

Prof. dr Zoran Radakovic

Faculty of Electrical Engineering
University of Belgrade
Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Belgrade,
Serbia

E Mail: radakovic@etf.rs
Phone: +381 11 3218 328

Виши хармоници у пракси пројектовања електроенергетских постројења и погона

Предавач:

Зоран Радаковић, дипл. ел. инж., редовни професор
Електротехнички факултет, Универзитет у Београду

17. децембар 2015

Пословна зграда Енергопројект,
Булевар Михаила Пупина 12, Београд

Кад би могло...

- Да сваки пријемник у електроенергетској мрежи има потпуно непрекидно напајање
- Да су напон и учестаност напајања, како у устаљеном стању, тако и при прелазним режимима, константни и једнаки номиналним вредностима
- Да напон има идеалан просто-периодични (синусни) облик
- Да губици буду што мањи -> што ближи онима који се имају при протицању струје која треба да пренесе активну снагу до пријемника
- Да комплетна опрема кошта што мање

Струка електроенергетичара...

- Полазећи од економског критеријума и усвојених граница за дозвољено одступање стварних од идеалних карактеристика, спровођење поступака провере у фази пројектовања да ли систем / опрема обезбеђује остваривање потребних карактеристика
- Спровођење решења чијом се применом могу постићи потребне карактеристике
- Мерне методе провере да ли су остварене потребне карактеристике
- Ако се ради о проширењу постројења или оптимизацији рада истог, вршење мерења на постојећем постројењу и коришћење њихових резултата како би се пројектовала нова опрема

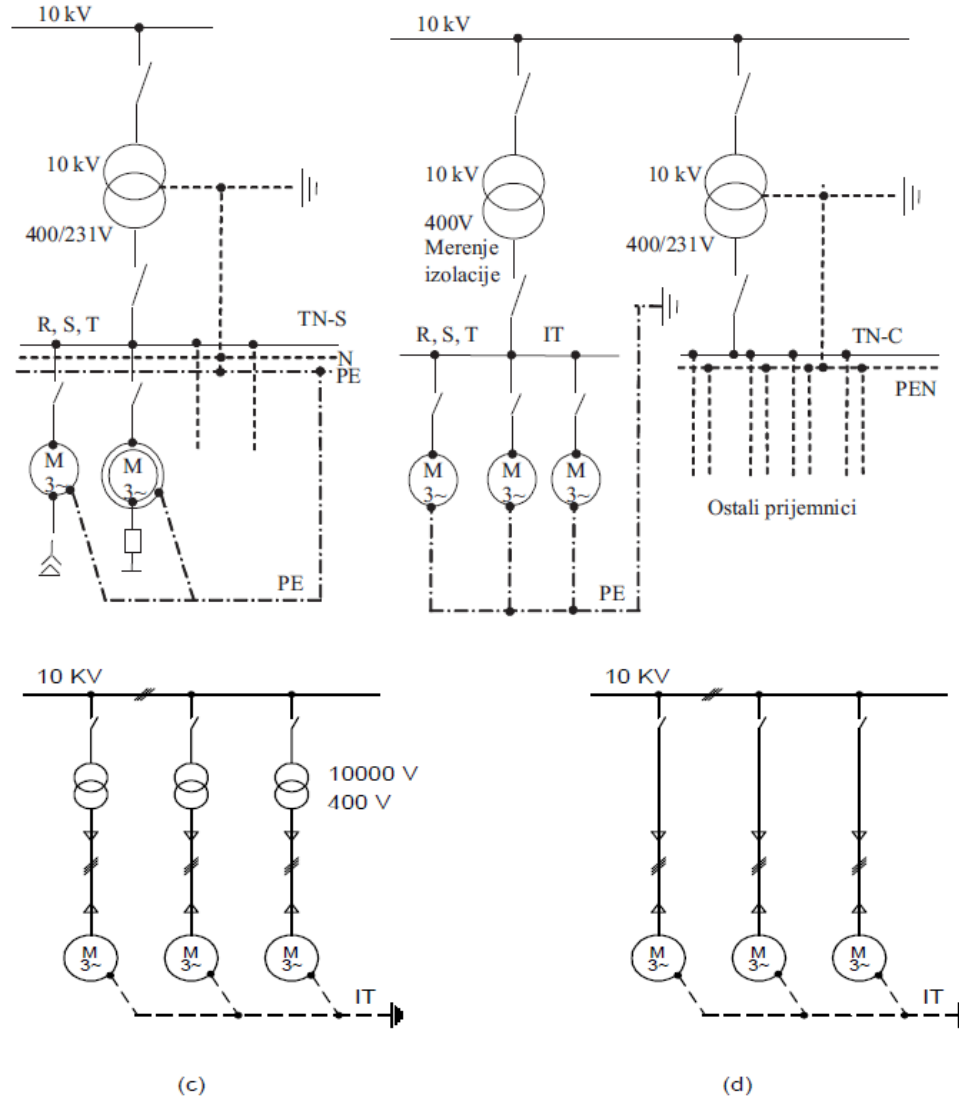
Аспекти квалитета електричне енергије

- Дужина трајања испада (колико често и колико дуго)
- Одступање напона мрежне учестаности од номиналног напона у току рада:
 - У устаљеном радном режиму пријемника
 - При стартовању пријемника на коме се напон посматра
 - При стартовању неког другог пријемника који се напаја са истог места у мрежи са кога полази напојни вод ка посматраном пријемнику (PCC – Point of common coupling).
- **Одступање таласног облика напона од синусног облика (хармоници)**
- Варијације ефективне вредности компоненте напона мрежне учестаности учестаношћу неколико Hz (фликери)
- Несиметрија напона као последица несиметрија оптерећења

Снага кратког споја и импеданса мреже на месту РСС

Кључни параметар за сметње (погоршање квалитета напајања) које пријемници изазивају на другим пријемницима

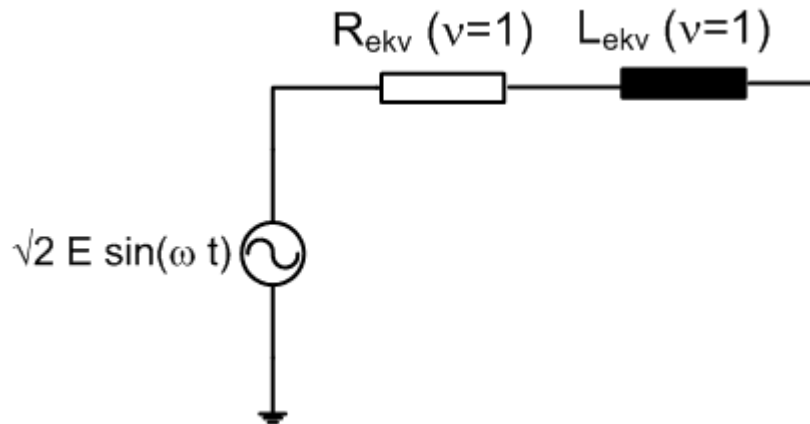
Илустрација на примеру поласка мотора



Слика 1

Одакле хармоници у мрежи?

Заменска шема мреже (еквивалентни Тевененов генератор), посматрана са места прикључка пријемника за основни хармоник, која се користи у класичним прорачунима струје кратког споја, има изглед приказан на следећој слици:



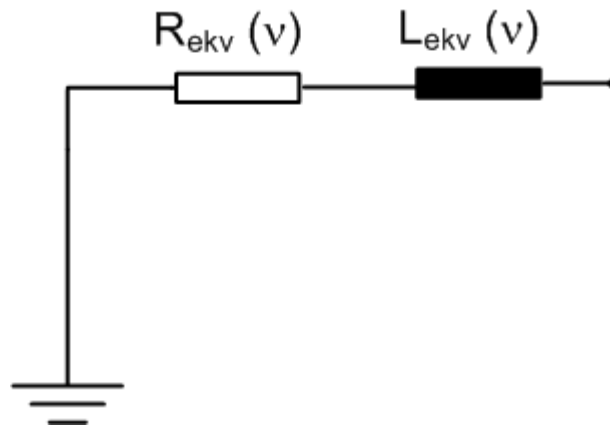
Слика 2

Ова шема се може користити за процену динамичког пада напона, до кога долази у режимима поласка пријемника, када је струја много већа од номиналне

Гледано од неке тачке у мрежи према главним изворима електричне енергије (синхрони генератори у електранама), извори виших хармоника не постоје:

конструкцијом синхроних генератора се практично обезбеђује да генератори генеришу чист синусни напон.

Стандардни приступ из теорије кола је да се за сваки хармоник формира и решава посебна заменска шема. Уколико у мрежи не би постојали извори хармоника, Тевененов генератор којим се еквивалентира мрежа, са класичним синхроним генераторима у електранама, за хармоник реда ν би била



Слика 3

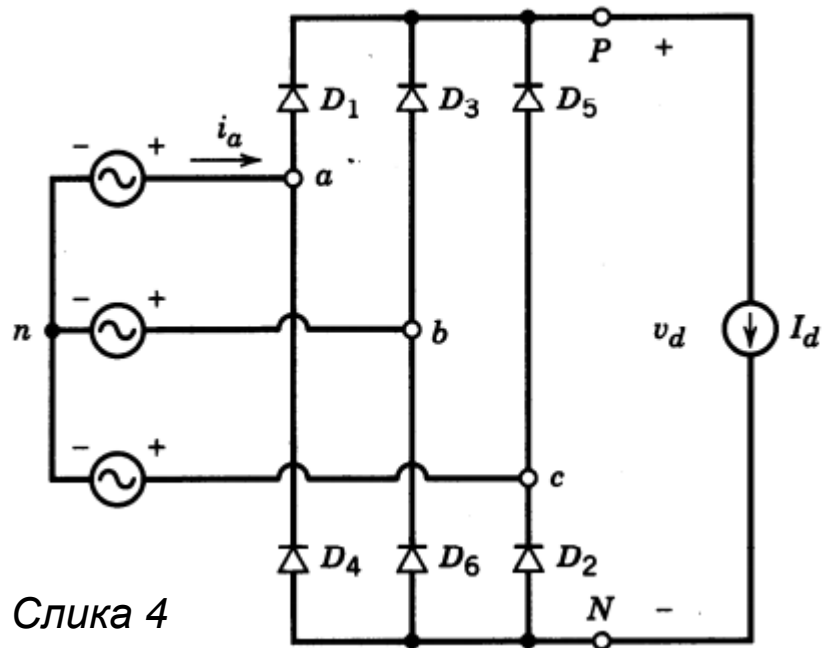
За основни хармоник, пријемник се моделује импедансом, која евентуално може бити мања при поласку пријемника.

У случају да је пријемник линеаран, он се у еквивалентној шеми за ν хармоник такође моделује импедансом (различитом од импедансе за основни хармоник).

У том случају, неће постојати ни напон ни струја виших хармоника.

