

## ЛАБОРАТОРИЈСКА ВЕЖБА V

### ЕЛЕКТРИЧНИ ЛУК И ЊЕГОВЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ

#### 1. О ЕЛЕКТРИЧНОМ ЛУКУ

Уређено кретање електрона и јона у вакууму, или некој гасовитој средини, под утицајем електричног поља, назива се електрични лук. У затвореном простору који обухвата ове електроне и јоне обавља се електрични рад, снагом која је одређена изразом

$$P = \iiint_V E J dv, \quad (V.1)$$

где су:

$V$  - запремина простора,

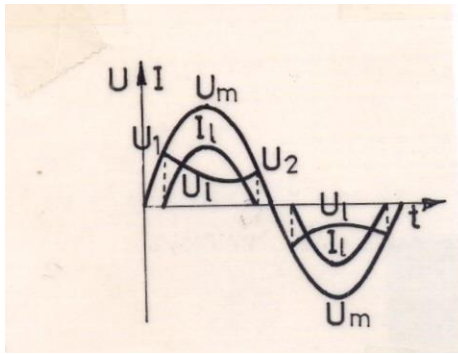
$E$  - јачина електричног поља и

$J$  - густина електронске и јонске струје. Она је дефинисана изразом  $J = \rho v$ , где је  $\rho$  запреминска густина слободних наелектрисања, а  $v$  средња вредност брзине усмереног кретања.

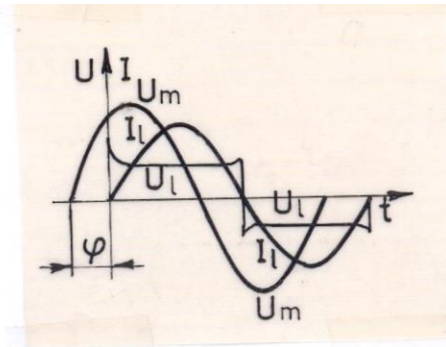
Овим радом, енергија електричног извора се претвара у унутрашњу енергију у простору запремине  $V$ , који представља термодинамички систем. Ова унутрашња енергија се на крају процеса предаје предмету топлотне обраде и у њему изазива пораст температуре, па се на такав начин формира "електролучни извор топлоте". Он се често користи као извор топлоте код електротермичких уређаја и пећи.

Са становишта електротермије, пре свега су од интереса макроскопски ефекти електричног лука, због тога ће у даљем тексту бити речи о њима, док се микропојаве у луку неће изучавати.

Посматрајмо електрични лук, одређене ефективне вредности јачине струје, који се напаја простопериодичним напоном ( $U_m$ ). Ако се електрични лук налази у колу чији је индуктивни отпор занемарљив у односу на омски, таласни облици струје и напона лука квалитативно имају таласне облике приказане на слици V. 1. Ако коло у коме се налази електрични лук садржи довољно велику индуктивност, таласни облици струје ( $U_1$ ) и напона лука ( $U_1$ ) квалитативно имају таласне облике приказане на слици V.2. Дакле, таласни облик струје и напона лука, односно карактеристике лука, зависе и од извора, односно мреже, из које се он напаја.

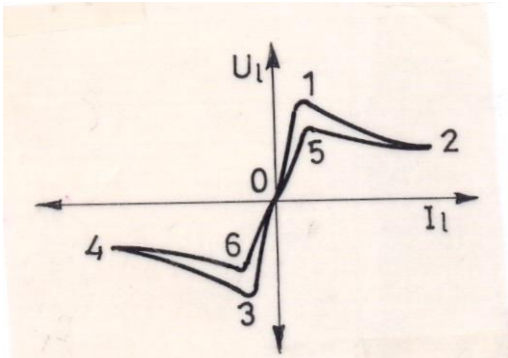


Слика V.1

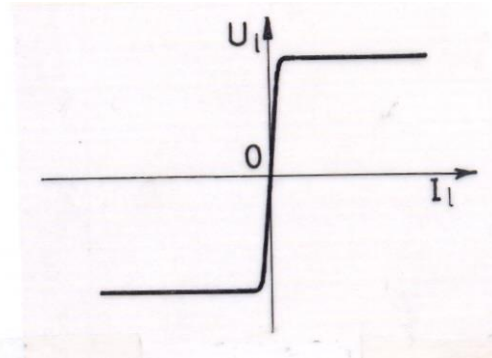


Слика V.2

Осим карактеристика електричне мреже из које се напаја лук, таласни облици напона и струје лука зависе од његове снаге, као и облика и растојања између електрода. Што је снага већа, већа је температура, па се успоставља стабилније тоplotно стање и концентрација слободних наелектрисања, односно они се мање мењају у току електричне простопериодичне периоде. На слици V.3 су квалитативно приказане динамичке карактеристике електричног лука наизменичне струје, за а) лук мале снаге, б) лук велике снаге. Карактеристике на слици V.3 представљају промену напона лука у функцији струје, при простопериодичном напону напајања. Делови кривих, за лук мале снаге, 0-1-2 и 0-3-4 одговарају делу циклуса у коме расте апсолутна вредност напона, док делови кривих 2-5-0 и 4-6-0 одговарају делу циклуса у коме опада апсолутна вредност напона. При великим струјама и ужареним електродама, када се термичко стање стуба лука практично не мења са смањењем струје, изглед динамичке карактеристике је дат на слици V.3б. Уочава се исправљање дела карактеристике 1-2 (односно 3-4) и приближавање делова  $i$  - и карактеристике лука при смањењу и повећању напона, тако да ишчезава хистерезис и долази практично до поклапања ових делова.



Слика V.3a



Слика V.3б

Напонско-струјна карактеристика  $u_l = f(i_l)$  описује електрични лук као један нелинеарни део кола. Осим нелинеарности, тешкоћу у анализи кола која садрже електрични лук представља и променљивост ове карактеристике са особинама мреже из које се лук напаја и променљивост са ефективном вредности струје и дужине лука, односно снаге.

