макс.	1,29V	0,79V	0,98V	0,69V	0,43V
Ред харм.	10	11	12	13	14
Мин.	0,00V	0,00V	0,00V	0,00V	0,00V
Макс.	0,43V	0,43V	0,43V	0,43V	0,43V
Ред харм.	15	16	17	18	19
Мин.	0,00V	0,00V	0,00V	0,00V	0,00V
Макс.	0,43V	0,43V	0,69V	0,43V	0,43V
Ред харм.	20	21	22	23	24
Мин.	0,00V	0,00V	0,00V	0,00V	0,00V
Макс.	0,43V	0,54V	0,38V	0,43V	0,43V
Ред харм.	25	26	27	28	29
Мин.	0,00V	0,00V	0,00V	0,00V	0,00V
Макс.	0,43V	0,43V	0,43V	0,54V	0,43V
Ред харм.	30	31	32	33	34
Мин.	0,00V	0,00V	0,00V	0,00V	0,00V
Макс.	0,43V	0,54V	0,43V	0,43V	0,43V
Ред харм.	35	36	37	38	39
Мин.	0,00V	0,00V	0,00V	0,00V	0,00V
Макс.	0,54V	0,43V	0,43V	0,43V	0,43V
Ред харм.	40	41	42	43	44
Мин.	0,00V	0,00V	0,00V	0,00V	0,00V
Макс.	0,43V	0,54V	0,43V	0,43V	0,43V
Ред харм.	45	46	47	48	49
Мин.	0,00V	0,00V	0,00V	0,00V	0,00V
Макс.	0,43V	0,43V	0,43V	0,43V	0,54V

Табела 2: Опсег измерених вредности амплитуда хармоника синусног сигнала од 220,0V

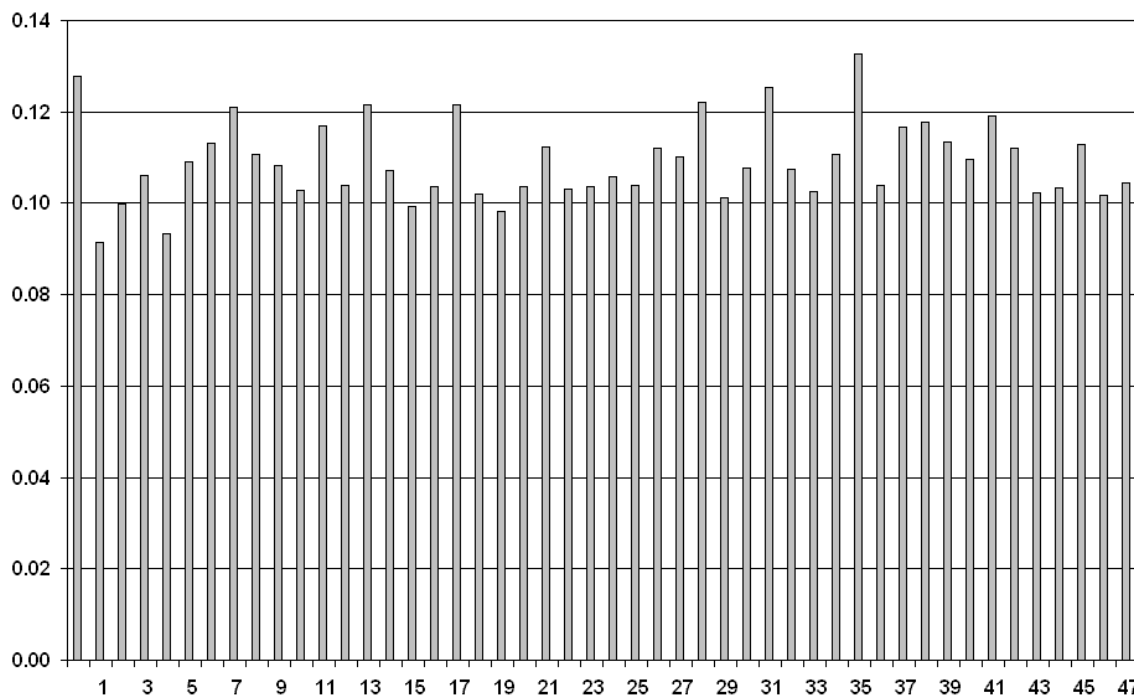


Слика 2: Опсег измерених вредности амплитуда хармоника синусног сигнала од 220,0V

Стандардна девијација мерења амплитуда хармоника за синусни сигнал ефективне вредности 220,0V дата је у табели 3 и на слици 3.

Ред харм.	0	1	2	3	4
Ст. деви.	0,13V	0,09V	0,10V	0,11V	0,09V
Ред харм.	5	6	7	8	9
Ст. деви.	0,11V	0,11V	0,12V	0,11V	0,11V
Ред харм.	10	11	12	13	14
Ст. деви.	0,10V	0,12V	0,10V	0,12V	0,11V
Ред харм.	15	16	17	18	19
Ст. деви.	0,10V	0,10V	0,12V	0,10V	0,10V
Ред харм.	20	21	22	23	24
Ст. деви.	0,10V	0,11V	0,10V	0,10V	0,11V
Ред харм.	25	26	27	28	29
Ст. деви.	0,10V	0,11V	0,11V	0,12V	0,10V
Ред харм.	30	31	32	33	34
Ст. деви.	0,11V	0,13V	0,11V	0,10V	0,11V
Ред харм.	35	36	37	38	39
Ст. деви.	0,13V	0,10V	0,12V	0,12V	0,11V
Ред харм.	40	41	42	43	44
Ст. деви.	0,11V	0,12V	0,11V	0,10V	0,10V
Ред харм.	45	46	47	48	49
Ст. деви.	0,11V	0,10V	0,10V	0,10V	0,13V

Табела 3: Стандардна девијација амплитуда хармоника синусног сигнала од 220,0V



Слика 3: Стандардна девијација амплитуда хармоника
 синусног сигнала од 220,0V

Током експеримената коришћен је калибратор напона чија стандардна девијација је реда величине стандардне девијације добијених резултата, а што је знатно више од теоријске стандардне девијације за фактор покривања 3.

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{N}} \frac{\Delta}{2} \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (16)$$

Једначина $\sigma = \frac{1}{\sqrt{N}} \frac{\Delta}{2} \frac{1}{\sqrt{2}}$ (16) односи се на стандардну девијацију мерења инструментом, где је N број мерења током целокупног интервала од 4 секунде (200 мерених периода улазног сигнала учестаности 50 Hz). Број одмерака по периоди износи 2048.

$$N = 200 \times 2048 = 409600 \quad (17)$$

Са Δ је означен квант АД конвертора, Како је дефинисан улазни опсег конвертора 400 V ефективно, из тога следи:

$$\Delta = \frac{400V \times \sqrt{2} \times 2}{256} = 4.419V \quad (18)$$

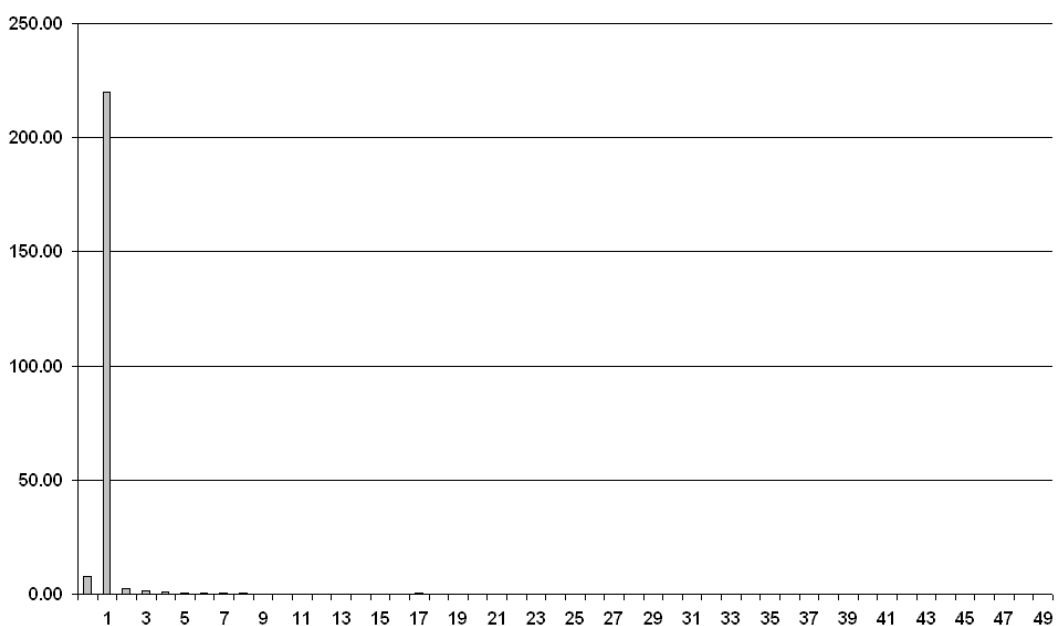
Из овога следи да стандардна девијација има вредност од 0.0024 V, односно три сигма је 0.007 V. Ово је знатно мање од стандардне девијације сигнала калибратора, па се стандардна девијација инструмента може занемарити у односу на стандардну девијацију сигнала калибратора.