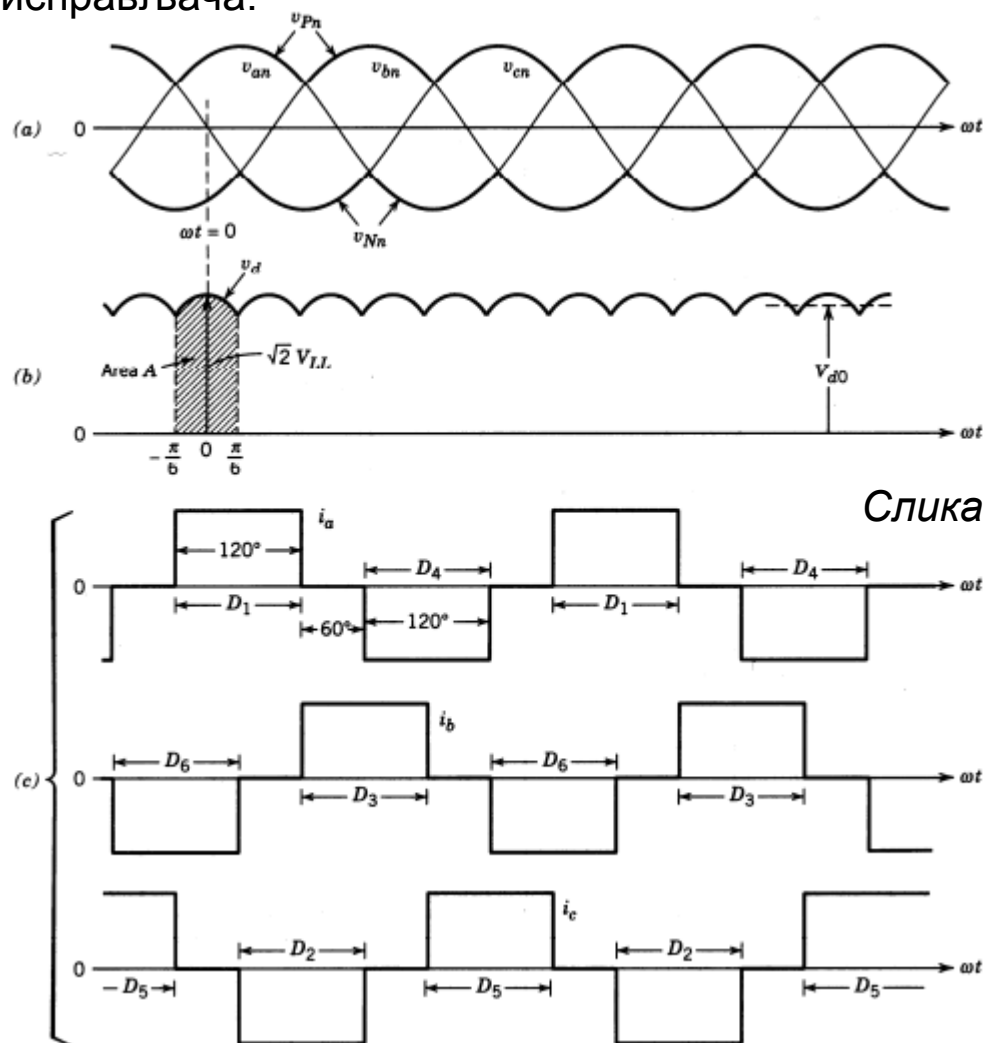
У случају да је пријемник нелинеаран, он се у еквивалентној шеми за ν хармоник моделује као активни елемент – струјни генератор (струја струјног генератора је једнака струји хармоника који се појављује при напајању пријемника простопериодичним напоном).

Пример елементарног нерегулисаног диодног исправљача:



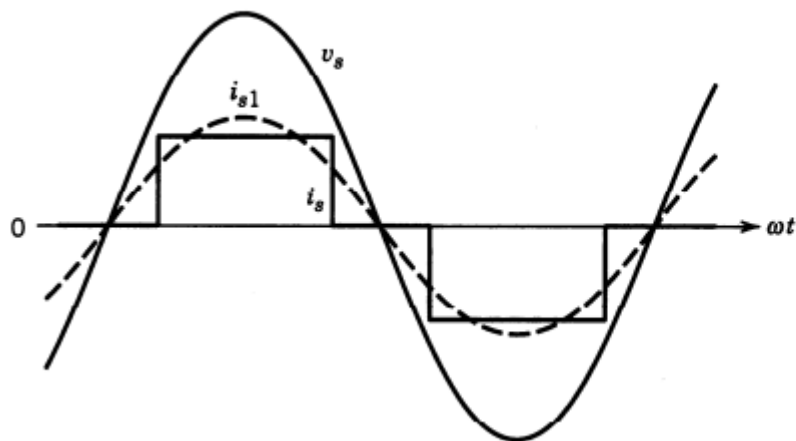
Слика 4

Упрошћен приказ:
 Струја оптерећења на једносмерној страни константна и занемарена реактанса мрежне пригушнице.

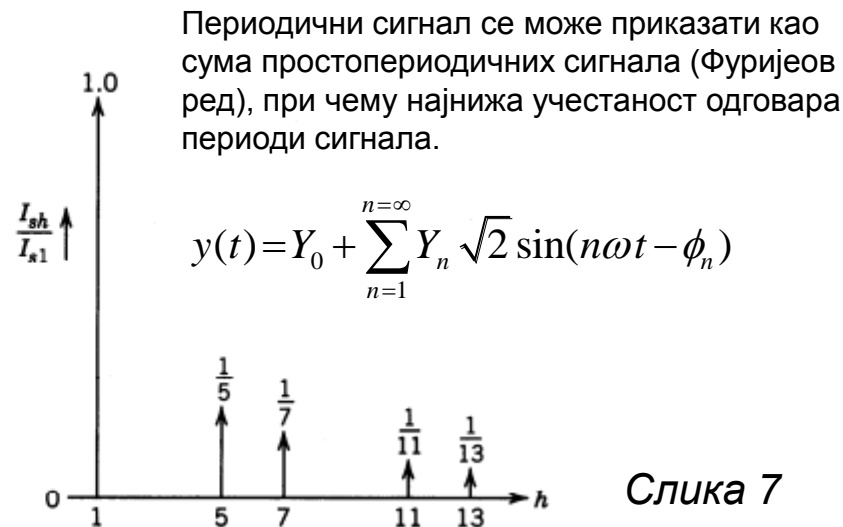


Слика 5

Струја у линијским проводницима и прва четири хармоника која се јављају у спектру струје (5., 7., 11. и 13.).

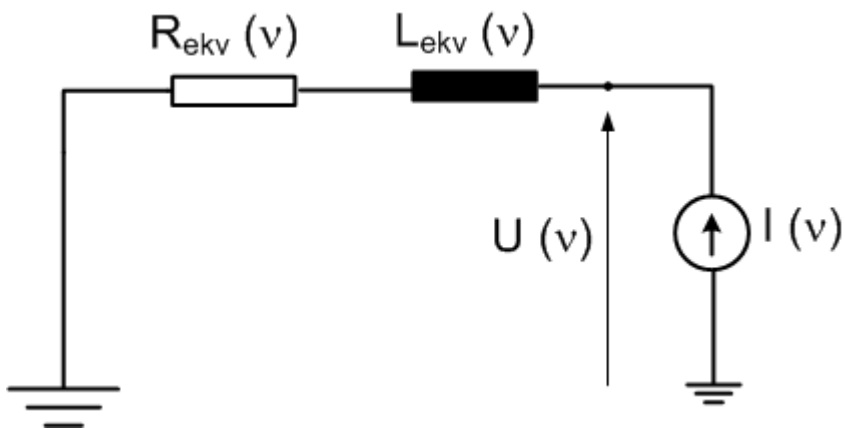


Слика 6



Слика 7

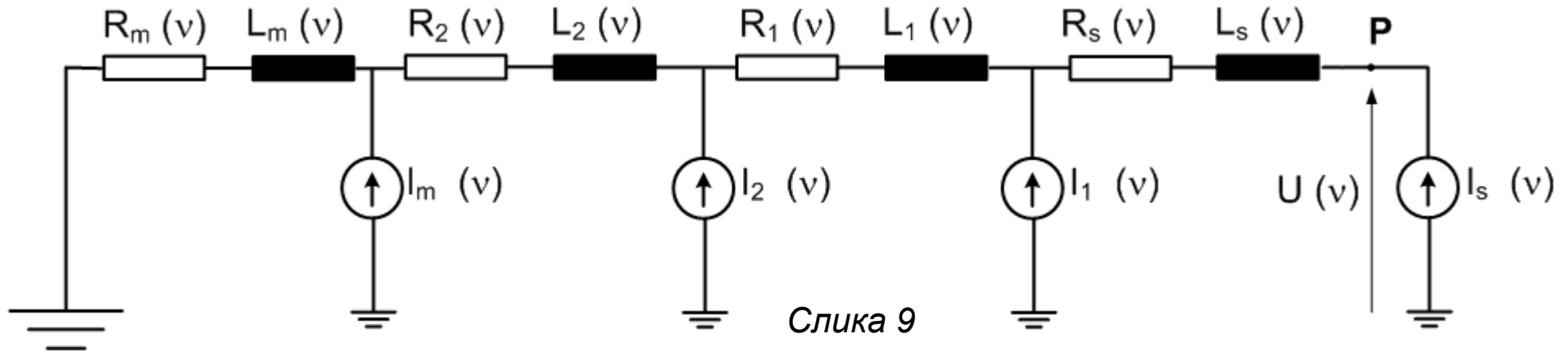
Заменска шема у случају нелинеараног пријемника:



Слика 8

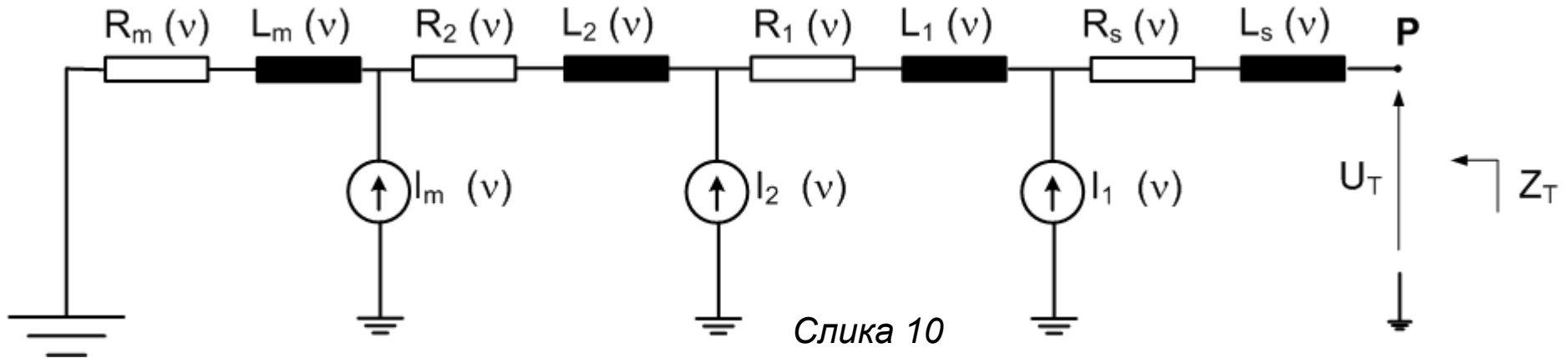
Као резултат струјне побуде, у колу се ствара хармоник напона.

У пракси нелинеарни пријемници су дистрибуирани по мрежи, чему одговара заменска шема приказана на следећој слици.