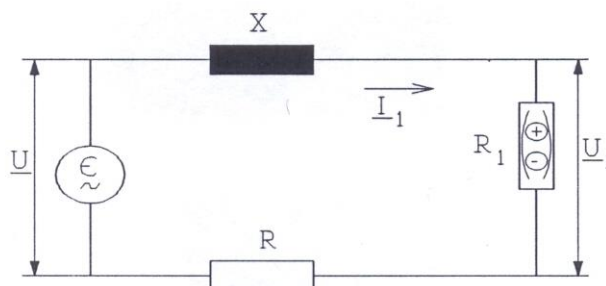
Проблем нелинеарности, односно генерисања великих вредности виших хармоника струје, је значајан код електролучних пећи. Без обзира на спрегу пећног трансформатора, у мрежи се јављају сви хармоници струје (укључујући и парне, и дељиве са три). То је последица несиметрије електричних веза и несиметрије оптерећења - три лука, која се формирају између три фазе и шарже; свака од три електроде има свој регулациони систем, због чега тренутно оптерећење по фазама најчешће није исто. Као пример, у табlici V. 1 се дају приближне релативне вредности виших хармоника струје (у односу на основни), за пећи за топљење великих снага. Ови подаци су преузети из литературе [43] и важе за пећи напајане наизменичним напонем, директно из електроенергетског система (трофазни наизменични напон). Значајан удео на тржишту заузимају електролучне пећи за једносмерни напон [41, 42], Оне имају бројне технолошке предности у односу на пећи за наизменични напон. И код пећи за једносмерни напон, у току њиховог рада, у електроенергетском систему се јављају виши хармоници струје, при чему је њихова природа другачија. Они се јављају пре свега због трофазног исправљачког моста, који, без обзира на оптерећење, из мреже "узима" сложенопериодичну струју, односно ствара више хармонике. Исправљачки мостови се праве за огромне струје; примера ради, за пећ снаге 80 MVA, праве се два шестопулсна моста за струју од 60 kA.

Таблица V.1

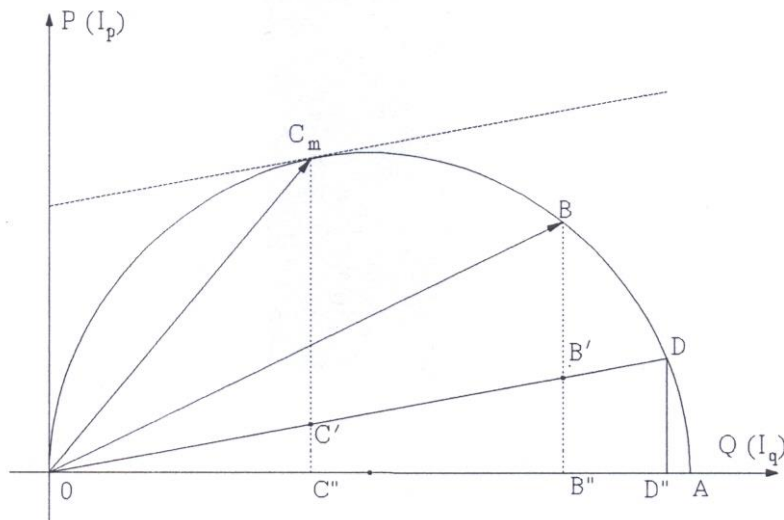
Ред хармоника струје	2	3	4	5	6	7	8	9
% у односу на први хармоник	5	20	3	10	1,5	6	1	3

Када се говори о примени електричног лука у постројењима врло великих снага, треба споменути још два феномена која се морају пажљиво изучити код прикључења пећи на електроенергетски систем. То су несиметрично оптерећивање по фазама и треперење напона (такозвани фликери), [44, 45, 46, 53].

Са становишта ефикасног коришћења електричног лука као "електролучног извора топлоте", потребно је познавати и зависност корисне снаге од струје електричног лука (њене ефективне вредности). На основу ње се могу подесити оптимални услови рада електричног лука. Ова зависност се добија из кружног дијаграма, који је приказан на слици V.4б, или аналитички, из еквивалентне електричне шеме, приказане на слици V.4а. Детаљно објашњење успостављања еквивалентне шеме и егзистенције кружног дијаграма, на основу шеме, је изнето у задатку 68. У случају електричног лука који се користи у вежби, отпорност  $R$  и реактанса  $X$  су параметри дела електричног кола који сачињавају водови и аутотрансформатор (занемарена је грана магнећења у његовој еквивалентној шеми). Општије, то су елементи импедансе од врхова електрода до тачке прикључка на крут напон. Они се одређују на основу података добијених мерењем у режиму кратког споја, при директно, односно преко шарже, спојеним електродама. Утицај гране магнећења (њен приказ у еквивалентној шеми и ефекат на кружни дијаграм) је приказан у задатку 68. Ако би се и она узимала у обзир, било би потребно извршити и оглед празног хода трансформатора. Електрични лук је моделован чистом отпорношћу ( $R_l$ ), која је функција растојања између електрода.



Слика V.4а



Слика V.46

Анализом кружног дијаграма се добија пропорционалност следећих дужина и снага, односно струја:

ОА одговара  $S_{iks}(I_{ks})$  - привидној снази (ефективној струји) идеалног кратког споја;

ОD одговара  $S_{ks}(I_{ks})$  - привидној снази (ефективној струји) кратког споја;

ОB одговара  $S(I)$  - привидној снази (ефективној струји);

BВ'' одговара  $P(I_p)$  - активној компоненти снаге (струје);

ОB'' одговара  $Q(I_q)$  - реактивној компоненти снаге (струје);

BВ' одговара  $P_k$  - корисном делу активне компоненте снаге, односно корисној снази;

C<sub>m</sub>C' одговара  $P_{kmax}$  - максималној корисној снази.

Корисна снага је снага којом се енергија претвара у топлоту у самом луку. Дужина B'В'' одговара губицима (разлици снаге узете из мреже и корисне снаге). Губитке представља енергија претворена у топлоту у деловима електроенергетског система до врхова електрода (*Joule*-ови губици).