Средње вредности ефективних вредности хармоника синусног сигнала од 220,0 V дате су у табели 4 и на слици 4.

Ред харм.	0	1	2	3	4
Ср. вр. еф. вр.	7,89V	219,83V	2,41V	1,50V	1,17V
Ред харм.	5	6	7	8	9
Ср. вр. еф. вр.	0,69V	0,37V	0,41V	0,28V	0,12V
Ред харм.	10	11	12	13	14
Ср. вр. еф. вр.	0,11V	0,11V	0,12V	0,12V	0,11V
Ред харм.	15	16	17	18	19
Ср. вр. еф. вр.	0,12V	0,14V	0,28V	0,12V	0,12V
Ред харм.	20	21	22	23	24
Ср. вр. еф. вр.	0,12V	0,14V	0,10V	0,11V	0,14V
Ред харм.	25	26	27	28	29
Ср. вр. еф. вр.	0,12V	0,13V	0,12V	0,12V	0,16V
Ред харм.	30	31	32	33	34
Ср. вр. еф. вр.	0,12V	0,13V	0,12V	0,12V	0,11V
Ред харм.	35	36	37	38	39

Ср. вр. еф. вр..	0,11V	0,18V	0,13V	0,14V	0,14V
Ред харм.	40	41	42	43	44
Ср. вр. еф. вр.	0,11V	0,11V	0,13V	0,13V	0,11V
Ред харм.	45	46	47	48	49
Ср. вр. еф. вр..	0,12V	0,13V	0,12V	0,12V	0,18V

Табела 4: Средње вредности ефективних вредности хармоника синусног напона ефективне вредности 220,0V



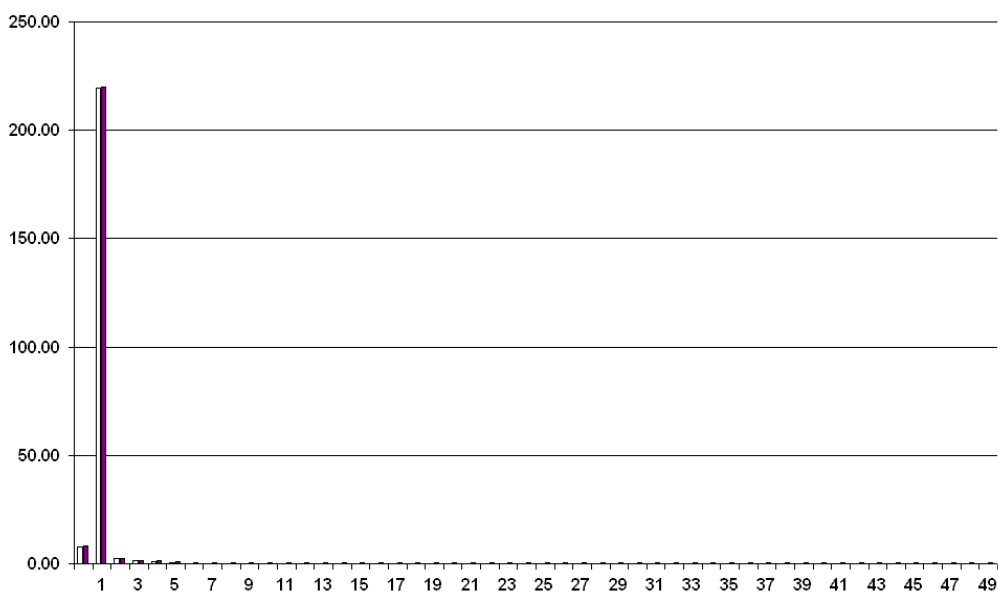
Слика 4: Средње вредности ефективних вредности хармоника синусног напона ефективне вредности 220,0V

Опсег измерених ефективних вредности амплитуда за све хармонике дат је у табели 5 и на слици 5.

Ред харм.	0	1	2	3	4
Мин. еф. вр.	7,70V	219,66V	2,21V	1,29V	0,98V
Мах. еф. вр.	8,27V	220,02V	2,62V	1,68V	1,34V
Ред харм.	5	6	7	8	9
Мин. еф. вр.	0,49V	0,14V	0,19V	0,14V	0,00V
Мах. еф. вр.	0,91V	0,56V	0,69V	0,49V	0,30V
Ред харм.	10	11	12	13	14
Мин. еф. вр.	0,00V	0,00V	0,00V	0,00V	0,00V
Мах. еф. вр.	0,30V	0,30V	0,30V	0,30V	0,30V
Ред харм.	15	16	17	18	19
Мин. еф. вр.	0,00V	0,00V	0,00V	0,00V	0,00V
Мах. еф. вр.	0,30V	0,30V	0,49V	0,30V	0,30V
Ред харм.	20	21	22	23	24
Мин. еф. вр.	0,00V	0,00V	0,00V	0,00V	0,00V
Мах. еф. вр.	0,30V	0,38V	0,27V	0,30V	0,30V
Ред харм.	25	26	27	28	29
Мин. еф. вр.	0,00V	0,00V	0,00V	0,00V	0,00V

Мах. еф. вр.	0,30V	0,30V	0,30V	0,38V	0,30V
Ред харм.	30	31	32	33	34
Мин. еф. вр.	0,00V	0,00V	0,00V	0,00V	0,00V
Мах. еф. вр.	0,30V	0,38V	0,30V	0,30V	0,30V
Ред харм.	35	36	37	38	39
Мин. еф. вр.	0,00V	0,00V	0,00V	0,00V	0,00V
Мах. еф. вр.	0,38V	0,30V	0,30V	0,30V	0,30V
Ред харм.	40	41	42	43	44
Мин. еф. вр.	0,00V	0,00V	0,00V	0,00V	0,00V
Мах. еф. вр.	0,30V	0,38V	0,30V	0,30V	0,30V
Ред харм.	45	46	47	48	49
Мин. еф. вр.	0,00V	0,00V	0,00V	0,00V	0,00V
Мах. еф. вр.	0,30V	0,30V	0,30V	0,30V	0,38V

Табела 5: Опсег измерених ефективних вредности хармоника синусног сигнала од 220,0V



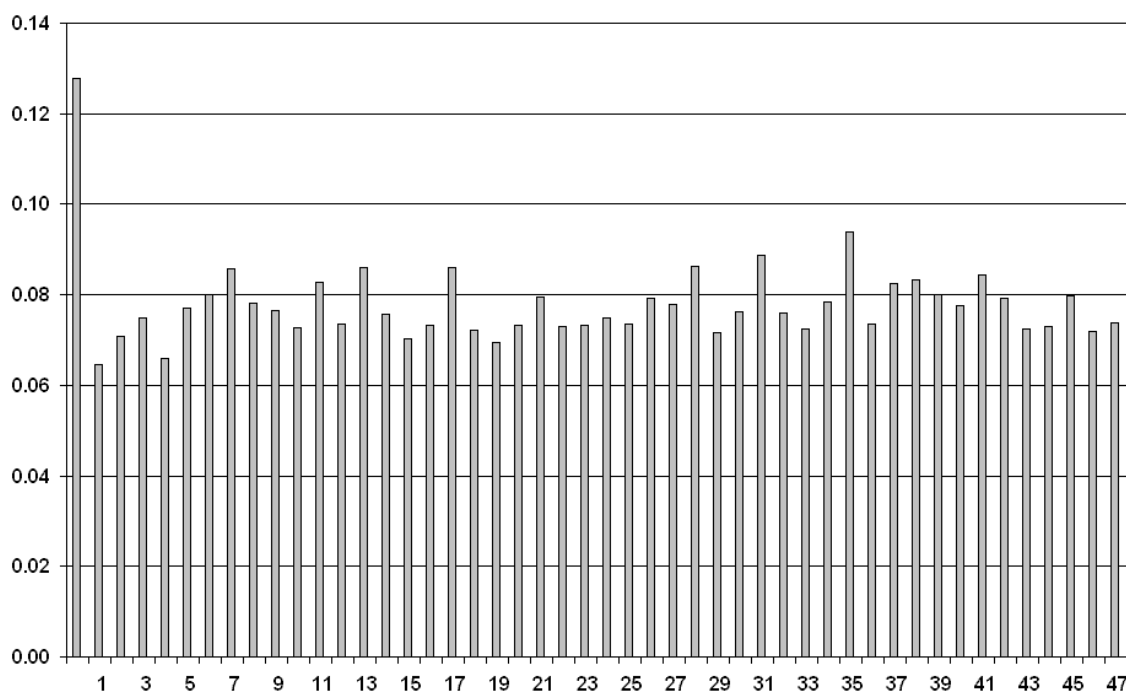
Слика 5: Опсег измерених ефективних вредности амплитуда хармоника синусног сигнала од 220,0V

Стандардна девијација мерења ефективних вредности хармоника за синусни сигнал ефективне вредности 220,0V дата је у табели 6 и на слици 6.