Слика 9

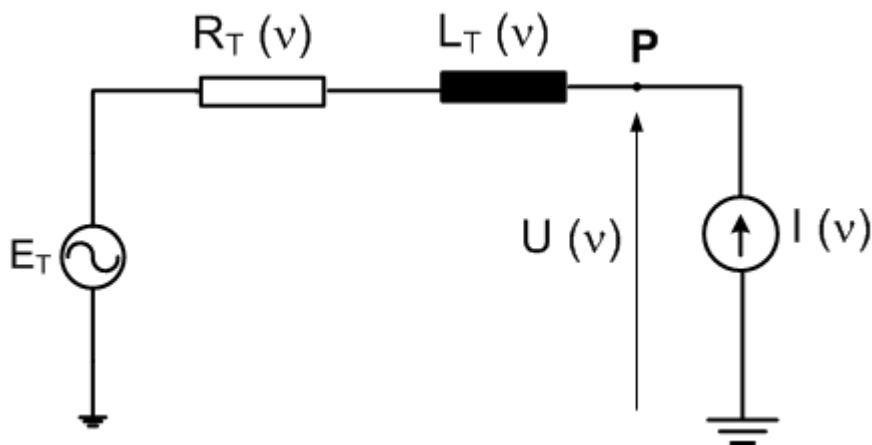
Мрежа, са дистрибуираним нелинеарним пријемницима, се може еквивалентирати Тевененовим генератором и импедансом (при њеном одређивању прекидају се гране са струјним генераторима):



Слика 10

После еквивалентирања мреже, шема са слике 9 се може трансформисати у шему приказану на следећој слици, где је

Тевененова импеданса ($R_T(\nu)$, $L_T(\nu)$) једнака еквивалентној импеданси ($Z_{ekv}(\nu)$, $L_{ekv}(\nu)$) са слике 8:



Слика 11

А како да одредимо Тевененов генератор и импедансу, кад не знамо како су распоређени нелинеарни пријемници по мрежи?!

Тако што ћемо да **искључимо нелинеарни пријемник прикључен у тачки P и да у њој измеримо напон вишег хармоника** – тај напон је једнак напону еквивалентног Тевененовог генератора. Еквивалентна Тевененова импеданса је једнака импедански кратког споја мреже (за хармоник реда ν) у тачки P .

Типови пријемника и опреме који стварају више хармоники

- Елементи енергетске електронике, укључујући и мала напајања за електронске уређаје, као што су рачунари, ТВ апарати итд.
- Извори осветљења са пражњењем у гасу, као што је флуоресцентна расвета
- Електролучна пећ
- Опрема код које долази до засићења магнетног кола, као што су пригушнице или трансформатори

$$y(t) = Y_0 + \sum_{n=1}^{n=\infty} Y_n \sqrt{2} \sin(n\omega t - \phi_n) \quad Y_{eff} = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=\infty} Y_n^2}$$

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} Y_n^2}}{Y_1}$$

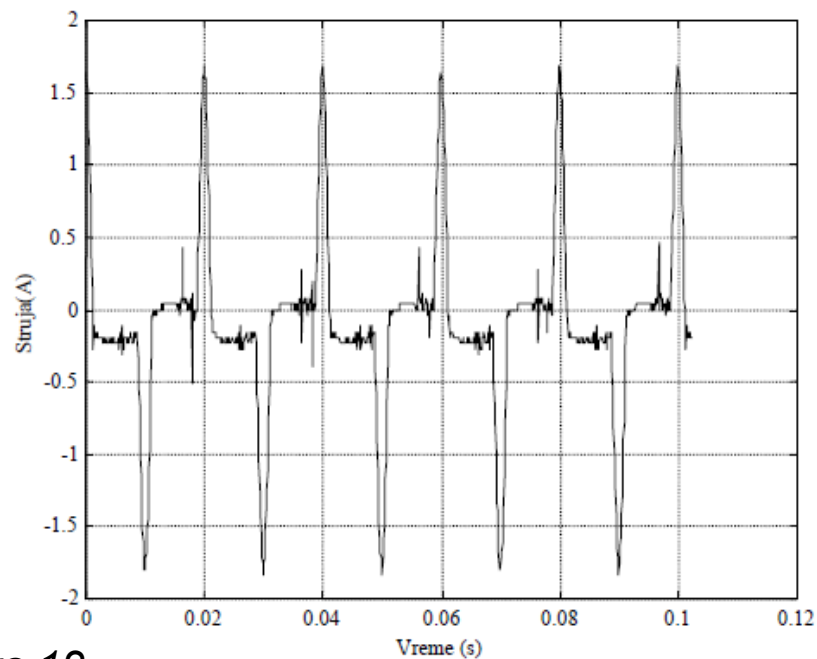
$$THD \geq 0$$

total harmonic
distortion

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} Y_n^2}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{n=\infty} Y_n^2}} \equiv \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} Y_n^2}}{Y_{eff}}$$

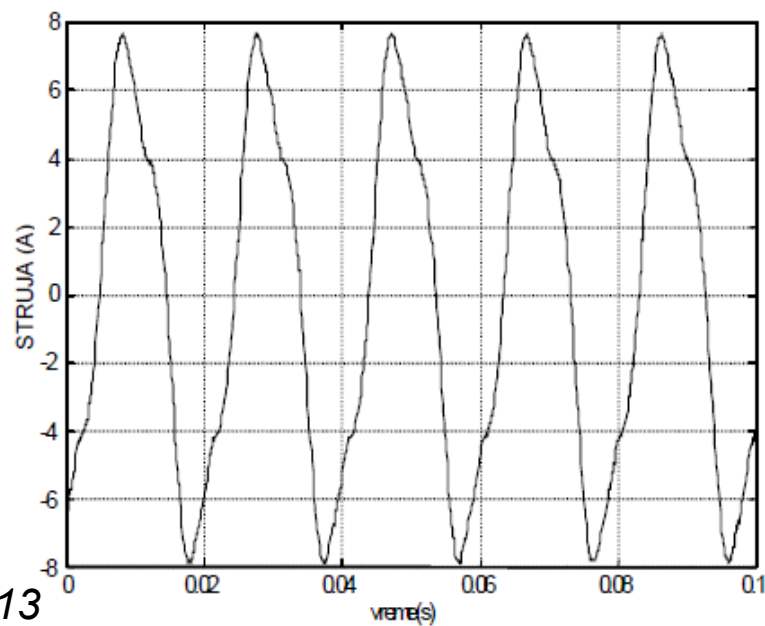
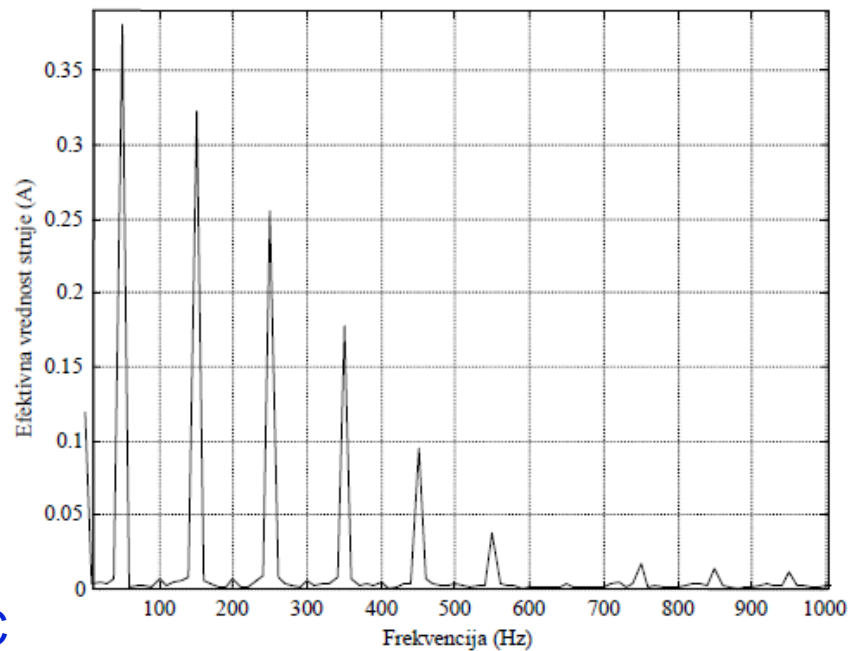
$$0 \leq TDD \leq 1$$

total demand
distortion



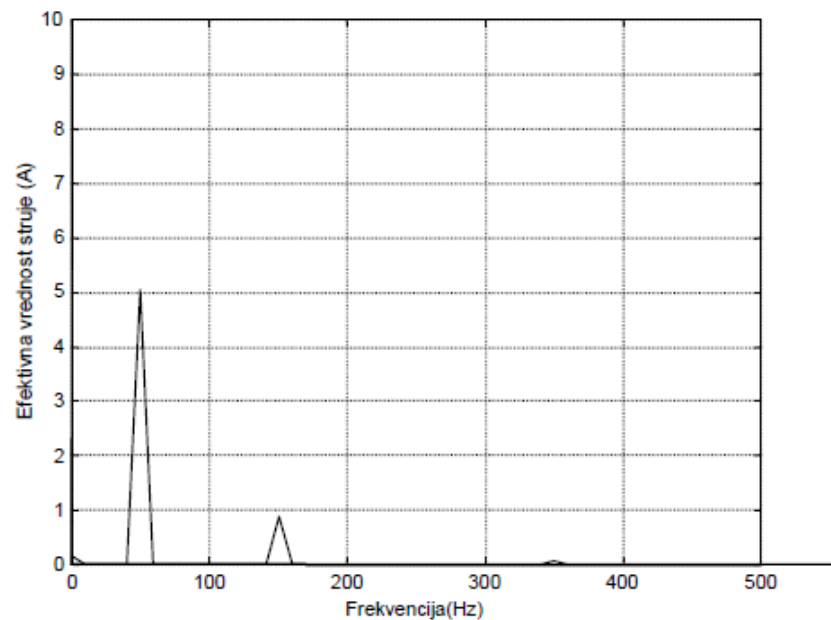
Слика 12

PC

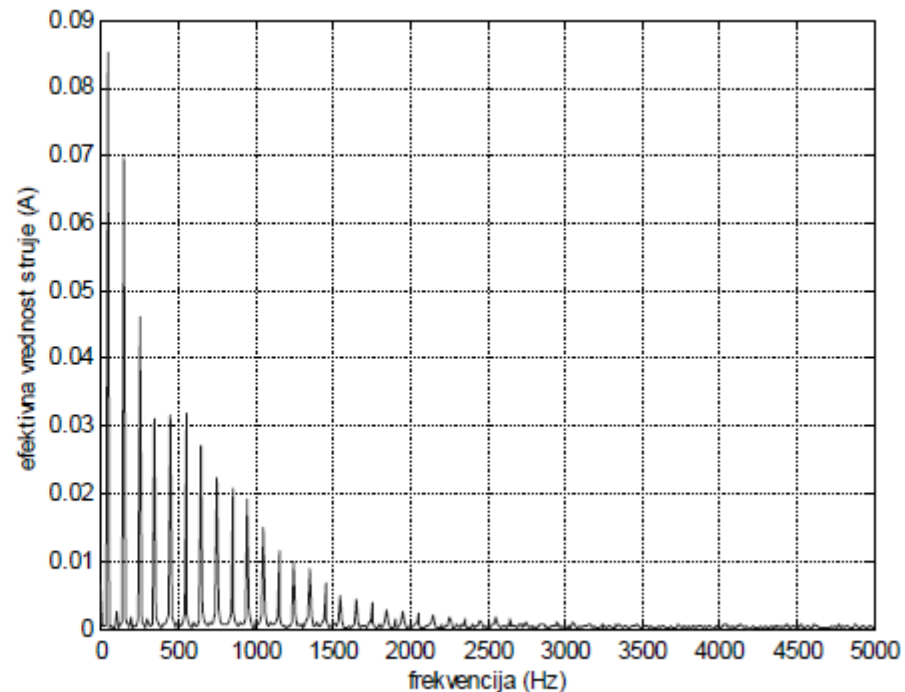
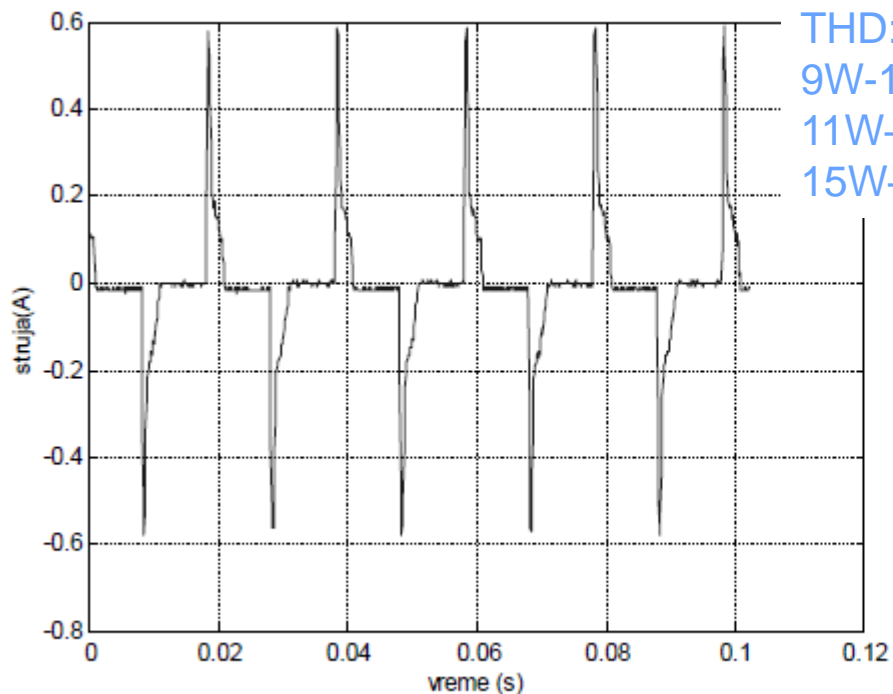