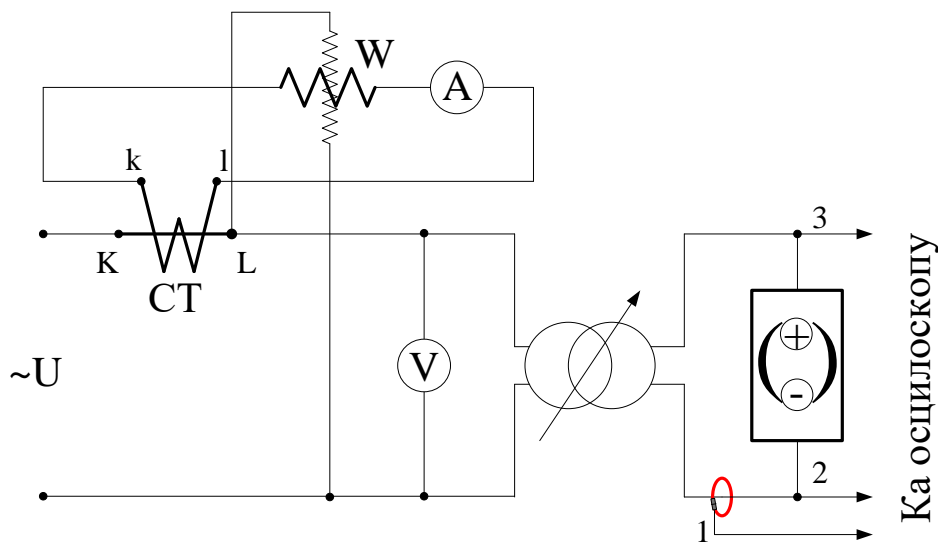
За разлику од максималне корисне снаге, максимална снага узета из мреже не достиже највећу вредност у радној тачки којој одговара тачка C<sub>m</sub> на кружном дијаграму. Њена највећа вредност

одговара полупречнику круга (половини дужине ОА). Ни степен искоришћења (однос корисне снаге и активне компоненте снаге узете из мреже) не достиже свој максимум "у тачки  $C_m$ ". Ово ће се јасно видети на карактеристици  $\eta(I)$ , која ће бити један од резултата вежбе, а објашњено је и у задатку 69.

## 2. ЗАДАТАК И ПОСТУПАК

Задатак је да се за електрични лук, добијен помоћу уређаја са угљеним електродама, уоче карактеристике  $u_l = f_1(t)$ ,  $i_l = f_2(t)$ ,  $u_l = f_3(i_l)$ , и одреде карактеристике  $P_k = f_4(I)$ ,  $P = f_5(I)$ ,  $\eta = f_6(I)$ , користећи се кружним дијаграмом.

Електрични лук се успоставља помоћу уређаја са угљеним електродама, чије се растојање може мењати. На слици V.5 је дата електрична шема веза. У примарно коло трансформатора су постављени инструменти којима се мери струја, напон и снага. Преносни однос струјног трансформатора је 50А/5А. Конструкција трансформатора је типична за трансформаторе који се користе за заваривање, са подесивим ваздушним зазором - на једном стубу трансформатора је примар, на другом секундар, а на трећем се налази подесиви ваздушни зазор. Променом зазора се мења расподела магнетног флукса, односно проценат магнетног флукса примара који се затвара кроз секундар и проценат магнетног флукса који се затвара кроз регулациони стуб. Током лабораторијске вежбе ваздушни зазор се не мења. Конструкција трансформатора који се користи у вежби, као и других решења која се срећу у пракси, су објашњени на предавањима.



Слика V.5

Карактеристике  $u_l = f_1(t)$ ,  $i_l = f_2(t)$ ,  $u_l = f_3(i_l)$  се добијају снимањем на осцилоскопу. На један канал осцилоскопа се директно доводи напон на луку, а на други сигнал са струјне сонде - кроз обухватна клешта се провлачи један кабл кроз који протиче струја лука. У меморију осцилоскопа се снимају временске промене напона и струје, које се затим преносе у рачунар, где се врши њихова обрада: хармонијска анализа струје лука и напона на луку, као и цртање карактеристике  $u_l = f_3(i_l)$ . Алгоритам хармонијске анализе и његове програмске реализације су дати у Додатку А.

Подаци потребни за цртање кружног дијаграма се добијају из огледа кратког споја (кратко спојене угљане електроде;  $R_L = 0$ ), мерењем: снаге  $P_{ks}$ , струје  $I_{ks}$  и напона  $U$ .

### 3. РЕЗУЛТАТИ

Снимљене карактеристике  $u_l = f_1(t)$ ,  $i_l = f_2(t)$ ,  $u_l = f_3(i_l)$ , за једно растојање између електрода, ће се добити у електронском облику. Исто важи и за спектар струје лука.

Помоћу измерених величина у огледу кратког споја треба израчунати:

$$\sum X = \frac{\sqrt{(UI_{ks})^2 - P_{ks}^2}}{I_{ks}^2}, \quad (\text{V.2})$$

где је  $\sum X$  укупни реактивни отпор кола;

$$S_{iks} = \frac{U^2}{\sum X}, \quad (\text{V.3})$$

где је  $S_{iks}$  привидна снага идеалног кратког споја (одговара дужини ОА на кружном дијаграму);

$$S_{ks} = UI_{ks}, \quad (\text{V.4})$$

где је  $S_{ks}$  привидна снага кратког споја (одговара дужини ОД на кружном дијаграму).

Помоћу израчунатих вредности величина  $S_{iks}$  и  $S_{ks}$  и усвојене размере, црта се кружни дијаграм, као на слици V.46.