Ред харм.	0	1	2	3	4
Ст. деви.	0,13V	0,06V	0,07V	0,07V	0,07V
Ред харм.	5	6	7	8	9
Ст. деви.	0,08V	0,08V	0,09V	0,08V	0,08V
Ред харм.	10	11	12	13	14
Ст. деви.	0,07V	0,08V	0,07V	0,09V	0,08V

Ред харм.	15	16	17	18	19
Ст. деви.	0,07V	0,07V	0,09V	0,07V	0,07V
Ред харм.	20	21	22	23	24
Ст. деви.	0,07V	0,08V	0,07V	0,07V	0,07V
Ред харм.	25	26	27	28	29
Ст. деви.	0,07V	0,08V	0,08V	0,09V	0,07V
Ред харм.	30	31	32	33	34
Ст. деви.	0,08V	0,09V	0,08V	0,07V	0,08V
Ред харм.	35	36	37	38	39
Ст. деви.	0,09V	0,07V	0,08V	0,08V	0,08V
Ред харм.	40	41	42	43	44
Ст. деви.	0,08V	0,08V	0,08V	0,07V	0,07V
Ред харм.	45	46	47	48	49
Ст. деви.	0,08V	0,07V	0,07V	0,07V	0,09V

Табела 6: **Стандардна девијација мерења ефективних вредности**
хармоника синусног сигнала од 220,0V



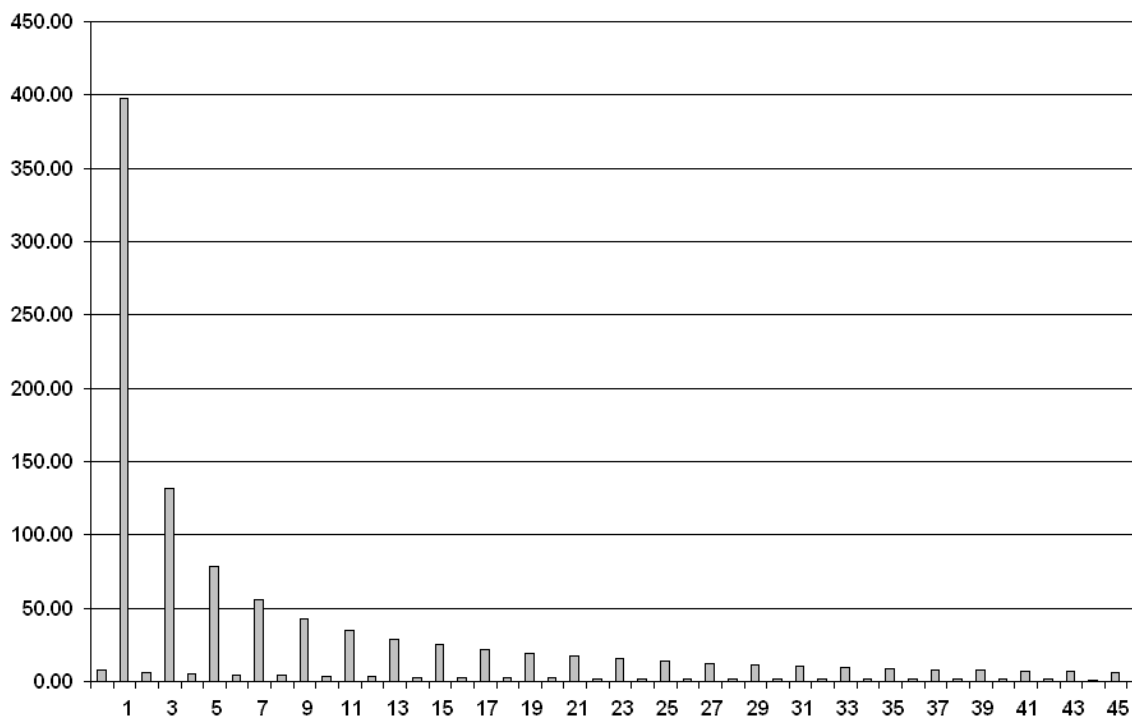
Слика 6: **Стандардна девијација мерења ефективних вредности**
хармоника синусног сигнала од 220,0V

Средње вредности амплитуда хармоника четвртасог напона ефективне вредности 310,1V дате су у табели 7, односно на слици 7.

Ред харм.	0	1	2	3	4
Ср. вр. ампл.	7,57V	397,91V	5,68V	132,06V	5,31V
Ред харм.	5	6	7	8	9
Ср. вр. ампл.	78,67V	4,77V	55,67V	4,27V	42,88V
Ред харм.	10	11	12	13	14

Ср. вр. ампл.	3,79V	34,74V	3,34V	29,11V	2,96V
Ред харм.	15	16	17	18	19
Ср. вр. ампл.	24,97V	2,65V	21,76V	2,41V	19,19V
Ред харм.	20	21	22	23	24
Ср. вр. ампл.	2,22V	17,08V	2,06V	15,28V	1,90V
Ред харм.	25	26	27	28	29
Ср. вр. ампл.	13,77V	1,79V	12,50V	1,70V	11,40V
Ред харм.	30	31	32	33	34
Ср. вр. ампл.	1,64V	10,44V	1,60V	9,62V	1,55V
Ред харм.	35	36	37	38	39
Ср. вр. ампл.	8,87V	1,49V	8,22V	1,45V	7,65V
Ред харм.	40	41	42	43	44
Ср. вр. ампл.	1,40V	7,15V	1,33V	6,70V	1,31V
Ред харм.	45	46	47	48	49
Ср. вр. ампл.	6,26V	1,26V	5,86V	1,22V	5,51V

Табела 7: Средње вредности амплитуда хармоника четвртасог напона ефективне вредности 310,1V



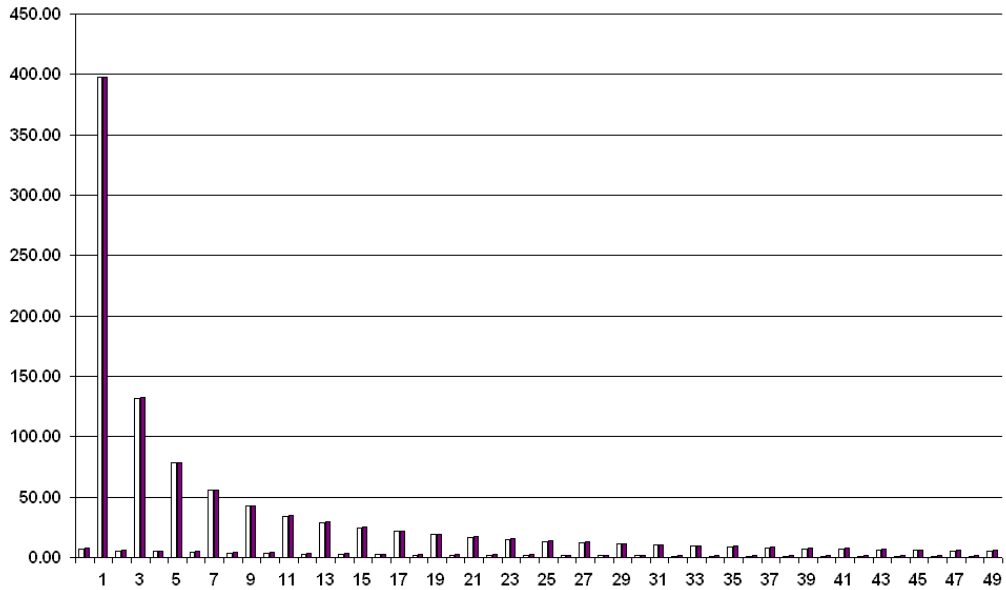
Слика 7: Средње вредности амплитуда хармоника четвртасог напона ефективне вредности 310,1V

Опсег измерених вредности амплитуда за све хармонике четвртасог напона ефективне вредности 310,1V дат је у табели 8 и на слици 8.