Слика 13

Флуо
расвета



П
р
и
м
е
р
и



Слика 14

Компактни флуоресцентни извори са електронским баластом
 (стара генерација, се екстремно великим изобличењем струје)

Дакле:
 Хармонијска изобличења струје објекта могу бити велика не само у индустријским објектима са великим полупроводничким претварачима, пећима, постројењима за заваривање и слично, **већ и у пословним и комерцијалним објектима**, са рачунарима и флуо расветом, као доминантним потрошачима електричне енергије.

Штетне последице виших хармоника

- Слично реактивној снази основног хармоника (Q_1), виши хармоници струје не преносе активну снагу основног хармоника (P_1), већ само доводе до **повећања** ефективне вредности струје (ефективна вредност струје I_{eff}), **губитака и загревања**.

Фактор снаге (PF) се дефинише као однос активне снаге основног хармоника и привидне снаге израчунате као производ ефективне номиналне вредности напона и ефективне вредности струје

$$PF = \frac{P_1}{U_n I_{eff}}$$

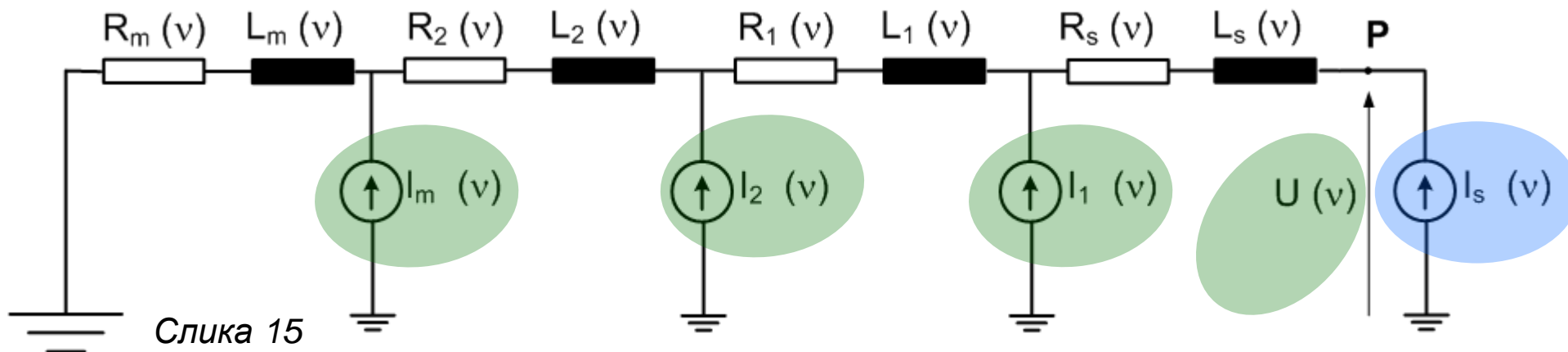
$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}}$$

$$PF = \frac{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2} \cos \varphi_1}{U_n I_{eff}} = \frac{I_1 \cos \varphi_1}{I_{eff}} = \frac{I_1 \cos \varphi_1}{\sqrt{(1 + THD^2)} I_1} = \frac{\cos \varphi_1}{\sqrt{(1 + THD^2)}} = \frac{\cos \varphi_1}{TDD}$$

- Повећање губитака и загревања није само последица повећања ефективне вредности струје, већ зависи и од спектралног састава – отпор зависи од учестаности, о чему ће бити више речи у делу презентације која се односи на аспекте пројектовања
- Повећање буке код трансформатора и пригушница
- Вибрације код обртних електричних машина, изазване пулсирајућим електромагнетним моментом
- Индуковани напони (поготову који потичу од хармоника дељивих са 3 - “трипли хармоници”)
 - у телекомуникационим водовима
 - у конструктивним деловима уређаја и опреме
- Сметње при мерењу и управљању
(на пример детекција проласка напона кроз нулу у склопу уређаја енергетске електронике)
- Сметње у раду пријемника осетљивих на квалитет напона напајања

Дозвољене границе хармоника

- “Гаранције” морају бити успостављене “обострано” – и за оператора дистрибутивног система (ОДС), као испоручиоца електричне енергије (са стране мреже), према кориснику електричне енергије (са стране електричне инсталације) корисника, и обрнуто.



- Пример дозвољених граница изобличења мрежног напона према стандардима (за средње- и високо- напонске мреже)

| Непарни хармоничи који нису делјиви са 3 | | Непарни хармоничи делјиви са 3 | | Парни хармоничи | |
|--|------------------------|--------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Ред хармоника n | Хармоник напона % | Ред хармоника n | Хармоник напона % | Ред хармоника n | Хармоник напона % |
| 5 | 6 | 3 | 5 | 2 | 2 |
| 7 | 5 | 9 | 1.5 | 4 | 1 |
| 11 | 3.5 | 15 | 0.3 | 6 | 0.5 |
| 13 | 3 | 21 | 0.2 | 8 | 0.5 |
| 17 | 2 | > 21 | 0.2 | 10 | 0.5 |
| 19 | 1.5 | | | 12 | 0.2 |
| 23 | 1.5 | | | > 12 | 0.2 |
| 25 | 1.5 | | | | |
| > 25 | $0.2 + 0.5 \cdot 25/n$ | | | | |

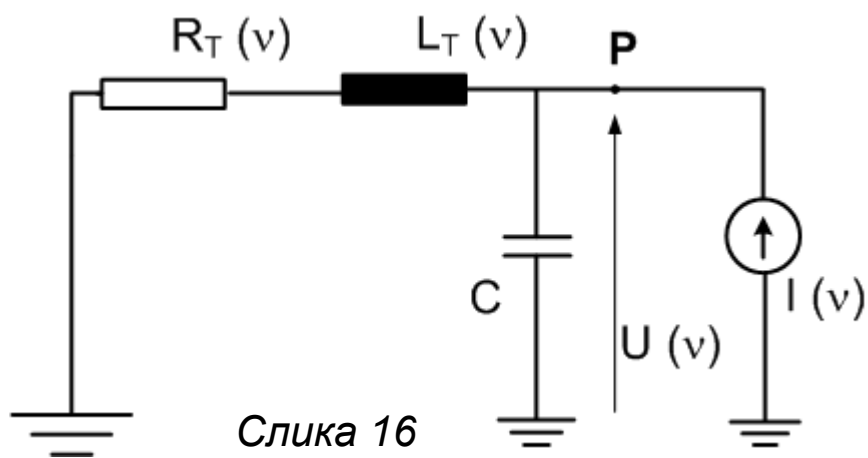
Укупни фактор изобличења напона 8 %.

- Друга група стандарда се односи на ограничење струје виших хармоника које смеју да емитују пријемници када се напајају напоном дефинисаног таласног облика напона (најчешће, али не искључиво, синусног)
- У [1] је дат преглед релевантних стандарда за хармонике, груписаних на наведена два начина – једна група стандарда пре свега штити корисника електричне енергије, а други ОДС-а.

Ефекат повећања виших хармоника као последица компензације реактивне снаге основног хармоника

- Прикључење кондензатора у циљу смањења реактивне снаге основног хармоника по правилу доводи до повећања изобличења напона, а последично и до повећања струја виших хармоника које протичу кроз мрежу
- Поред тога, појављују се и значајне вредности виших хармоника струје кроз кондензаторе

Вратимо се на елементарни случај, аналоган ономе који је приказан на слици 8. За разлику од случаја са слике 8, где није постојала кондензаторска батерија за компензацију основног хармоника, на слици 16 је приказан случај да постоји кондензатор:



$$\underline{Z}_{Cv} = \frac{1}{jv\omega C}$$

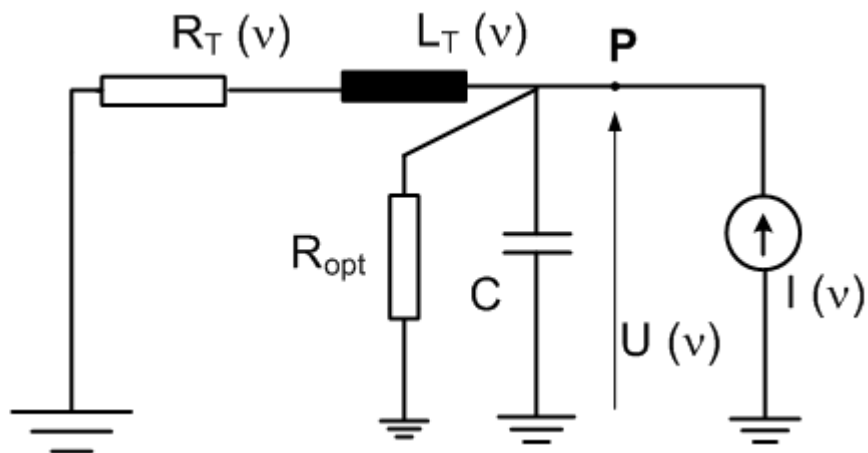
$$\underline{Z}_T(v) \approx jv\omega L_T$$

$$\underline{Z}_{CT}(v) = \frac{\frac{1}{jv\omega C} jv\omega L_T}{\frac{1}{jv\omega C} + jv\omega L_T} = \frac{jv\omega L_T}{1 - v^2 \omega^2 L_T C}$$

За хармоник учестаности

$$v^{**} = \frac{1}{\omega \sqrt{L_T C}}$$

импеданса $\underline{Z}_{CT}(v)$, а тиме и напон $U(v)$, одређен на основу модела приказаног на слици 16, постају бесконачно велики. У реалности, на секундару трансформатора постоји оптерећење, које није приказано на слици 16, тако да стварни модел има изглед приказан на слици 17 (уместо стварног модела, да импеданса оптерећења има активну отпорност и индуктивност, обе фреквентно зависне, оптерећење је приказано упрошћено, само активном отпорношћу R_{opt}).