Пуштајући да се тачка В (врх фазора комплексне снаге  $\underline{S}$ ) креће по луку од тачке D ка тачки O, измерити неколико (7 - 8) величина ВВ', ВВ" ( $P_k, P$ ) и ОВ ( $S$ ). За фиксирану напојну мрежу и карактеристике трансформатора, променом растојања између електрода се мења дужина лука и његов отпор. Повећањем растојања се повећава отпор и смањује струја, при чему постоји ограничење да смањење струје испод неке границе доводи до гашења лука. То значи да постоји максимално растојање између електрода и минимална струја при којој лук још увек може стабилно да гори. Експерименталним путем је потребно приближно одредити ову вредност минималну вредност струје лука и при у складу са њом поставити границу кретања тачке В. На основу измерених дужина ВВ', ВВ" и ОВ и усвојене размере се одреде снаге  $P_k, P$  и  $S$ . Затим се израчуна струја  $I = S / U$  и степен искоришћења  $\eta = P_k / P$ , после чега се цртају тражене функционалне зависности  $P_k = f_4(I)$ ,  $P = f_5(I)$  и  $\eta = f_6(I)$ . Све три карактеристике треба нацртати у целом опсегу струја лука - од тачке кратког споја до тачке минималне струје одржавања лука.

Треба напоменути да  $I$  није струја лука, већ струја у примару аутотрансформатора. Добијени графици зависности снага  $P_k$  и  $P$  и коефицијента корисног дејства  $\eta$  од струје примара аутотрансформатора би важиле и за зависност ових величина од струје лука  $I_l$ , само што би била друга апсцисна размера, са коефицијентом сразмерности једнаким преносном однос аутотрансформатора.



ДОДАТАК А

## Брза Фуријеова трансформација

Припремио

Никола Георгијевић,

у сарадњи са предметним наставником

### **FAST FOURIER TRANSFORM FFT**

#### 1. ФУРИЈЕОВА ТРАНСФОРМАЦИЈА КОНТИНУАЛНОГ СИГНАЛА И ДИГИТАЛНИХ ОДБИРАКА СИГНАЛА

Дефиниција Фуријеове трансформације континуалног сигнала (the continuous-time Fourier transform - CTFT)  $X_C(j\omega)$  континуалног сигнала у времену  $x(t)$  гласи:

$$X_C(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (V.5)$$

где је  $t$  време (у секундама),  $\omega$  к ружна учестаност (у радијанима у секунди), а  $j = \sqrt{-1}$  имагинарна јединица. Дефиниција Фуријеове трансформације дискретног сигнала (discrete-time Fourier transform - DTFT)  $X_D(j\omega)$  дискретног сигнала  $x[n]$  (вредности континуалног сигнала  $x(t)$  у тренуцима одабирања  $-n \cdot T_S$ ) гласи:

$$X_D(j\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n] \cdot e^{-jn\omega T_S} \quad (V.6)$$

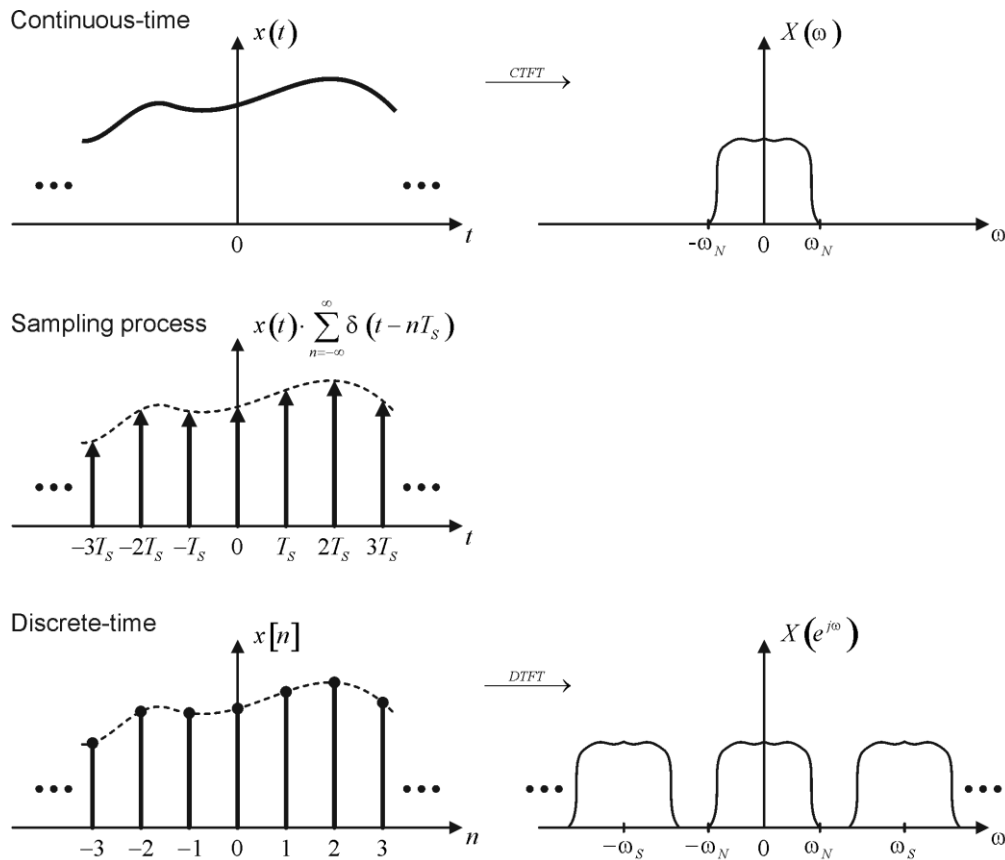
где је  $n$  број одбирка сигнала ( $n \in \mathbb{Z}$ ), а  $T_S$  период одабирања сигнала (у секундама).

Може се показати да примена DTFT доводи до периодичног понављања спектра (периода понављања  $\omega_s=2\pi/T_s$ ), при чему важи

$$X_D(j\omega) = \frac{1}{T_s} \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} X_C(\omega + n\omega_s), \quad (V.7)$$

као што је приказано и на Слици V.6. На Слици V.6 је приказан сигнал код кога је испуњен услов да је учестаност одабирања  $f_s$  таква да је Никвистова учестаност:  $(f_s/2)$  већа од највише учестаности која је присутна у сигналу  $x(t)$ . Уколико овај услов није испуњен, долази до преклапања спектра ("aliasing" ефекат).