Ред харм.	0	1	2	3	4
Мин.	7,31V	397,64V	5,43V	131,83V	5,09V
Мах.	7,69V	398,10V	5,94V	132,30V	5,54V
Ред харм.	5	6	7	8	9
Мин.	78,32V	4,50V	55,42V	3,87V	42,57V
Мах.	78,90V	5,13V	55,87V	4,62V	43,13V
Ред харм.	10	11	12	13	14
Мин.	3,40V	34,41V	3,04V	28,78V	2,62V
Мах.	4,13V	35,03V	3,65V	29,44V	3,27V
Ред харм.	15	16	17	18	19
Мин.	24,61V	2,35V	21,41V	2,12V	18,90V
Мах.	25,27V	3,04V	22,05V	2,73V	19,50V
Ред харм.	20	21	22	23	24
Мин.	1,90V	16,79V	1,77V	14,96V	1,55V
Мах.	2,51V	17,38V	2,32V	15,60V	2,19V
Ред харм.	25	26	27	28	29
Мин.	13,46V	1,50V	12,18V	1,36V	11,08V
Мах.	14,05V	2,08V	12,81V	2,01V	11,70V
Ред харм.	30	31	32	33	34
Мин.	1,36V	10,12V	1,29V	9,31V	1,17V
Мах.	1,93V	10,81V	1,89V	9,93V	1,82V
Ред харм.	35	36	37	38	39
Мин.	8,53V	1,17V	7,93V	1,12V	7,31V
Мах.	9,21V	1,77V	8,51V	1,74V	7,91V
Ред харм.	40	41	42	43	44
Мин.	0,96V	6,83V	1,04V	6,36V	1,04V
Мах.	1,73V	7,48V	1,59V	6,97V	1,59V
Ред харм.	45	46	47	48	49
Мин.	6,02V	0,96V	5,60V	0,96V	5,22V
Мах.	6,54V	1,55V	6,20V	1,46V	5,77V

Табела 8: Опсег измерених вредности амплитуда за све хармонике

четвртастог напона ефективне вредности 310,1V

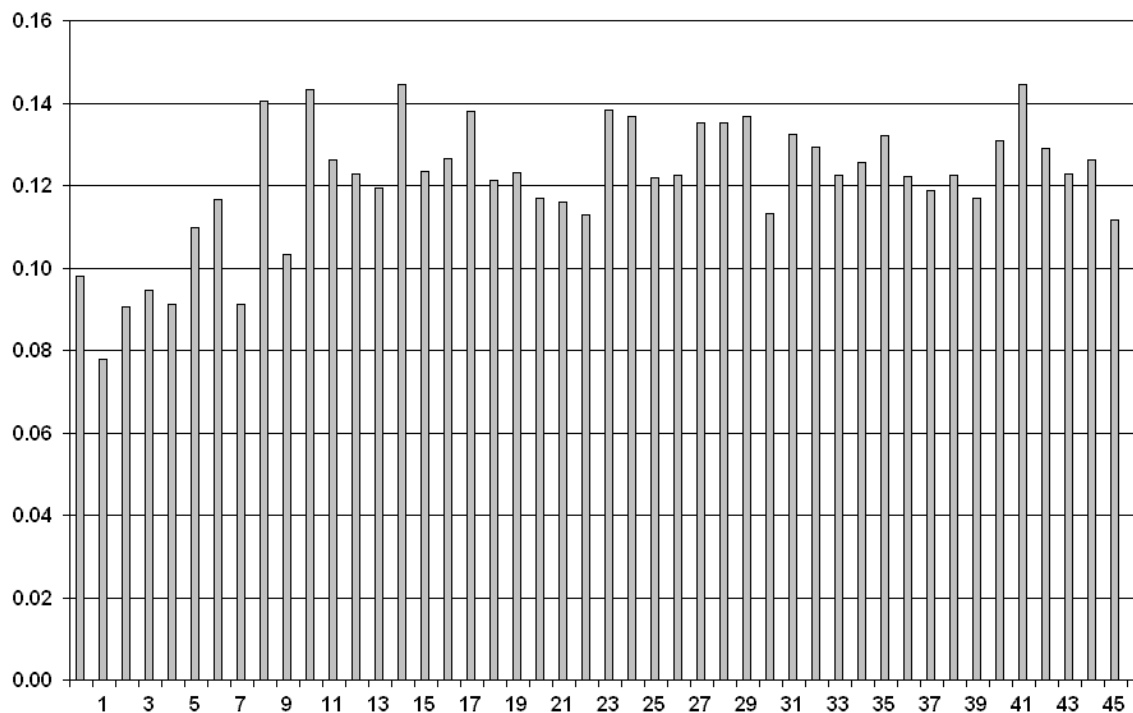


Слика 8: Опсег измерених вредности амплитуда за све хармонике четвртастог напона ефективне вредности 310,1V

Стандардна девијација мерења за све хармонике четвртастог напона ефективне вредности 310,1V дата је у табели 9 и на слици 9.

Ред харм.	0	1	2	3	4
Ст. деви.	0,10V	0,08V	0,09V	0,09V	0,09V
Ред харм.	5	6	7	8	9
Ст. деви.	0,11V	0,12V	0,09V	0,14V	0,10V
Ред харм.	10	11	12	13	14
Ст. деви.	0,14V	0,13V	0,12V	0,12V	0,14V
Ред харм.	15	16	17	18	19
Ст. деви.	0,12V	0,13V	0,14V	0,12V	0,12V
Ред харм.	20	21	22	23	24
Ст. деви.	0,12V	0,12V	0,11V	0,14V	0,14V
Ред харм.	25	26	27	28	29
Ст. деви.	0,12V	0,12V	0,14V	0,14V	0,14V
Ред харм.	30	31	32	33	34
Ст. деви.	0,11V	0,13V	0,13V	0,12V	0,13V
Ред харм.	35	36	37	38	39
Ст. деви.	0,13V	0,12V	0,12V	0,12V	0,12V
Ред харм.	40	41	42	43	44
Ст. деви.	0,13V	0,14V	0,13V	0,12V	0,13V
Ред харм.	45	46	47	48	49
Ст. деви.	0,11V	0,13V	0,12V	0,12V	0,13V

Табела 9: Стандардна девијација мерења за све хармонике четвртастог напона ефективне вредности 310,1V



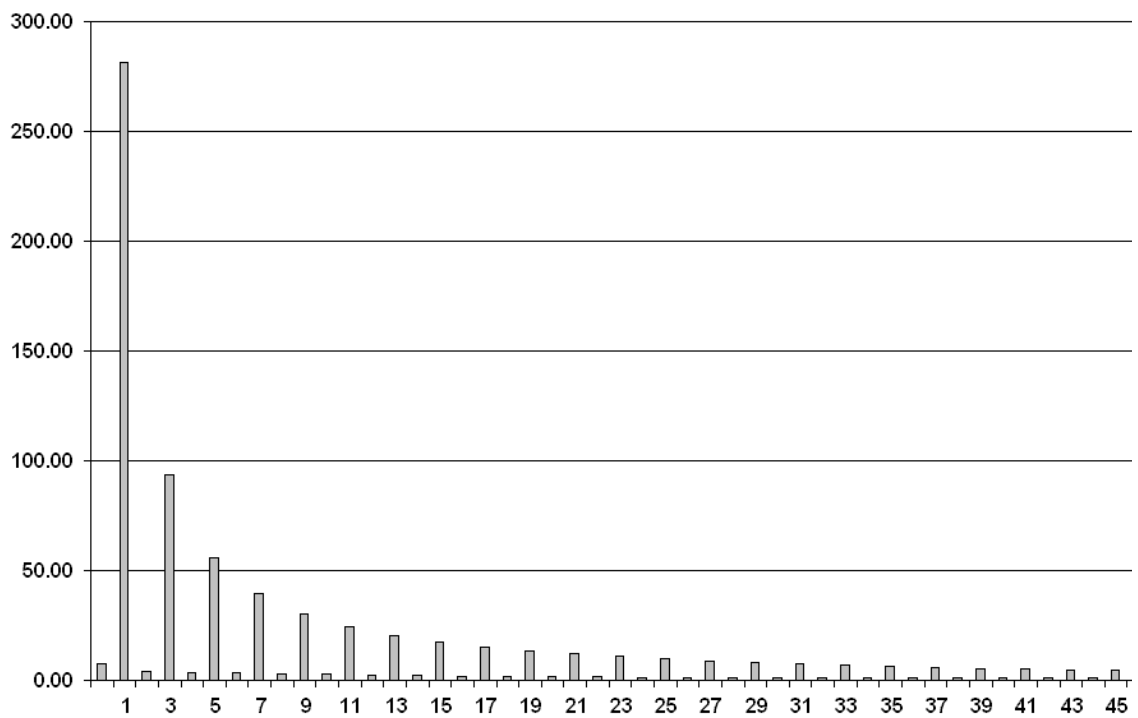
Слика 9: Стандардна девијација мерења за све хармонике четвртастог напона ефективне вредности 310,1V

Средње вредности ефективних вредности за све хармонике четвртастог напона ефективне вредности 310,1V дате су у табели 10 и на слици 10.