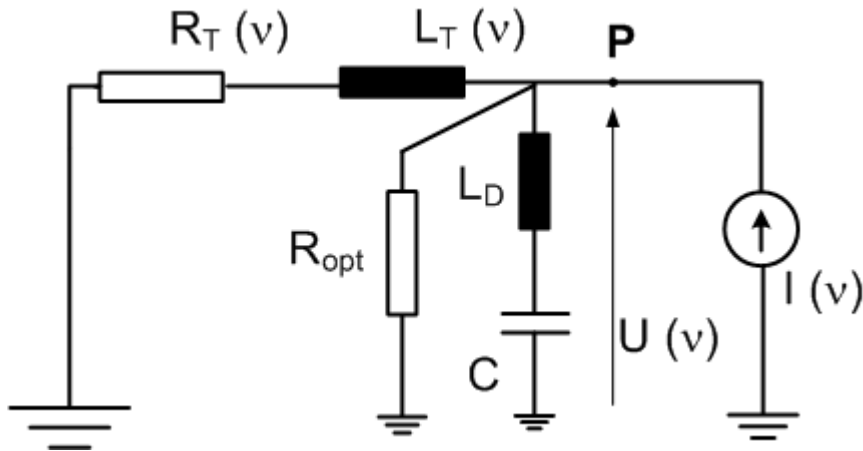
$$U(v^{**}) \approx R_{opt} I(v^{**})$$

R_{opt} је велико, па је хармоник напона много већи у односу на ситуацију да нема компензације (C).

Слика 17

Ако се дешава у области учестаности где струјни хармоници нису мали, ово је **опасно и недозвољено!**

Класично решење проблема... без да се много мисли...:



Слика 18

Поента: за све хармоника које се могу појавити, LC спој се “види” као реактанса, паралелно везана са L_T , због чега су хармоници мало мањи него пре компензације.

L_D (антирезонантна пригушница; *detuned reactor*) се подешава тако да резонантна учестаност LC споја

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_D C}}$$

буде мања од минималне учестаности хармонијске компоненте која има значајну вредност. Типично:

- тешки услови, скупља пригушница, случај када се може јавити и трећи хармоник -> $f_r=134\text{Hz}$
- средњи услови, случај када је минимални хармоник 5. -> $f_r=189\text{Hz}$
- лакши услови, јефтинија пригушница, случај када се не очекује појава хармоника реда нижег од 7. -> $f_r=210\text{Hz}$

Увођење L_D доводи до повећања реактивне снаге основног хармоника у односу на вредност која би се имала да се користе само кондензатори; у случају серијске везе кондензатора C и пригушнице L_D у звезду, прикључену на линијски напон U_l реактивна снага основног хармоника би износила

$$Q_1 = \omega C U_1^2 \frac{\left(\frac{f_r}{50}\right)^2}{\left(\frac{f_r}{50}\right)^2 - 1} > \omega C U_1^2$$

Струја која протиче кроз кондензатор C и пригушницу L_D је приближно једнака струји основног хармоника, одређеној претходно наведеном реактивном снагом основног хармоника; струје виших хармоника неће тећи кроз ову грану јер је импеданса редне $C - L_D$ везе релативно велика за било коју учестаност чије је вредност једнака умношку мрежне учестаности (50Hz).

Напон на кондензатору је нешто већи од номиналног

$$U_C = U_f \frac{\left(\frac{f_r}{50}\right)^2}{\left(\frac{f_r}{50}\right)^2 - 1}$$

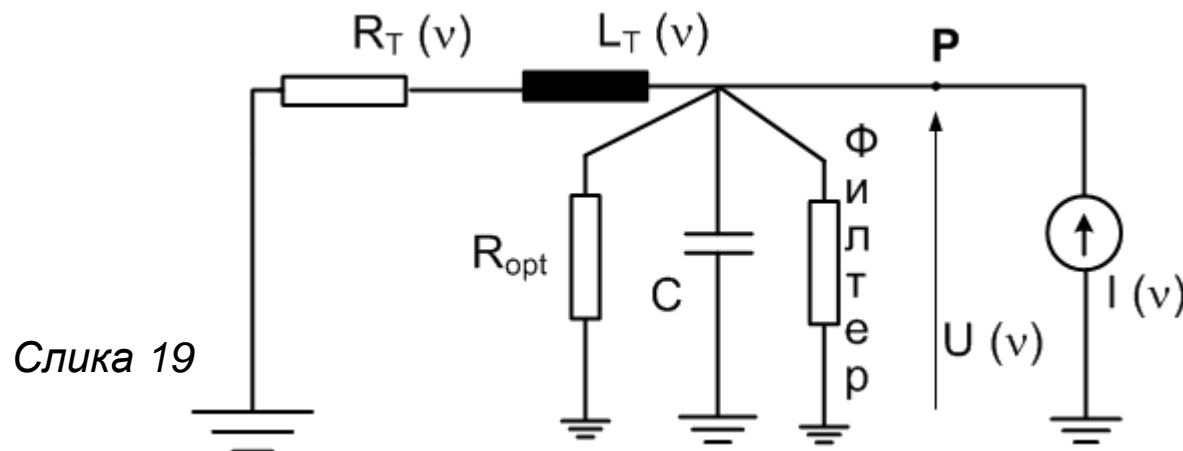
У [добрим каталозима](#) постоје “готова решења” (могу се наручити по каталошком броју) за кондензатор C и пригушницу L_D , тако да задовољавају струјне и напонске критеријуме.

Шта смо заправо урадили увођењем L_D ?

Квалитативно, али **квантитативно занемарљиво мало**, смо смањили напонске хармоники (за претпостављени ниво емисије струјних хармоника нелинеарних пријемника).

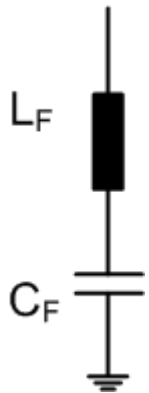
Дакле, увођење L_D спречава повећање хармоника као последицу компензације реактивне снаге основног хармоника, али нас неће спасити ако су **струјна хармонијска изобличења нелинеарних пријемника**, и последична изобличења напона у мрежи, иначе **велика**.

У том случају се морају применити **ФИЛТРИ**, који делују тако да се струја виших хармоника нелинеарних пријемника затвара кроз филтер (импеданса филтра за виши хармоник је много нижа од импедансе мреже за тај хармоник), односно не улази у мрежу. Последично, долази до значајног смањења хармоника напона, односно изобличења напона у мрежи.



Филтри

Резонантни филтер
(велики степен
филтрације (елиминација)
једног хармоника - ν^*)



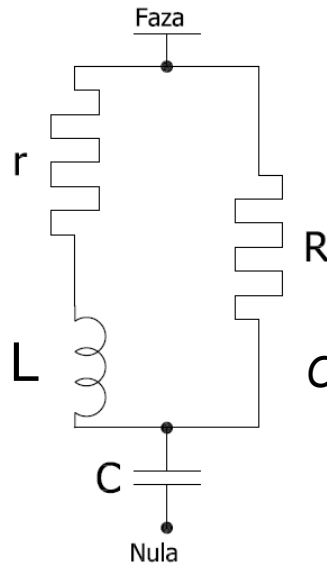
Слика 20

$$\nu^* = \frac{1}{\omega} \frac{1}{\sqrt{L_F C_F}}$$

$$Q_1 = \omega C_F U_1^2 \frac{\nu^{*2}}{\nu^{*2} - 1}$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_F C_F}}$$

Пример ослабљеног
филтра
(филтрација (слабљење)
више хармоника - ν^*)

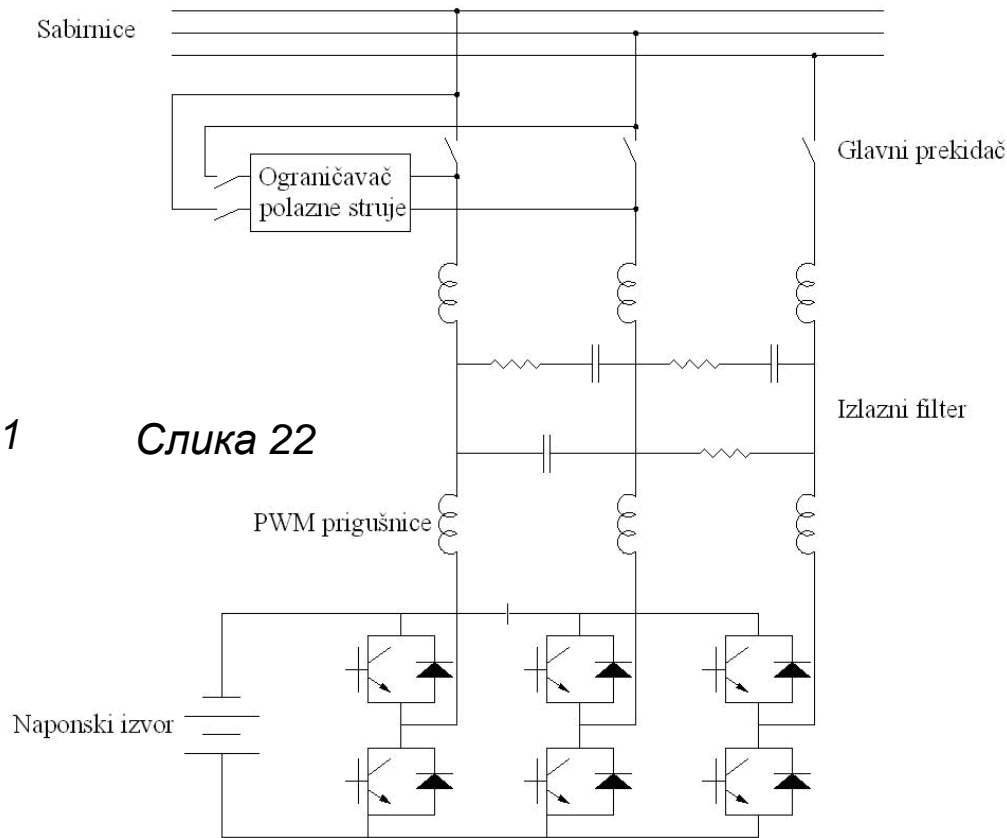


Слика 21

$$f_r = \frac{1 + Qq}{2\pi q \sqrt{(Q^2 - 1)LC}}$$

$$q = \frac{X_0}{r} \quad Q = \frac{R}{X_0} \quad X_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Активни филтер
(моћно, сигурно, флексибилно, али
скупо)



Слика 22

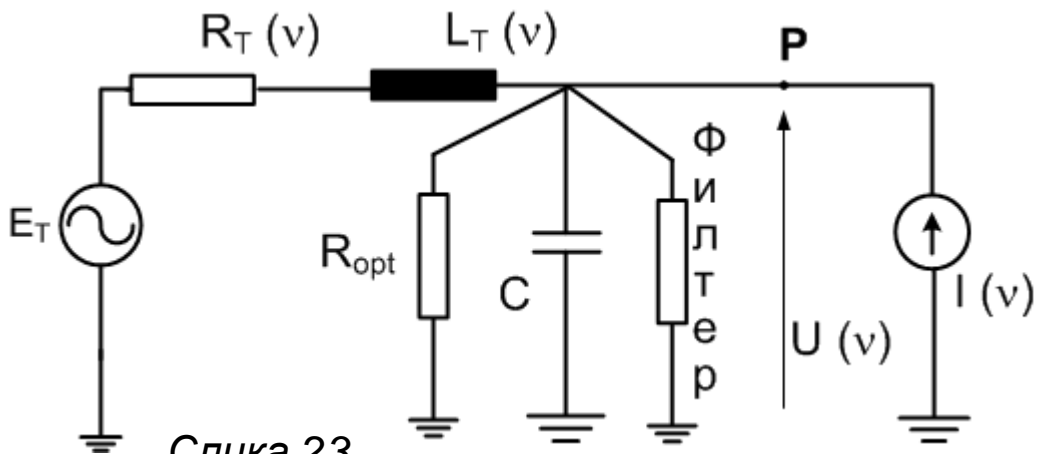
Код пасивних филтера постоји опасност од њиховог струјног преоптерећења и у случају уградње нових нелинеарних пријемника, јер код њих, за разлику од активних филтера, не постоји могућност контроле.