Из дефиниционог израза (V.6) се види да DTFT оперише над бесконачним бројем одбирака, што није погодно за практичне прорачуне. То је основни разлог увођења Дискретне Фуријеове трансформације (the discrete Fourier transform - DFT), која ради са коначним бројем одбирака, а даје и коначан број одбирака у фреквентном домену.



Слика V.6 Однос СТФТ континуалног сигнала  $x(t)$  и DTFT одговарајуће секвенце дискретног сигнала  $x[n]$

## 2. ДИСКРАТНА ФУРИЈЕОВА ТРАНСФОРМАЦИЈА (DFT)

Дефиниција дискретне Фуријеове трансформације на секвенци дискретног сигнала  $x[n]$ , дужине  $N$ ,

$$x[n] = \begin{cases} \text{nonzero} & , \quad 0 \leq n \leq N-1 \\ 0 & , \quad \text{elsewhere} \end{cases} \quad (V.8)$$

гласи

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{-\frac{j2\pi nk}{N}} \quad , \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (V.9)$$

Експоненцијални члан у изразу (V.9) се назива "twiddle factor", и означава се са  $W^{nk}$ :

$$W^{nk} = e^{-\frac{j2\pi nk}{N}} \quad (V.10)$$

DTFT трансформација секвенце дискретног сигнала  $x[n]$  дефинисаног изразом (V.8) се може написати као:

$$X_D(j\omega) = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{-\frac{jn\omega}{f_s}} \quad (V.11)$$

Из једначина (V.9) и (V.11) се види да је DFT секвенце сигнала  $x[n]$ , заправо, дискретна (семплована) (семпловање у фреквентном домену) DTFT исте секвенце сигнала  $x[n]$ . Одатле произилази веза између DFT и DTFT исте секвенце сигнала  $x[n]$ :

$$X[k] = X_D(j\omega) \Big|_{\omega = \frac{2\pi kf_s}{N}} \quad (V.12)$$

Приметимо да се применом DFT на секвенцу сигнала  $x[n]$  дужине  $N$ , добија  $N$  фреквенцијских коефицијената  $X[k]$ ; односно  $N$  дискретних учестаности спектра сигнала  $x(t)$ , за које се на енглеском уобичајено користи термин "frequency bins"; Индекс  $k$  одговара учестаности

$$f = \frac{k \cdot f_s}{N} \quad (V.13)$$

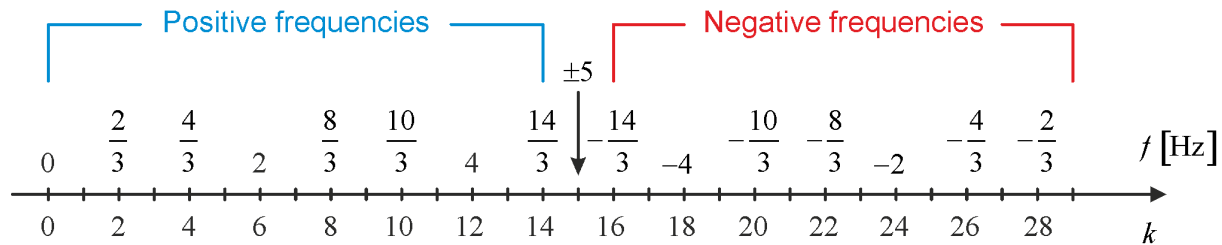
Из (V.13), имајући у виду периодичност DFT (која је "наслеђена" одлика из DTFT), и претпостављајући да је  $N$  паран број (што је скоро увек случај у пракси), закључује се следеће:

$$\text{За } k = 0, f = 0.$$

$$\text{За } 1 \leq k \leq \frac{N}{2} - 1, \frac{f_s}{N} \leq f \leq \left( \frac{f_s}{2} - \frac{f_s}{N} \right).$$

$$\text{За } k = \frac{N}{2}, f = \frac{f_s}{2}.$$

Једноставно се показује да је спектар, који се добија као резултат DFT-а, симетричан. Графички приказ претходних резултата је приказан на Слици V.7 (за  $f_s=10\text{Hz}$  и  $N=30$ ).



Слика V.7 Графичка презентација везе броја одбирка у фреквентном спектру ( $k$ ) и фреквенције ове фреквентне компоненте ( $f$ )

### 3. БРЗА ФУРИЈЕОВА ТРАНСФОРМАЦИЈА (THE FAST FOURIER TRANSFORM - FFT)

Брза Фуријеова трансформација је појам који се користи за ефектни алгоритам за брзо израчунавање дискретне Фуријеове трансформације (DFT). Детаљни опис алгоритма може се пронаћи у [1]; суштина убрзања у односу на поступак израчунавања дискретне Фуријеове трансформације по дефиниционом изразу је да се избегну израчунавања израза чији се резултати међусобно поништавају. Постоје различити алгоритми за прорачун FFT-а. Смањење броја аритметичких операција за један од алгоритама (Radix-2 FFT) приказано је у табели V.2. Уобичајено је да се FFT изводи на секвенцом еквиливантних одбирака сигнала  $N$  чије је дужина једнака степену броја 2:

$$N = 2^m, \quad m \in \mathbb{N} \quad (V.14)$$

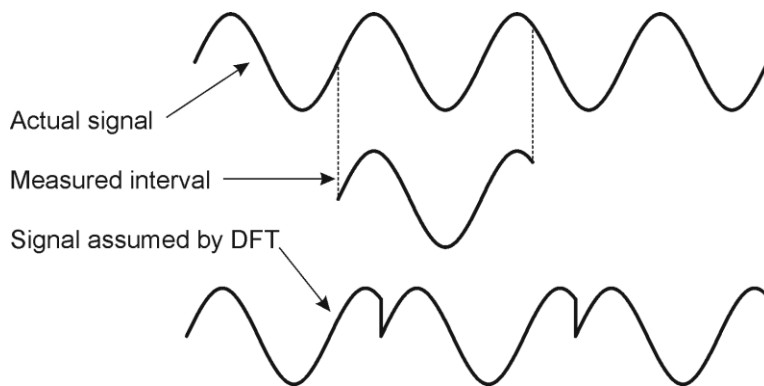
те су резултати за такве случајеве приказани у табели.