Ред харм.	0	1	2	3	4
Ср. вр. еф. вр.	7,57V	281,36V	4,02V	93,38V	3,75V
Ред харм.	5	6	7	8	9
Ср. вр. еф. вр.	55,63V	3,37V	39,37V	3,02V	30,32V
Ред харм.	10	11	12	13	14
Ср. вр. еф. вр.	2,68V	24,56V	2,36V	20,58V	2,09V
Ред харм.	15	16	17	18	19
Ср. вр. еф. вр.	17,65V	1,87V	15,39V	1,70V	13,57V
Ред харм.	20	21	22	23	24
Ср. вр. еф. вр.	1,57V	12,07V	1,46V	10,81V	1,34V
Ред харм.	25	26	27	28	29
Ср. вр. еф. вр.	9,74V	1,27V	8,84V	1,20V	8,06V
Ред харм.	30	31	32	33	34
Ср. вр. еф. вр.	1,16V	7,38V	1,13V	6,80V	1,10V
Ред харм.	35	36	37	38	39
Ср. вр. еф. вр.	6,28V	1,05V	5,81V	1,02V	5,41V
Ред харм.	40	41	42	43	44
Ср. вр. еф. вр.	0,99V	5,05V	0,94V	4,74V	0,92V
Ред харм.	45	46	47	48	49
Ср. вр. еф. вр.	4,43V	0,89V	4,14V	0,86	3,89V

Табела 10: Средње вредности ефективних вредности за све хармонике

четвртасог напона ефективне вредности 310,1V

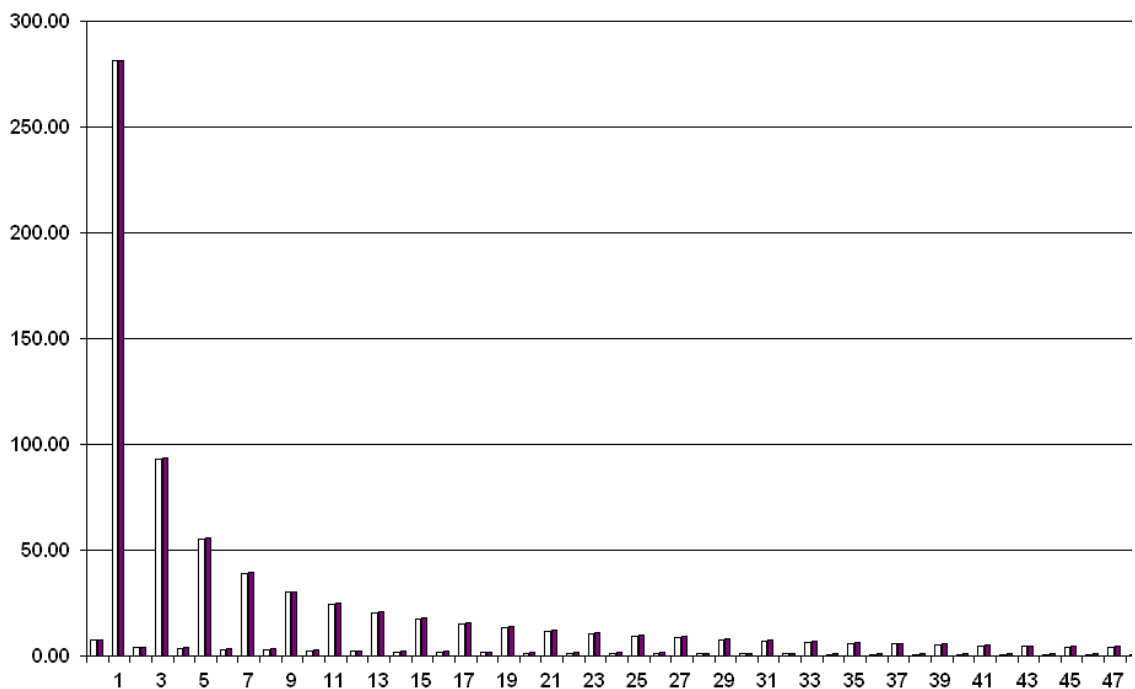


Слика 10: Средње вредности ефективних вредности за све хармонике четвртасог напона ефективне вредности 310,1V

Опсег измерених ефективних вредности амплитуда за све хармонике дат је у табели 11 и на слици 11.

Ред харм.	0	1	2	3	4
Мин. ефф. вр.	7,31V	281,17V	3,84V	93,22V	3,60V
Мах. ефф. вр.	7,69V	281,50V	4,20V	93,55V	3,91V
Ред харм.	5	6	7	8	9
Мин. ефф. вр.	55,38V	3,18V	39,18V	2,74V	30,10V
Мах. ефф. вр.	55,79V	3,63V	39,51V	3,27V	30,50V
Ред харм.	10	11	12	13	14
Мин. ефф. вр.	2,41V	24,33V	2,15V	20,35V	1,85V
Мах. ефф. вр.	2,92V	24,77V	2,58V	20,82V	2,32V
Ред харм.	15	16	17	18	19
Мин. ефф. вр.	17,40V	1,66V	15,14V	1,50V	13,37V
Мах. ефф. вр.	17,87V	2,15V	15,59V	1,93V	13,79V
Ред харм.	20	21	22	23	24
Мин. ефф. вр.	1,35V	11,87V	1,25V	10,58V	1,10V
Мах. ефф. вр.	1,77V	12,29V	1,64V	11,03V	1,55V
Ред харм.	25	26	27	28	29
Мин. ефф. вр.	9,52V	1,06V	8,61V	0,96V	7,83V
Мах. ефф. вр.	9,93V	1,47V	9,05V	1,42V	8,28V
Ред харм.	30	31	32	33	34
Мин. ефф. вр.	0,96V	7,16V	0,91V	6,58V	0,83V
Мах. ефф. вр.	1,37V	7,64V	1,34V	7,02V	1,29V
Ред харм.	35	36	37	38	39
Мин. ефф. вр.	6,03V	0,83V	5,61V	0,79V	5,17V
Мах. ефф. вр.	6,52V	1,25V	6,02V	1,23V	5,59V
Ред харм.	40	41	42	43	44
Мин. ефф. вр.	0,68V	4,83V	0,73V	4,49V	0,73V
Мах. ефф. вр.	1,22V	5,29V	1,12V	4,93V	1,12V
Ред харм.	45	46	47	48	49
Мин. ефф. вр.	4,26V	0,68V	3,96V	0,68V	3,69V
Мах. ефф. вр.	4,62V	1,10V	4,38V	1,04V	4,08V

Табела 11: Опсег измерених ефективних вредности хармоника четвртасог напона ефективне вредности 310,1V

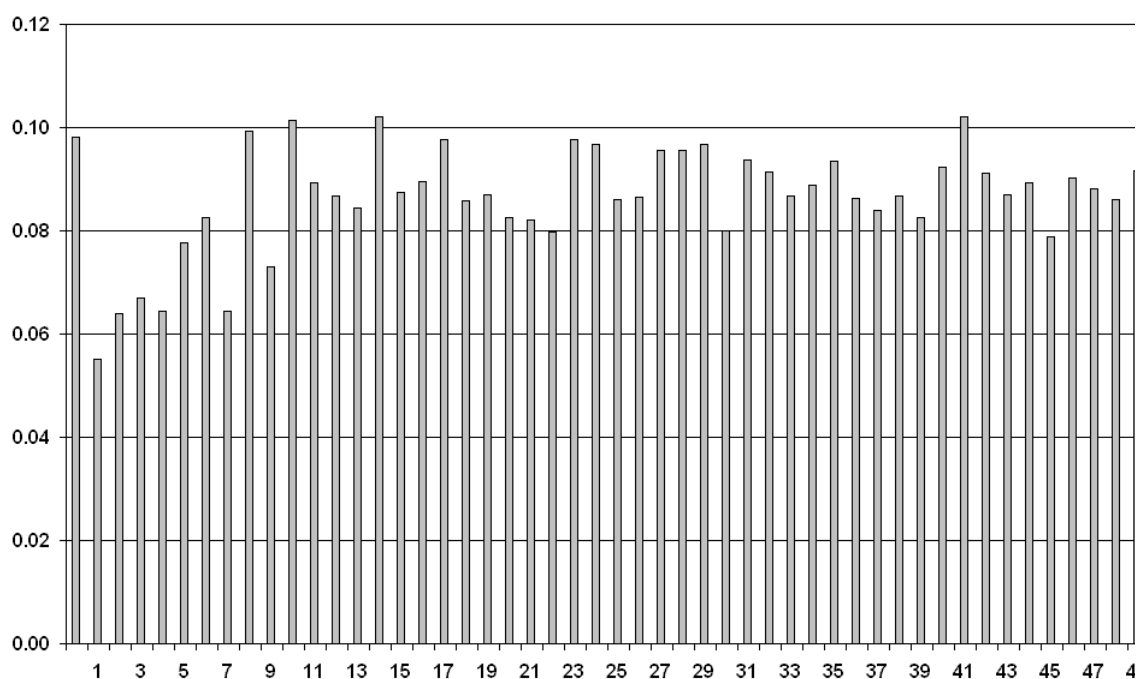


Слика 11: Опсег измерених ефективних вредности хармоника четвртасог напона ефективне вредности 310,1V

Стандардне девијације измерених ефективних вредности амплитуда за све хармонике четвртасог напона ефективне вредности 310,1V дате су у табели 12 и на слици 12.