Отклањање потенцијалне недоумице о пригушници

- У досадашњем излагању, пригушница се појављивала као елемент:
 - који спречава анти-резонансу (*detuned reactor*)
 - који, у оквиру филтра, формира малу импедансу за хармоник који се филтрира
- У електроенергетским постројењима пригушница се може срести и као елемент за ограничење полазне струје при прикључењу кондензатора (IEC 60871-1):
 - на мрежу
 - на сабирнице на којима постоје прикључени други кондензатори

Потенцијална опасност код пасивних филтера

Имајући у виду слику 19 и слику 11, може се нацртати слика 23.



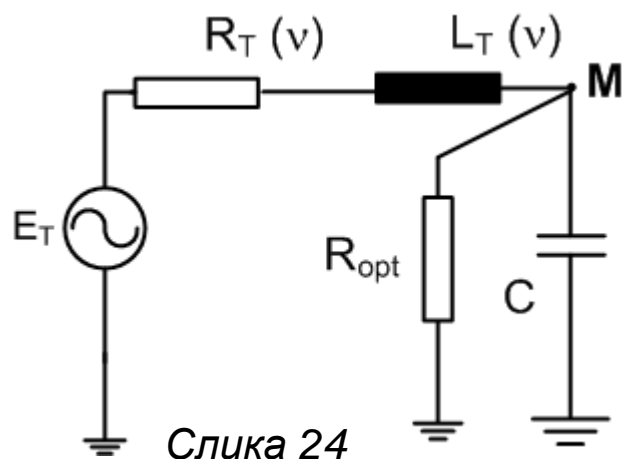
Слика 23

Може да се деси да “туђи хармоници” (генерисани “ко зна где”) прођу кроз “наш филтер”, јер филтер представља кратак спој.

Ова могућност је већа што су “комшијски хармоници” ближи – пример: фабрика ферт гредица као суседни објекат са сопственим 10/0.4kV трансформатором: тада би хармоници из фабрике ферт гредица имали две паралелне путање – 1. преко нашег трансформатора и филтра као кратког споја за хармонике и 2. у мрежу 10kV, укључујући и напојне трансформаторе мреже 10kV и импедансе мрежа на које су прикључене вишенапонске стране тих трансформатора.

Осим у описаном случају пасивних филтера, ефекат “скупљања туђих хармоника” може да се догоди и у случају елементарне примене кондензатора за компензацију реактивне снаге основног хармоника. На слици 24 је приказан случај да у нашој инсталацији нема нелинеарних пријемника, али да у мрежи постоје виши хармоници напона настали као последица присуства нелинеарних пријемника у другим деловима електроенергетског система.

За исту учестаност за коју је долазило до **анти-резонансе** (слика 17) – појава великих напонских изобличења и струја виших хармоника кроз мрежу и кондензатор услед струјних хармоника нелинеарних пријемника у сопственој инсталацији, долази и до **резонансе** - појава великих струја виших хармоника кроз мрежу и кондензатор услед струјних хармоника нелинеарних пријемника распоређених по мрежи.



Слика 24

Уградњом антирезонантна пригушнице (*detuned reactor*) се отклања и овај проблем (опасност).

Конкретна процена опасности од последица резонансе / анти-резонансе

Опасна ситуација је да анти-резонантна учестаност постане мала, односно да:

- адмитанса на коју наилазе струјни хармоници из наше инсталације, односно
- импеданса на коју наилазе струјни хармоници из мреже

буде мала.

Суштина је да су виши хармоници по правилу већи за ниже хармонике (на пример за 5. и 7.), односно да опадају са порастом реда хармоника, па опадање анти-резонантне учестаности значи да ће се велика еквивалентна импеданса на коју наилазе хармоници из наше инсталације наћи у зони у којој су струјни хармоници велики, па ће бити велики и напонски хармоници, добијени као производ еквивалентне импедансе и струје хармоника.

| | C (kVAr) | 100 | 200 | 300 | 400 |
|-----------|----------|------|------|-----|-----|
| Snt (kVA) | | | | | |
| 250 | | 7,1 | 5,0 | | |
| 400 | | 8,9 | 6,3 | 5,2 | 4,5 |
| 630 | | 11,2 | 7,9 | 6,5 | 5,6 |
| 1000 | | 14,1 | 10,0 | 8,2 | 7,1 |

Ред анти-резонантне учестаности

Прорачуни и димензионисање опреме

Каблови / ваздушни водови:

- Повећање ефективне вредности струје
- Отпор је већи за више учестаности (дубина продирања $\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}}$ је мања; дубина проводника практично представља ефективни пресек проводника који се користи)
- Ако постоји метални плашт, кроз њега ће се затварати циркулационе струје које настају као резултат триплих хармоника струје
- Кроз нулу ће се јавити трипли хармоници струје који су 3 пута већи од триплих хармоника струје кроз фазне проводнике
- Да не остане непрецизно: у случају несиметрије оптерећења по фазама, у нултом проводнику ће се јавити сви хармоници, укључујући и основни; исто важи и за флукс који изазива циркулационе струје у металном плашту.

Трансформатор:

- Повећање ефективне вредности струје

- ... Сећате се Филдовог фактора... однос укупних губитака у намотају и укупних губитака једносмерној струји...

$$\Delta k_f \approx \left(\frac{\pi \mu_0 f}{\rho} \right)^2 \frac{m^2 q^4}{9}$$

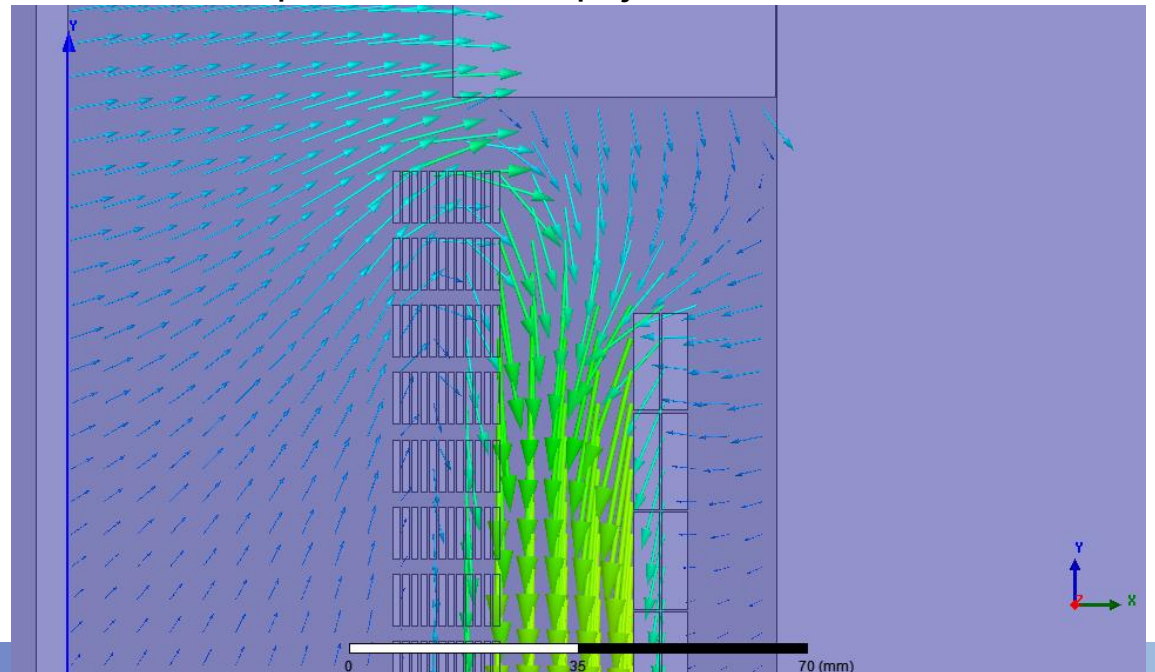
... Степен повећања губитака зависи од квадрата

учестаности...

- Модерне теорије и алати... потребни за одређивање расподеле поља, губитака и температура чак и у случају синусних струја, тако да процена загревања када постоји висок садржај хармоника струје дефинитивно није нешто што треба и може да ради “обичан пројектант”.

За трансформаторе за које се зна да ће радити у режимима са јако изобличеним струјама (пећни трансформатори, на пример), овакве провере врше произвођачи.

Слика 25



Кондензатор:

- Поступак провере загревања, копиран из једног доброг каталога

1. Reactive power of the capacitor for each present harmonic
Blindleistung des Kondensators für jede auftretende Oberschwingung

$$Q(f_i) = U_i^2 \cdot 2\pi f_i \cdot C$$

2. Dissipation loss factor for each occurring harmonic frequency f_i
Verlustfaktor für jede auftretende Oberwellenfrequenz f_i

$$\tan \delta(f_i) = \tan \delta_0 + 2\pi f_i \cdot R_s \cdot C \quad \tan \delta_0 = 2 \cdot 10^{-4}$$

3. Total dissipation loss power
Gesamtverlustleistung

$$P_V = Q_{50\text{Hz}} \cdot \tan \delta_{50\text{Hz}} + \sum_{i=3}^n Q_i(f) \cdot \tan \delta_i(f)$$

4. Build- up of heat inside the capacitor
Eigenerwärmung des Kondensators

$$\Delta T = P_V \cdot R_{th}$$

- f_i Harmonic frequency Oberwellenfrequenz
 U_i Harmonic voltage Oberwellenspannung
 R_{th} Thermal resistance of the capacitor
..... thermischer Widerstand des Kondensators
 R_s Series resistance of the capacitor
..... Serienwiderstand des Kondensators

5. Calculation of the hotspot temperature
Bestimmung der Hotspot-Temperatur

$$\Theta_{\text{HOTSPOT}} = \Theta_{\text{AMBIENT}} + \Delta T$$

Обновљиви извори

- По правилу, фотонапонски- и ветро- извори енергије се на мрежу прикључују преко полупроводничког претварача. Један од најважнијих аспеката при пројектовању претварача и (дигиталног) реализацији алгоритама управљања коришћењем микро контролера је како смањити рипл струје и хармонике
- Овај аспект има одлучујући утицај на кључне параметре претварача - тежину и цену мрежне пригушнице (*choke*), као и степен искоришћења. У вези са тим, значајна је и вредност максималне могуће учестаности рада полупроводничких компоненти (учестаности прекидања), као и ресурса и такта микро контролера – повећање учестаности, за исту мрежну пригушницу, смањује рипл.
- Наравно, компоненте које могу да раде на вишој учестаности (SiC, GaN), као и моћнији микро контролери, су скупљи, што треба сагледати при анализи цене комплетног претварача.
- Како год, претварачи (на пример соларни инвертор) морају да испуне захтеве који се постављају у стандардима (да су хармонијска изобличења мања од дозвољених) – такав услов постоји и у ТП16. Поред тога, они засигурно **представљају изворишта виших хармоника**, односно инјектирају хармонике у мрежу (у области виших учестаности – веће од kHz).