Таблица V.2 Поређење комплексности прорачуна између директне DFT и FFT

Број одбирака сигнала	Директна DFT		Radix-2 FFT	
	Комплексних множења	Комплексних сабирања	Комплексних множења	Комплексних сабирања
$N$	$N^2$	$N^2 - N$	$(N/2)\log_2 N$	$N \log_2 N$
128	16384	16256	448	896
256	65536	65280	1024	2048
512	262144	261632	2304	4608
1024	1048576	1047552	5120	10240

#### 4. ЦУРЕЊЕ СПЕКТРА

У дискретној Фуријеовој трансформацији је имплицитно претпостављено да се сигнал периодично понавља (са периодом  $N T_s$ ), односно негативне до позитивне бесконачности, као што је приказано на слици V.8.



Слика V.8 Стварни сигнал, узорковани сигнал коначне дужине и сигнал који се обрађује DFT-

Као што је приказано на слици V.8, реални узорковани сигнали коначног трајања ће имати тачке дисконтинуитета на крајевима периода узорковања коначне дужине. Величина скоковите промене сигнала који се обрађује DFT-ом зависи од облика сигнала и дужине интервала узорковања. С обзиром да тачке оштрих дисконтинуитета доводе до појаве широког фреквентног спектра, они ће довести и до ширења спектра комплетног сигнала. Ово ширење спектра сигнала, односно ширење расподеле енергије у фреквентном домену се назива "цурење спектра".

Цурење спектра изазива промену спектра који изазива разлика у облику сигнала који се обрађује DFT-ом и стварног сигнала. Прва разлика је да ће се појавити шум на спектралним компонентама велике вредности, односно појавиће се грешка која се за те учестаности добија као резултат DFT-е, док се за спектралне компоненте мале вредности може потпуно изгубити информација ("маскирати њихова вредност"), односно добити вредност која има огромно процентуално одступање од стварне вредности.

Други механизам промене спектра који даје DFT је следећи. Уколико сигнал садржи спектралне компоненте чија је фреквенција једнака умношку  $f_s / N$ , DFT ће одабрати DTFT у његовим пиковима (на учестаности које постоје у узоркованом дигиталном сигналу), као и у тачкама спектра DTFT за које је вредност хармоника нула, када DFT такође даје вредност нула. Уколико сигнал садржи спектралне компоненте чија је фреквенција различита од умношка  $f_s / N$ , DFT више неће одабирати DTFT у његовим пиковима (на учестаности које постоје у узоркованом дигиталном сигналу), као ни у тачкама спектра DTFT у којима је вредност спектралне компоненте нула. Последица је да DFT коефицијенти (одбирци у хармонијском спектру) више нису једнаки нули за учестаности које не постоје у оригиналном сигналу, што се "види" као цурење спектра - у спектру долази до смањења вршних вредности дискретног хармонијског спектра и то појаве малих вредности у околини фреквенције за коју је вредност хармоника једнака нули.

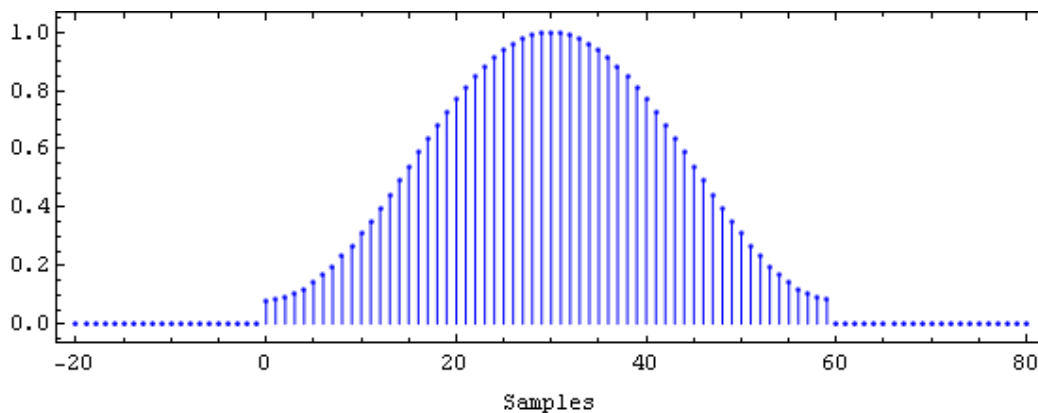
За смањење ефеката изобличења дискретног спектра насталог из наведених разлога, у пракси се користи примена такозваних прозорских функција ("*data windowing*").