Ред харм.	0	1	2	3	4
Ст. деви.	0,10V	0,06V	0,06V	0,07V	0,06V
Ред харм.	5	6	7	8	9
Ст. деви.	0,08V	0,08V	0,06V	0,10V	0,07V
Ред харм.	10	11	12	13	14
Ст. деви.	0,10V	0,09V	0,09V	0,08V	0,10V
Ред харм.	15	16	17	18	19
Ст. деви.	0,09V	0,09V	0,10V	0,09V	0,09V
Ред харм.	20	21	22	23	24
Ст. деви.	0,08V	0,08V	0,08V	0,10V	0,10V
Ред харм.	25	26	27	28	29
Ст. деви.	0,09V	0,09V	0,10V	0,10V	0,10V
Ред харм.	30	31	32	33	34
Ст. деви.	0,08V	0,09V	0,09V	0,09V	0,09V
Ред харм.	35	36	37	38	39
Ст. деви.	0,09V	0,09V	0,08V	0,09V	0,08V
Ред харм.	40	41	42	43	44
Ст. деви.	0,09V	0,10V	0,09V	0,09V	0,09V
Ред харм.	45	46	47	48	49
Ст. деви.	0,08V	0,09V	0,09V	0,09V	0,09V

Табела 12: Стандардне девијације измерених ефективних вредности амплитуда за све хармонике четвртасог напона ефективне вредности 310,1V

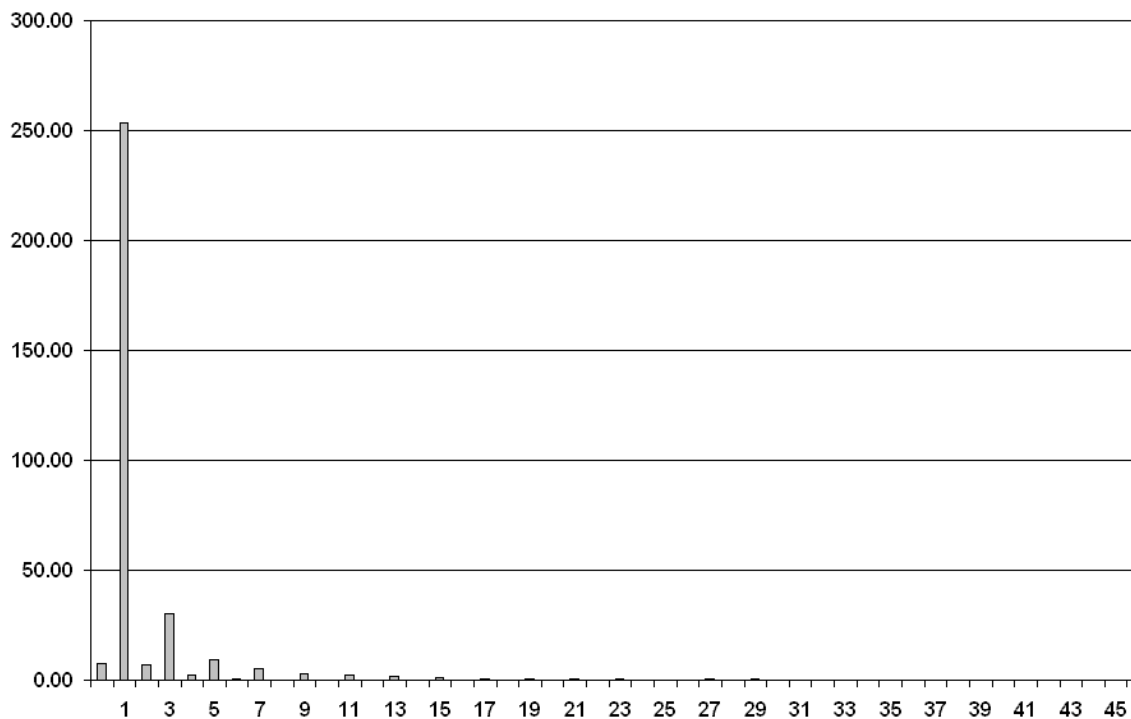


Слика 12: **Стандардне девијације** измерених ефективних вредности амплитуда за све хармонике четвртасог напона ефективне вредности 310,1V

Средње вредности амплитуда хармоника троугластог напона ефективне вредности 180,9V дате су у табели 13 и на слици 13.

Ред харм.	0	1	2	3	4
Ср. вр. ампл.	7,66V	253,46V	6,95V	30,02V	2,49V
Ред харм.	5	6	7	8	9
Ср. вр. ампл.	9,40V	0,53V	5,20V	0,18V	3,11V
Ред харм.	10	11	12	13	14
Ср. вр. ампл.	0,17V	2,10V	0,19V	1,53V	0,16V
Ред харм.	15	16	17	18	19
Ср. вр. ампл.	1,11V	0,16V	0,75V	0,17V	0,66V
Ред харм.	20	21	22	23	24
Ср. вр. ампл.	0,17V	0,56V	0,21V	0,42V	0,17V
Ред харм.	25	26	27	28	29
Ср. вр. ампл.	0,28V	0,22V	0,31V	0,18V	0,30V
Ред харм.	30	31	32	33	34
Ср. вр. ампл.	0,16V	0,18V	0,17V	0,27V	0,17V
Ред харм.	35	36	37	38	39
Ср. вр. ампл.	0,23V	0,17V	0,23V	0,15V	0,18V
Ред харм.	40	41	42	43	44
Ср. вр. ампл.	0,16V	0,21V	0,17V	0,16V	0,16V
Ред харм.	45	46	47	48	49
Ср. вр. ампл.	0,19V	0,18V	0,21V	0,19V	0,22V

Табела 13: Средње вредности амплитуда хармоника троугластог напона ефективне вредности 180,9V

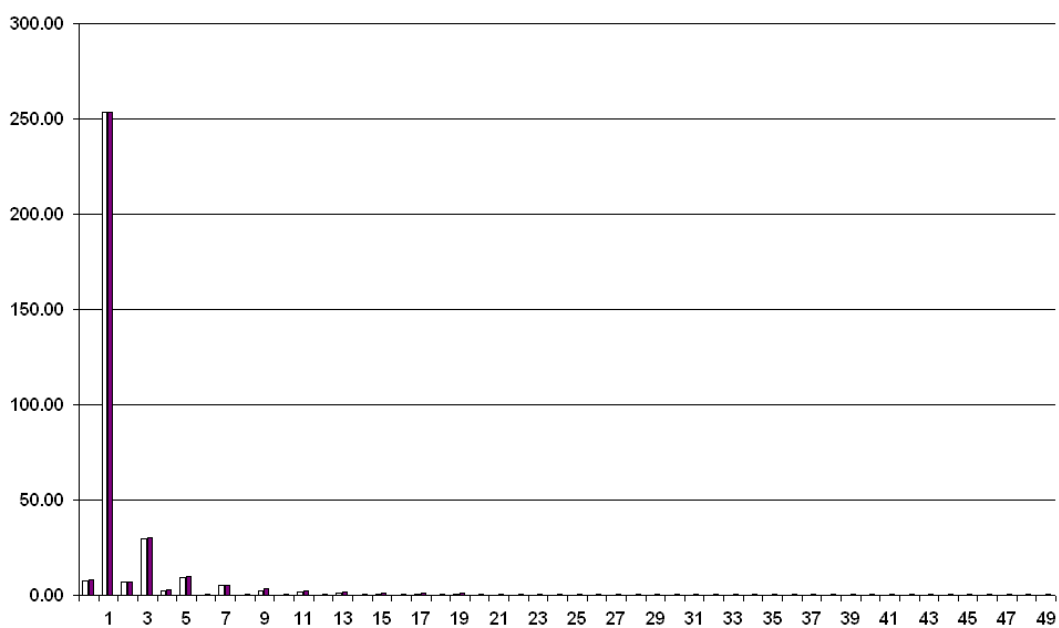


Слика 13: Средње вредности амплитуда хармоника троугластог напона ефективне вредности 180,9V

Опсежи вредности амплитуда хармоника троугластог напона ефективне вредности 180,9V дате су у табели 14 и на слици 14.

Ред харм.	0	1	2	3	4
Мин.	7,31V	253,27V	6,76V	29,73V	2,32V
Мах.	8,08V	253,68V	7,16V	30,27V	2,80V
Ред харм.	5	6	7	8	9
Мин.	9,12V	0,19V	4,99V	0,00V	2,59V
Мах.	9,66V	0,86V	5,45V	0,43V	3,47V
Ред харм.	10	11	12	13	14
Мин.	0,00V	1,72V	0,00V	1,23V	0,00V
Мах.	0,43V	2,38V	0,43V	1,82V	0,38V
Ред харм.	15	16	17	18	19
Мин.	0,77V	0,00V	0,38V	0,00V	0,43V
Мах.	1,36V	0,43V	1,12V	0,43V	1,04V
Ред харм.	20	21	22	23	24
Мин.	0,00V	0,27V	0,00V	0,19V	0,00V
Мах.	0,43V	0,86V	0,61V	0,69V	0,38V
Ред харм.	25	26	27	28	29
Мин.	0,00V	0,00V	0,00V	0,00V	0,00V
Мах.	0,61V	0,43V	0,61V	0,43V	0,58V
Ред харм.	30	31	32	33	34
Мин.	0,00V	0,00V	0,00V	0,00V	0,00V
Мах.	0,43V	0,54V	0,43V	0,61V	0,38V
Ред харм.	35	36	37	38	39
Мин.	0,00V	0,00V	0,00V	0,00V	0,00V
Мах.	0,54V	0,43V	0,43V	0,38V	0,43V
Ред харм.	40	41	42	43	44
Мин.	0,00V	0,00V	0,00V	0,00V	0,00V
Мах.	0,43V	0,54V	0,43V	0,43V	0,38V
Ред харм.	45	46	47	48	49
Мин.	0,00V	0,00V	0,00V	0,00V	0,00V
Мах.	0,43V	0,43V	0,54V	0,61V	0,54V