Мрежни анализатори

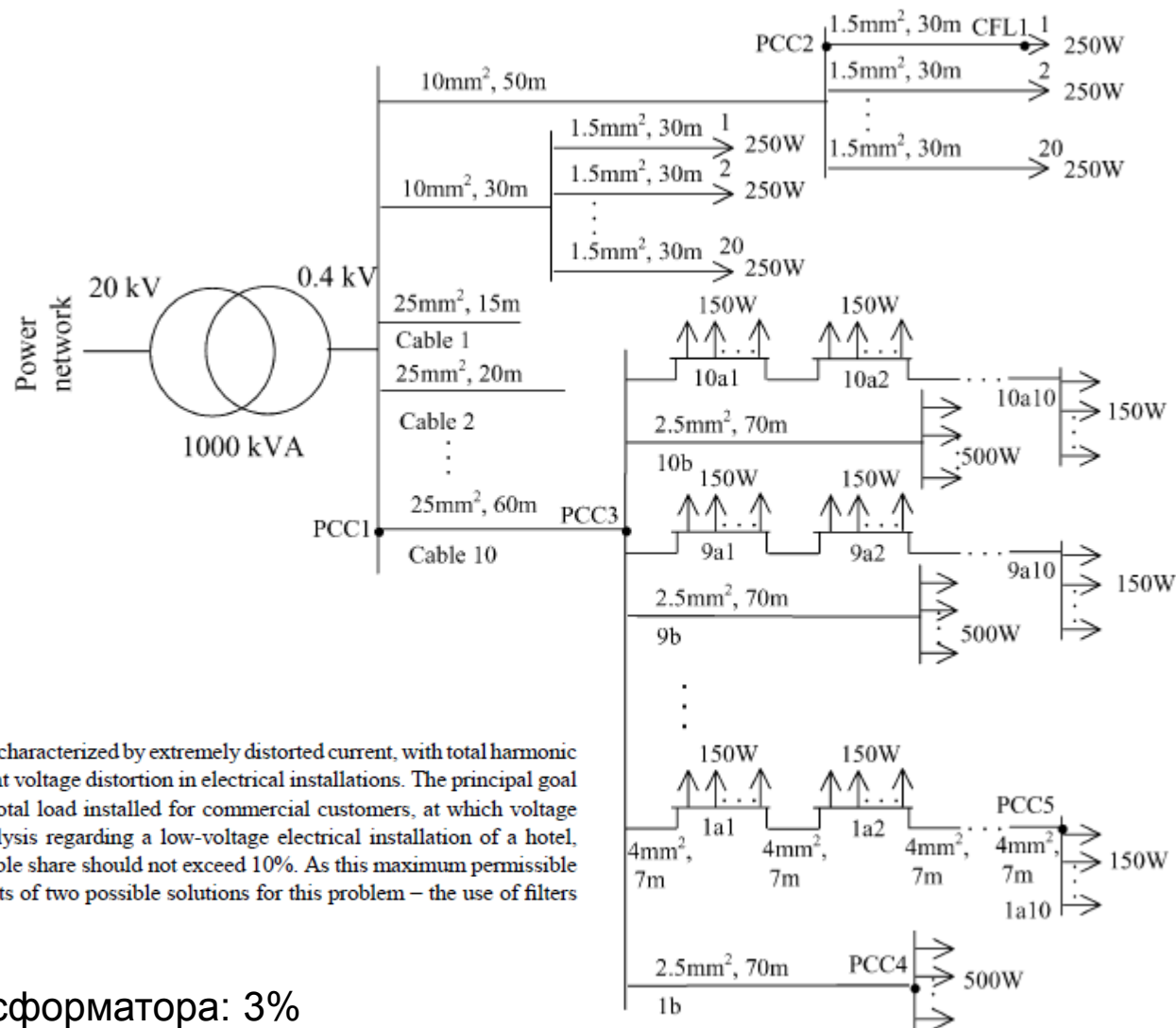
Модерни мерни уређаји, који се везују као што су се везивали класични ватметри, омогућавају мерење и архивирање података основног хармоника и виших хармоника (типично до 50.-тог), и то за низ величина (струја, напона, снага, фактор снаге основног хармоника, посебно за сваку од фаза).

Најједноставнија примена мрежних анализатора:

Провера да ли су хармоници унутар опсега дозвољеног у стандардима.

Могу се користити да се добију подаци о хармонцима у мрежи за коју се намерава извођење компензације реактивне снаге основног хармоника. Таква мерења омогућавају и избор оптималног броја степени регулисане кондензаторске батерије и вредности појединачних степени.

Пример – инсталација у једном објекту са масовном применом CFLs [3]

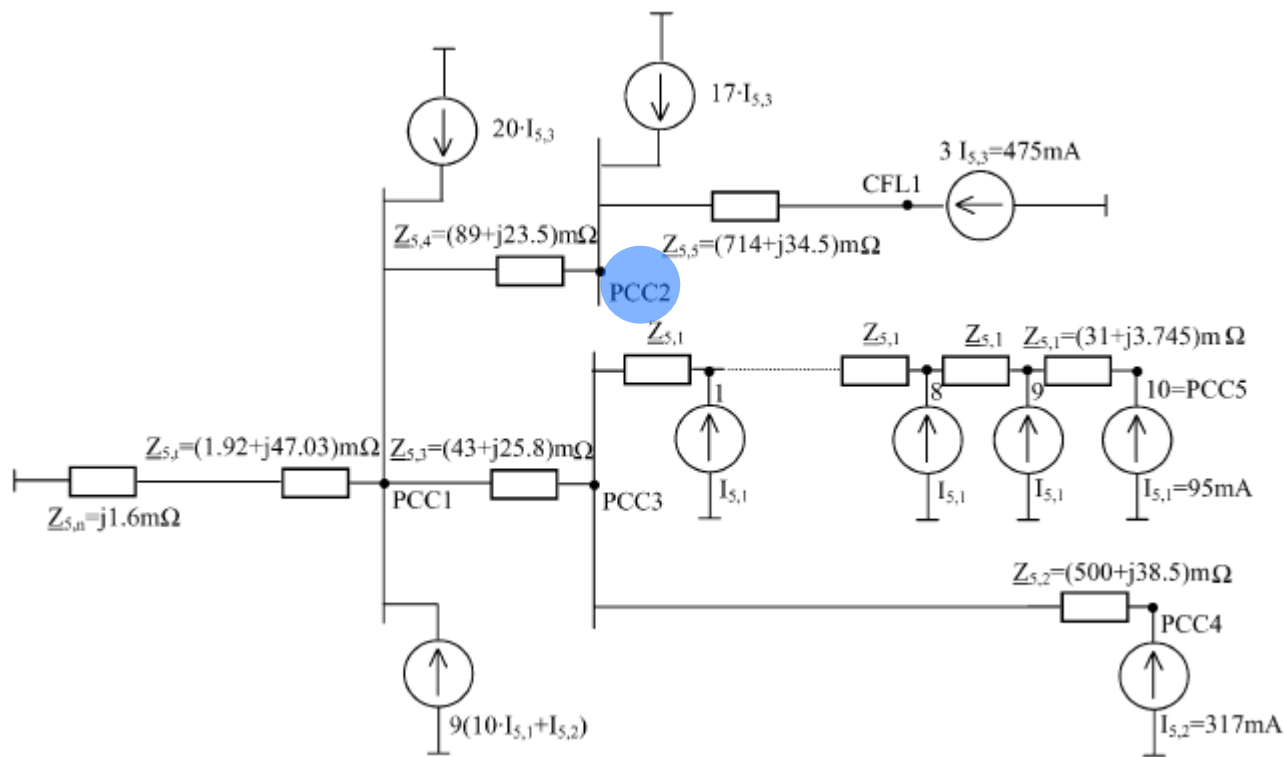


Abstract

Commonly used compact fluorescent lamps (CFLs) with electronic gear are characterized by extremely distorted current, with total harmonic distortion (THD) usually exceeding 100%. That is why they cause a significant voltage distortion in electrical installations. The principal goal of this research was to determine their maximum permissible share in the total load installed for commercial customers, at which voltage distortion is still acceptable (according to international standards). An analysis regarding a low-voltage electrical installation of a hotel, representing a typical commercial customer, showed that maximum permissible share should not exceed 10%. As this maximum permissible share could restrict the installment of the intended quantity of CFLs, the costs of two possible solutions for this problem – the use of filters or a new generation of CFLs with a high power factor – are compared.

Удео CFLs у номиналној снази трансформатора: 3%

Fig. 1. The CFLs power distribution in a low-voltage installation of a commercial building.



Импредансни модел за пети хармоник –
 ситуација без компензације реактивне снаге основног хармоника

Повећање хармоника у PCC2 као последица компензације реактивне снаге основног хармоника

| | Harmonics | | | | | | | | | THD |
|----------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 3rd | 5th | 7th | 9th | 11th | 13th | 15th | 17th | 19th | |
| u_{PCC2} (%) | 1.086 | 0.585 | 0.713 | 3.781 | 0.285 | 0.124 | 0.074 | 0.047 | 0.032 | 4.053 |
| Increase (%) | 2.45 | 28.85 | 118.0 | 1260 | 61.02 | -29.5 | -66.4 | -73.3 | -81.8 | 212.0 |

$$n_{ar} = \sqrt{\frac{S_{sc}}{Q_C}} = \sqrt{\frac{16140 \text{ kV A}}{224.1 \text{ kV Ar}}} = 8.49$$

Решења која омогућавају повећање снаге CFLs које се смеју прикључити:

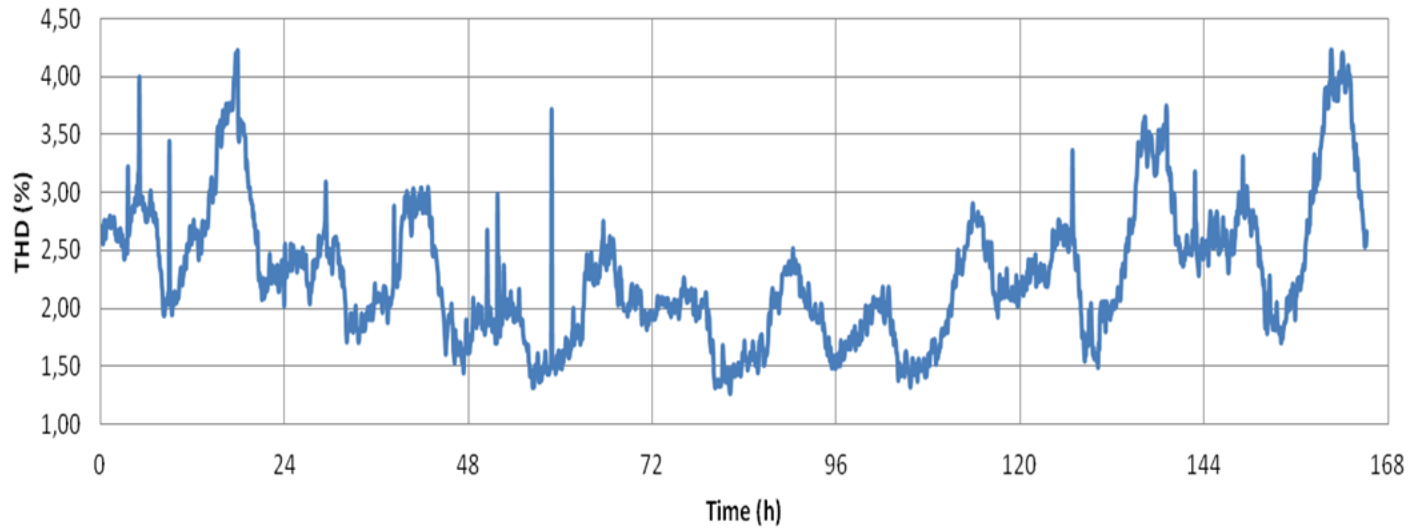
- Филтрација на нисконапонским сабирницама трансформатора
- Уградња филтера по разводним орманима
- Примена CFLs са високим фактором снаге