## 5. ПРОЗОРИ ПОДАТАКА

На слици V.8 приказан је сигнал који је мерен у интервалу коначне дужине. Сигнал приказан на слици V.8 се може посматрати и као оригинални мерени сигнал помножен са функцијом која има вредност 1 у читавом посматраном интервалу (ова функција константне вредности се назива правоугаони прозор) и њеном применом не долази до било какве промене сигнала који се обрађује у односу на сигнал добијен мерењем. Као што је речено у претходном тексту, ефекти цурења

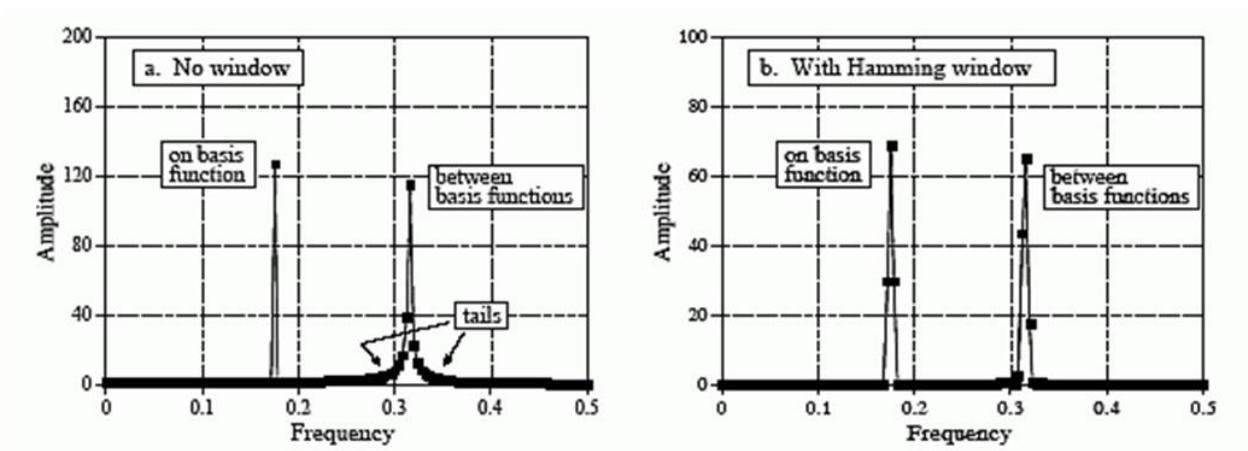
(изобличења спектра у односу на спектар који би се добио дискретизацијом DTFT) се могу смањити смањењем дисконтинуитета сигнала на крајевима интервала. Из ове чињенице произилази идеја да се одбирци мереног сигнала множе са прозорском функцијом чија вредност опада ка нули како се тачка приближава крају интервала. Ако би вредност ове прозорске функције на крајевима интервала била нула, у сигналу који настаје множењем ове функције са одбирцима мереног сигнала потпуно нестане дисконтинуитет на крајевима интервала.

Да би се смањило цурење спектра, прозорска функција треба да има мале вредности на крајевима интервала и треба рапидно да опада ка крајевима интервала. Илустрација ефеката примене *Hamming*-овог прозора, приказаног на слици V.9, приказана је на слици V.10.



Слика V.9 *Hamming*-ов прозор.

Илустрација примене *Hamming*-овог прозора је дата на примеру сигнала који садржи две хармонијске компоненте, односно који је једнак збиру две простопериодичне компоненте различитих учестаности. Једна од учестаности је једнака умношку  $f_s / N$ , док се друга налази између две учестаности које су једнаке умношку  $f_s / N$ . Примена DFT, без прозора, за учестаности које су једнаке умношку  $f_s / N$  даје јасан јединствен пик у фреквентном домену, док се за учестаност која није једнака умношку  $f_s / N$  појављују "репови". Након увођења *Hamming*-овог прозора, елиминишу се "репови", пикови се задржавају на истом месту где су били када је примењена DFT без примене прозора, али они више нису тако оштри.



Слика V.10 Пример ефекта *Hamming*-овог прозора.

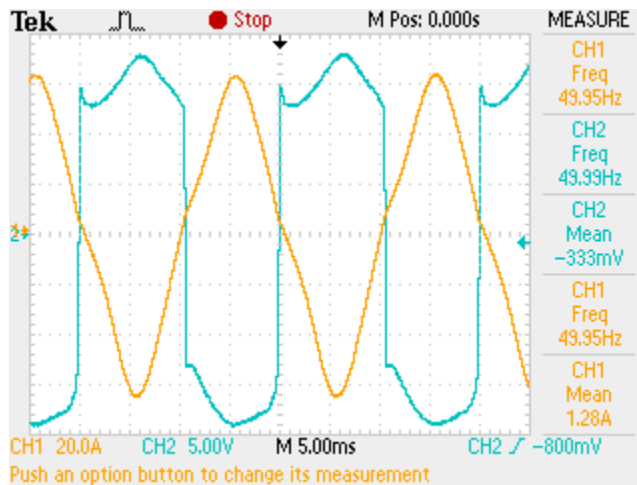
## 6. ЛИТЕРАТУРА

- [1] J. W. Cooley and J. W. Tukey, "An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series", *Mathematics of Computation*, Vol. 19, No. 90. (1965), pp. 297-301.



## 7. ПРИМЕР

Снимци струје лука (окер график) и напона (зелени график) на електродама лука су приказани на слици V.11.

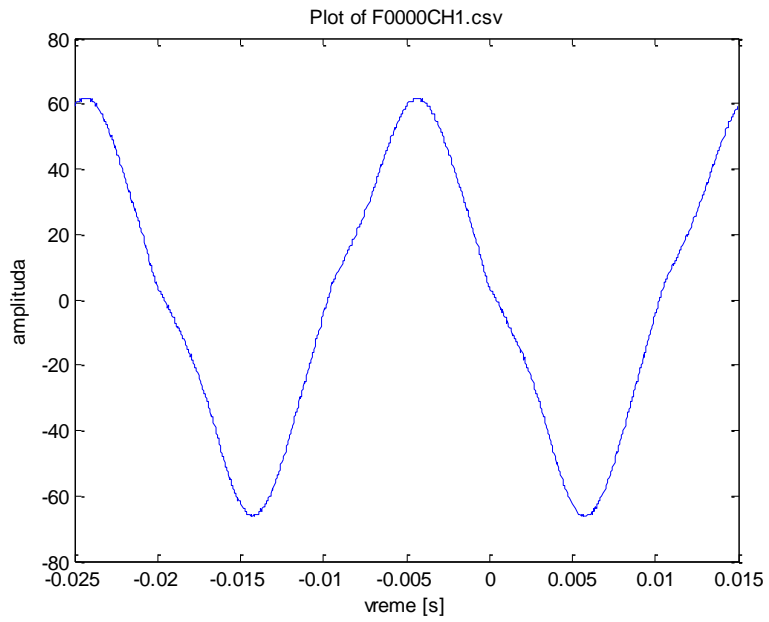


Слика V.11 Снимак струје и напона лука.