Табела 14: Опсези вредности амплитуда хармоника
 троугластог напона ефективне вредности 180,9V

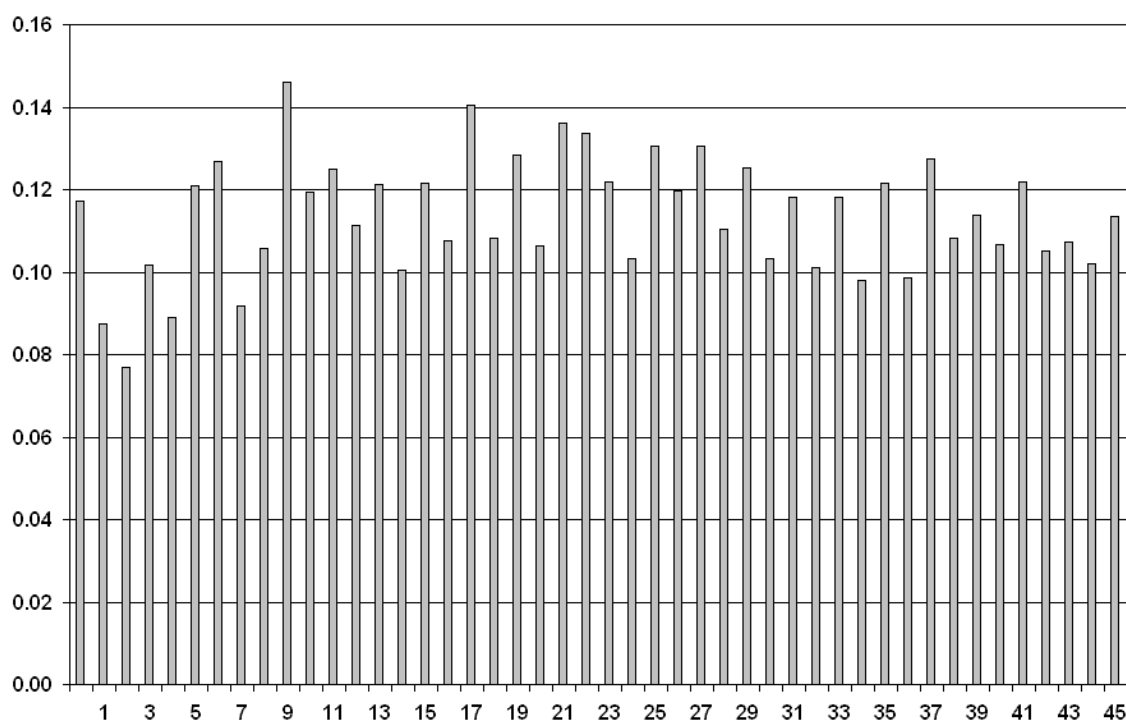


Слика 14: Опсеги вредности амплитуда хармоника троугластог напона ефективне вредности 180,9V

Стандардне девијације измерених амплитуда хармоника троугластог напона ефективне вредности 180,9V дате су у табели 15 и на слици 15.

Ред харм.	0	1	2	3	4
Ст. деви.	0,12V	0,09V	0,08V	0,10V	0,09V
Ред харм.	5	6	7	8	9
Ст. деви.	0,12V	0,13V	0,09V	0,11V	0,15V
Ред харм.	10	11	12	13	14
Ст. деви.	0,12V	0,12V	0,11V	0,12V	0,10V
Ред харм.	15	16	17	18	19
Ст. деви.	0,12V	0,11V	0,14V	0,11V	0,13V
Ред харм.	20	21	22	23	24
Ст. деви.	0,11V	0,14V	0,13V	0,12V	0,10V
Ред харм.	25	26	27	28	29
Ст. деви.	0,13V	0,12V	0,13V	0,11V	0,13V
Ред харм.	30	31	32	33	34
Ст. деви.	0,10V	0,12V	0,10V	0,12V	0,10V
Ред харм.	35	36	37	38	39
Ст. деви.	0,12V	0,10V	0,13V	0,11V	0,11V
Ред харм.	40	41	42	43	44
Ст. деви.	0,11V	0,12V	0,11V	0,11	0,10V
Ред харм.	45	46	47	48	49
Ст. деви.	0,11V	0,11V	0,13V	0,13V	0,13V

Табела 15: Стандардне девијације измерених амплитуда хармоника троугластог напона ефективне вредности 180,9V

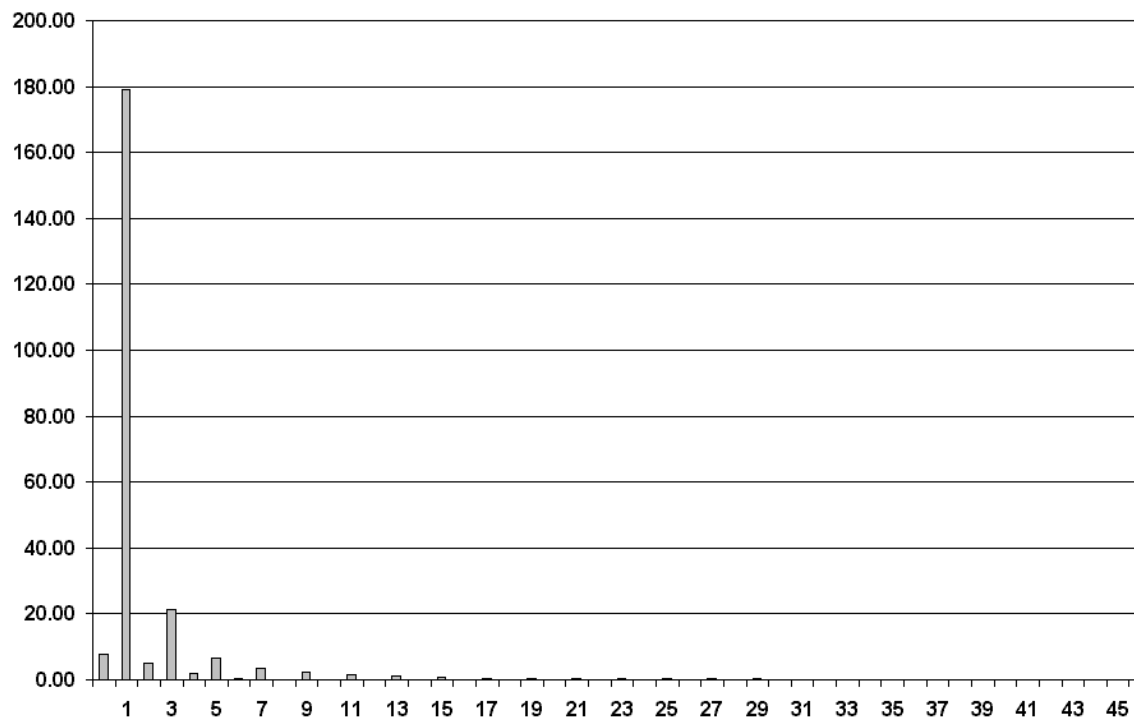


Слика 15: **Стандардне девијације** измерених амплитуда хармоника троугластог напона ефективне вредности 180,9V

Средње вредности ефективних вредности за све хармонике троугластог напона ефективне вредности 180,9V дате су у табели 16 и на слици 16.

Ред харм.	0	1	2	3	4
Ср. вр. еф. вр.	7,66V	179,22V	4,92V	21,23V	1,76V
Ред харм.	5	6	7	8	9
Ср. вр. еф. вр.	6,65V	0,38V	3,68V	0,13V	2,20V
Ред харм.	10	11	12	13	14
Ср. вр. еф. вр.	0,12V	1,48V	0,14V	1,08V	0,12V
Ред харм.	15	16	17	18	19
Ср. вр. еф. вр.	0,79V	0,11V	0,53V	0,12V	0,47V
Ред харм.	20	21	22	23	24
Ср. вр. еф. вр.	0,12V	0,40V	0,15V	0,30V	0,12V
Ред харм.	25	26	27	28	29
Ср. вр. еф. вр.	0,20V	0,15V	0,22V	0,13V	0,21V
Ред харм.	30	31	32	33	34
Ср. вр. еф. вр.	0,11V	0,13V	0,12V	0,19V	0,12V
Ред харм.	35	36	37	38	39
Ср. вр. еф. вр.	0,16V	0,12V	0,16V	0,11V	0,13V
Ред харм.	40	41	42	43	44
Ср. вр. еф. вр.	0,11V	0,15V	0,12V	0,11V	0,11V
Ред харм.	45	46	47	48	49
Ср. вр. еф. вр.	0,13V	0,13V	0,15V	0,13V	0,16V

Табела 16: Средње вредности ефективних вредности за све хармонике троугластог напона ефективне вредности 180,9V