Пример – Типска решења за компензацију реактивне снаге у трансформаторским станицама 66/11kV

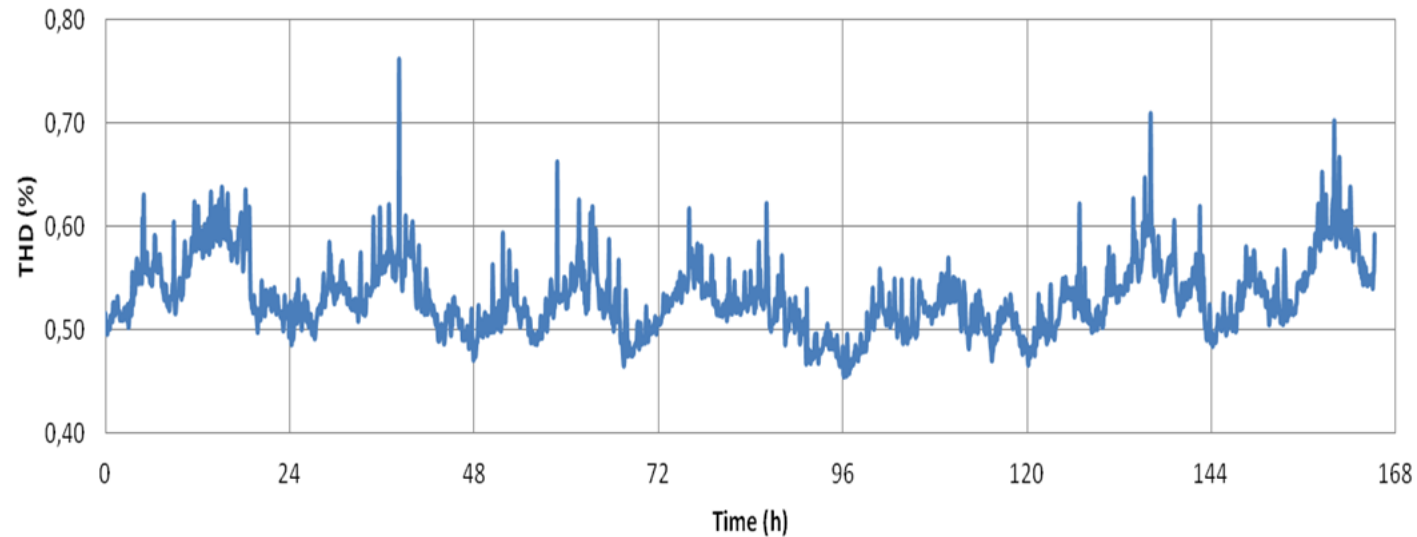
Пројекат у Дохи, Катар: на бази таквих мерења на 11kV страни типичних трансформаторских станицама 66/11kV су дефинисана типска решења за компензацију реактивне снаге у трансформаторским станицама са 5 типичних конзума:



| Types of Load |
|--------------------------------|
| Zone with Commercial Buildings |
| Zone with Residential Villas |
| Zone with Residential Flats |
| Zone with Hotels and Malls |
| Light Industry Zone |



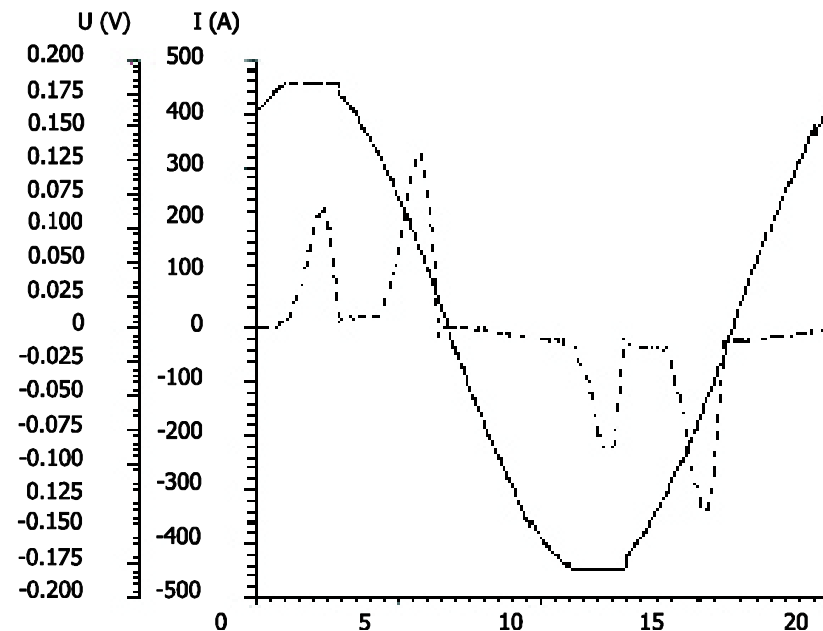
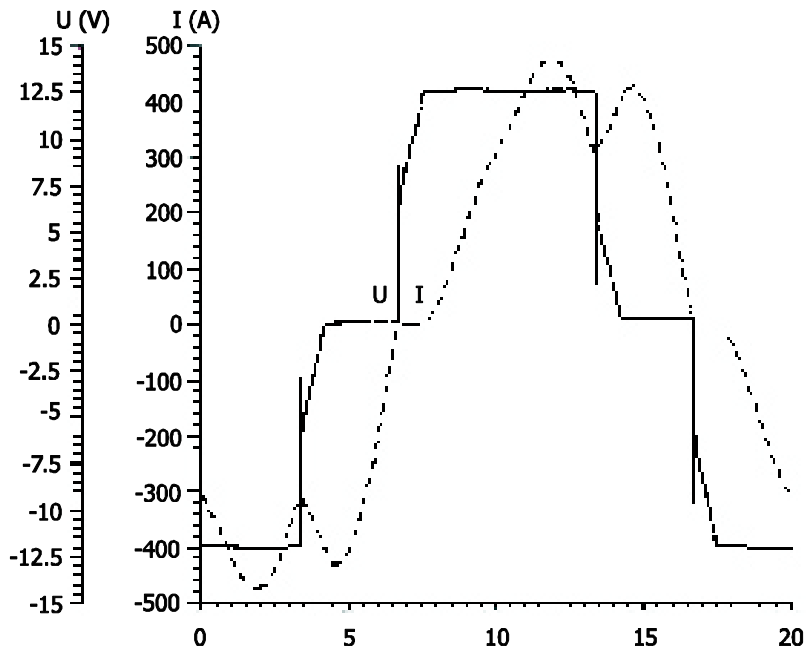
Increase of harmonics of voltage of order 5, 7, 11 and 13 due to compensation with 12MVAR (without detuning reactor)



Increase of harmonics of voltage of order 5, 7, 11 and 13 due to compensation with 12MVAR (with detuning reactor for 189Hz)

Пример – Инсталација са нелинеарним пријемницима напајана са дизел-електричног агрегата

Синхрони генератори мањих снага, као што је случај код дизел-електричних агрегата, су “мекши” извори (имају мању снагу кратког споја) од мреже, због чега су сви параметри квалитета електричне енергије, укључујући и хармонијска изобличења, критичнији.



Таласни облици струје и напона при нелинеарном оптерећењу (диодни мостни исптављач са RC оптерећењем на DC страни) синхроне машине: а) 78.9 % снаге и б) 0.255 % снаге

Математички модели за одређивање изобличења напона при специфицираним изобличеним струјама су много компликованији [4] и излазе из домена “стандардних инжењерских послова”.

У пракси, треба користити постојеће [софтвере произвођача дизел-електричних агрегата](#) - у добрим софтверима је могуће задати снагу и тип нелинеарног оптерећења, дозвољено изобличење напона, на основу чега програм предлаже агрегат који задовољава постављене критеријуме.

О савременим решењима енергетске електронике којима се смањује емисија виших хармоника

Уместо класичног диодног исправљача, према мрежи се поставља инвертор са активним прекидачима (обично IGBT транзистори) [5]. Инвертор је са PWM модулацијом и струја која се преузима из мреже је скоро синусна, односно елиминисани су хармоници ниских учестаности. Због начина рада инвертора постоје хармоници виших учестаности (учестаности прекидања), који су већ поменути на слајду о обновљивим изворима. Смањење ових хармоника се врши улазним филтром.

| Mitigation method | Circuit diagram | Typical current waveform |
|--|-----------------|--------------------------|
| No mitigation THD > 80% | | |
| DC inductors THD < 40% | | |
| AC inductors THD < 40% | | |
| Passive harmonic filter THD < 10% | | |
| Multi-pulse rectifier (12/18) THD < 10% | | |
| Active front end THD < 5% | | |
| Active filter THD < 5% | | Waveform similar to AFE |

Active front end
THD < 5%

[1]

http://www.ingkomora.rs/materijalpo/download/2015/Nastanak_posledice_i_zastita_od_visih_harmonika_u_niskonaponskim_instalacijama.pdf

[2] Радаковић, З., Јовановић, М. (2008): Специјалне електричне инсталације. Београд. Академска мисао. 280 страна.

[3] Radakovic, Z., Topalis, F., Kostic, M. (2003): The Voltage Distortion in Low Voltage Networks Caused by Compact Fluorescent Lamps with Electronic Gear. Electric Power Systems Research, Vol. 31, 817-829.

[4] Radakovic, Z., Janda, Z. (1995): Aspects of electric drives with U/f control feed from diesel-electric generator. Proceedings of VIII Power electronics conference, Novi Sad, 443-451.

[5] Danfos: Facts Worth Knowing about Frequency Converters,
http://www.danfoss.com/NR/rdonlyres/527D32A3-8DC5-4CF6-B47A-E66326AC5534/0/NEW_FactsWorthKnowing_EN_Web.pdf

Најчешће коришћени стандарди за хармонике:

- IEC/EN 61000-3-2, Limits for harmonic current emissions ($\leq 16\text{A}$ per phase)
- IEC/EN 61000-3-12, Limits for harmonic currents ($>16\text{A}$ and $\leq 75\text{A}$)
- IEC/EN 61000-3-4, Limitation of emission of harmonic currents ($> 16\text{A}$)
- IEC/EN 61000-2-2 and IEC/EN 61000-2-4 Compatibility levels for low frequency conducted disturbances
- IEEE519, IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems
- G5/4, Engineering recommendation, planning levels for harmonic voltage distortion and the connection of nonlinear equipment to transmission systems and distribution networks in the United Kingdom

1. Хармоници у мрежи потичу од:

а) Генератора у класичним електранама

б) Обновљивих извора, прикључених на мрежу преко полупроводничких претварача

ц) Нелинеарних пријемника

2. Опасност од појаве антирезонансе у случају компензације реактивне снаге:

а) Не зависи од снаге кратког споја на месту прикључка на мрежу

б) Може се елиминисати применом антирезонантних пригушница

ц) Зависи од спектра присутних хармоника и снаге кондензаторске батерије

3. Код мрежа у следећим типовима објеката ниво хармоника потенцијално може бити опасан:

а) Комерцијални и пословни објекти са сопственом трансформаторском станицом и компензацијом реактивне снаге

б) Само код електролучних пећи

ц) У електромоторним погонима са полупроводничким претварачима за регулацију брзине