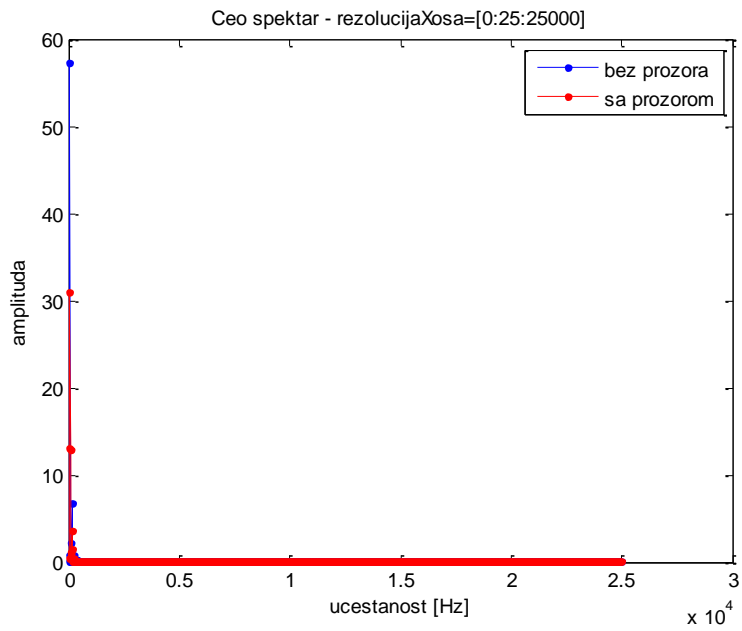
Обрада сигнала струје:

На слици V.12 је приказан график промене струје после издвајања 2000 тачака (од укупно 2500 регистрованих узорака сигнала), мерених са периодом  $10\mu\text{s} = 0.01\text{ms}$ . Применом Матлаб програма `ObradaSignala_odseceno.m` добија се спектрални састав сигнала приказан на слици V.13, односно V.14 (увеличан део спектра са слике V.13); пик се јавља на 50 Hz.

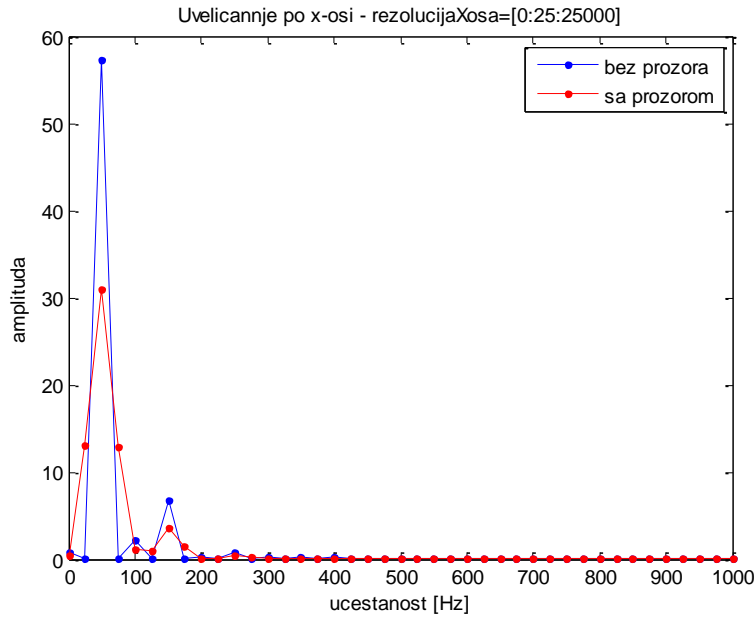
На слици V.15 је илустрована зависност напона од струје у току једног периода мрежног напона (20 ms).



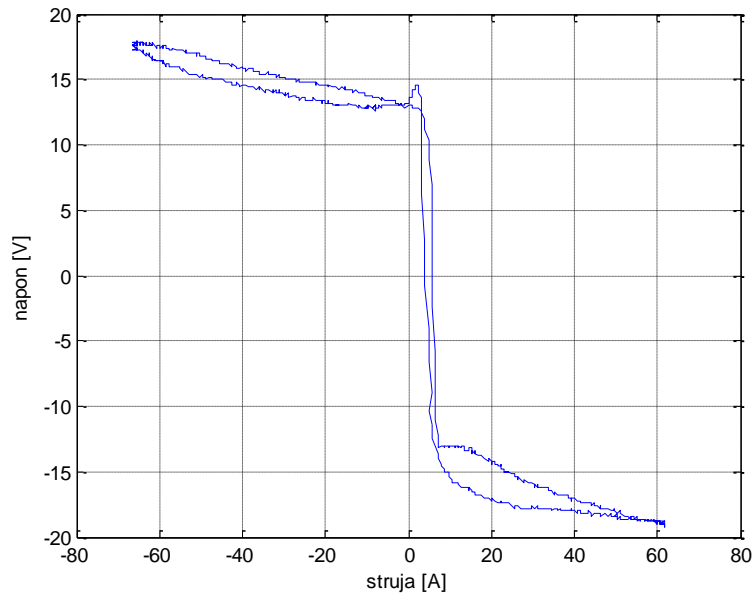
Слика V.12 Струјни сигнал који садржи 2000 тачака.



Слика V.13 Спектар струјног сигнала са слике V.12



Слика V.14 Увеличан део слике V.13 - део спектра струјног сигнала са слике V.12.



Слика V.15 Зависност напона од струје у једној периоди сигнала (20 ms).

Приказ на вежби:

Демо тест сигнала, који садржи 4 простпериодична сигнала, чији је ред и амплитуда:

1. - амплитуда 1, 3. - амплитуда 0.3, 5. - амплитуда 0.2 и 7. - амплитуда 0.1