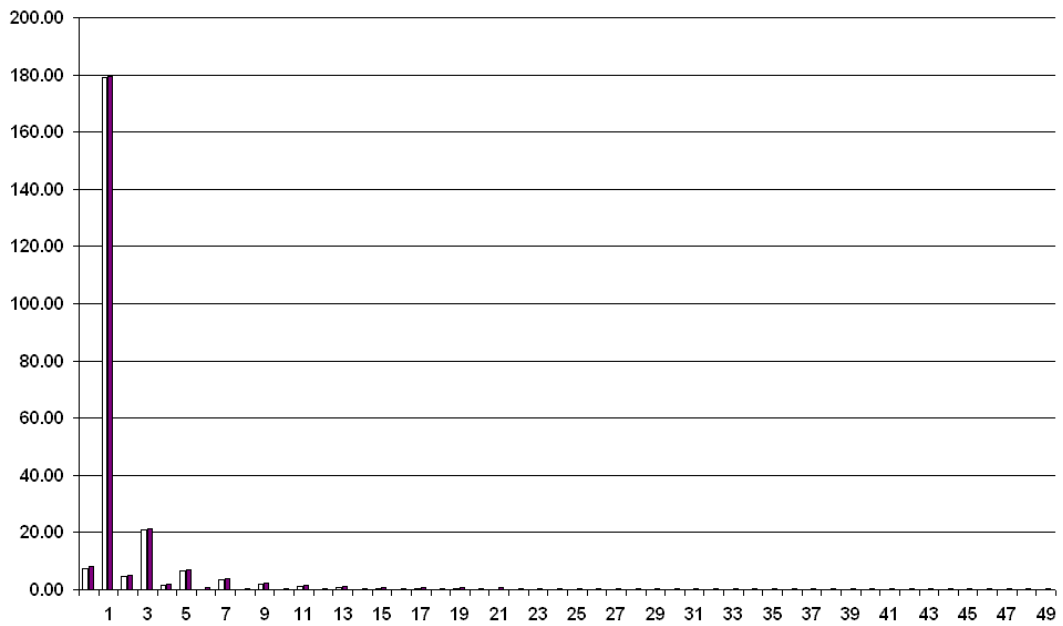


Слика 16: Средње вредности ефективних вредности за све хармонике троугластог напона ефективне вредности 180,9V

Опсежи ефективних вредности за све хармонике троугластог напона ефективне вредности 180,9V дате су у табели 17 и на слици 17.

Ред харм.	0	1	2	3	4
Мин. ефф. вр.	7,31V	179,09V	4,78V	21,02V	1,64V
Мах. ефф. вр.	8,08V	179,38V	5,06V	21,41V	1,98V
Ред харм.	5	6	7	8	9
Мин. ефф. вр.	6,45V	0,14V	3,53V	0,00V	1,83V
Мах. ефф. вр.	6,83V	0,61V	3,85V	0,30V	2,45V
Ред харм.	10	11	12	13	14
Мин. ефф. вр.	0,00V	1,22V	0,00V	0,87V	0,00V
Мах. ефф. вр.	0,30V	1,68V	0,30V	1,28V	0,27V
Ред харм.	15	16	17	18	19
Мин. ефф. вр.	0,54V	0,00V	0,27V	0,00V	0,30V
Мах. ефф. вр.	0,96V	0,30V	0,79V	0,30V	0,73V
Ред харм.	20	21	22	23	24
Мин. ефф. вр.	0,00V	0,19V	0,00V	0,14V	0,00V
Мах. ефф. вр.	0,30V	0,61V	0,43V	0,49V	0,27V
Ред харм.	25	26	27	28	29
Мин. ефф. вр.	0,00V	0,00V	0,00V	0,00V	0,00V
Мах. ефф. вр.	0,43V	0,30V	0,43V	0,30V	0,41V
Ред харм.	30	31	32	33	34
Мин. ефф. вр.	0,00V	0,00V	0,00V	0,00V	0,00V
Мах. ефф. вр.	0,30V	0,38V	0,30V	0,43V	0,27V
Ред харм.	35	36	37	38	39
Мин. ефф. вр.	0,00V	0,00V	0,00V	0,00V	0,00V
Мах. ефф. вр.	0,38V	0,30V	0,30V	0,27V	0,30V
Ред харм.	40	41	42	43	44
Мин. ефф. вр.	0,00V	0,00V	0,00V	0,00V	0,00V
Мах. ефф. вр.	0,30V	0,38V	0,30V	0,30V	0,27V
Ред харм.	45	46	47	48	49
Мин. ефф. вр.	0,00V	0,00V	0,00V	0,00V	0,00V
Мах. ефф. вр.	0,30V	0,30V	0,38V	0,43V	0,38V

Табела 17: Опсеги ефективних вредности за све хармонике
 троугластог напона ефективне вредности 180,9V

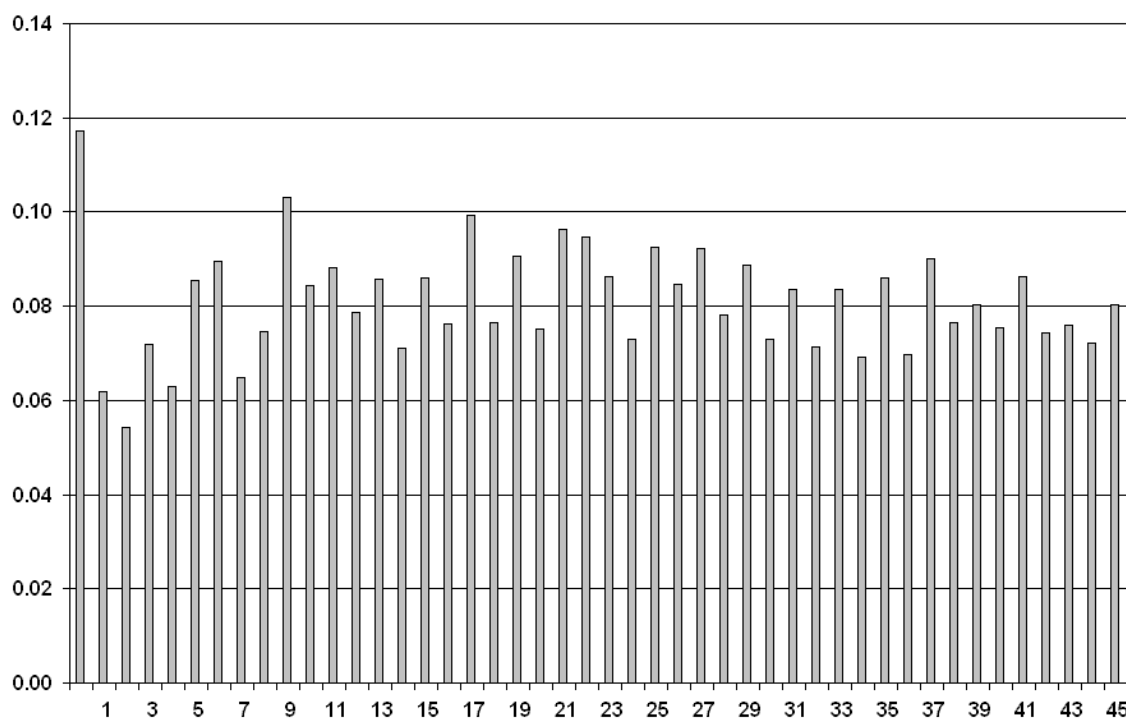


Слика 17: Опсежи ефективних вредности за све хармонике троугластог напона ефективне вредности 180,9V

Стандардне девијације ефективних вредности за све хармонике троугластог напона ефективне вредности 180,9V дате су у табели 18 и на слици 18.

Ред харм.	0	1	2	3	4
Ст. деви.	0,12V	0,06V	0,05	0,07V	0,06V
Ред харм.	5	6	7	8	9
Ст. деви.	0,09V	0,09V	0,06V	0,07V	0,10V
Ред харм.	10	11	12	13	14
Ст. деви.	0,08V	0,09V	0,08V	0,09V	0,07V
Ред харм.	15	16	17	18	19
Ст. деви.	0,09V	0,08V	0,10V	0,08V	0,09V
Ред харм.	20	21	22	23	24
Ст. деви.	0,08V	0,10V	0,09V	0,09V	0,07V
Ред харм.	25	26	27	28	29
Ст. деви.	0,09V	0,08V	0,09V	0,08V	0,09V
Ред харм.	30	31	32	33	34
Ст. деви.	0,07V	0,08V	0,07V	0,08V	0,07V
Ред харм.	35	36	37	38	39
Ст. деви.	0,09V	0,07V	0,09V	0,08V	0,08V
Ред харм.	40	41	42	43	44
Ст. деви.	0,08V	0,09V	0,07V	0,08V	0,07V
Ред харм.	45	46	47	48	49
Ст. деви.	0,08V	0,08V	0,09V	0,09V	0,09V

Табела 18: Стандардне девијације ефективних вредности за све хармонике троугластог напона ефективне вредности 180,9V



Слика 18 : Стандардне девијације ефективних вредности за све хармонике троугластог напона ефективне вредности 180,9V

Индустријски прототип Инструмент – подсистем за паралелно мерење фактора изобличења развијен је на Факултету техничких наука у Новом Саду, у оквиру текућег пројекта бр. ТР-32019 код Министарства за науку и технолошки развој.

Штампано – Децембар 2012.