



УНИВЕРЗИТЕТ "СВ. КИРИЛ И МЕТОДИЈ"  
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ – СКОПЈЕ  
Настава на постдипломски студии на проектот:

ЕКОНОМСКИ ИСПЛАТЛИВИ И ЕКОЛОШКИ ЕНЕРГЕТСКИ СИСТЕМИ  
(COST EFFECTIVE&ENVIRONMETNALLY FRIENDLY ENERGY SYSTEMS)

## **НАСТАВА ПО ПРЕДМЕТОТ:**

### **" КВАЛИТЕТ НА ЕЛЕКТРИЧНАТА ЕНЕРГИЈА " ( P O W E R   Q U A L I T Y )**

Материјал изработен од:  
проф. д-р Јовица Милановиќ, УМИСТ-Манчестер  
и предавачите на CARDS-универзитетите:  
доц. д-р Амир Токиќ, ЕТФ – Тузла,  
проф. д-р Владимир Катиќ, ТФ- Нови Сад  
проф д-р Ристо Ачковски, ЕТФ – Скопје

Манчестер, Тузла, Нови Сад, Скопје, 2005/2006 г.

# **I ДЕЛ. ОПШТО ЗА ПРОБЛЕМОТ НА КВАЛИТЕТ НА ЕЛЕКТРИЧНАТА ЕНЕРГИЈА И ПРЕОДНИТЕ ПРОЦЕСИ (ТРАНЗИЕНТИ)**

(Припремил доц. д-р А. Токиќ, ЕТФ – Тузла)  
(дообработка – проф. д-р Ристо Ачковски)

## ***С о д р ж и н а:***

- 1.    ВОВЕД ВО ПРОБЛЕМАТИКАТА НА КВАЛИТЕТОТ  
НА ЕЛЕКТРИЧНАТА ЕНЕРГИЈА (PQ)**
- 2.    ПОИМИ И ДЕФИНИЦИИ ВО ОБЛАСТА PQ**
  - 2.1. Транзиенти (преодни појави)**
  - 2.2. Краткотрајни варијации на напонот**
    - пропади на напонот (напонски јами)
    - пораста на напонот
  - 2.3. Долготрајни варијации на напонот**
    - поднапон
    - пренапон
  - 2.4. Прекини во напојувањето**
    - хармоници
    - засеци
    - шумови
  - 2.5. Дисторзија (изобличување) на обликот на кривата на напонот**
  - 2.6. Флукутации на напонот (фликери)**
  - 2.7. Варијација на фреквенцијата**
    - Категории и карактеристики на електромагнетните феномени
- 3.    НАПОНСКИ ТРАНЗИЕНТИ (ПРЕОДНИ ПРОЦЕСИ)**
  - 3.1. Класификацијата на пренапоните според IEC 71-1**
  - 3.2. Транзиенти кои се последица на атмосферските празнења**
  - 3.3. Пренапони при вклучување на јиндензаторските батерии**
  - 3.4. Ферорезонанција**
  - 3.5. Пренапони при вклучување на трансформатори во празен од**
  - 3.6. Основни принципи на пренапонската заштита**
  - 3.7. Уреди за заштита од пренапони**
    - метал-оксидни одводници на пренапони (МОП)
    - нископропусни електрични филтри
    - изолациони трансформатори

# 1. UVOD U KVALITET ELEKTRIČNE ENERGIJE

## (ВОВЕД ВО КВАЛИТЕТОТ НА ЕЛЕКТРИЧНАТА ЕНЕРГИЈА – PQ)

Termin kvalitet električne energije počinje se intenzivno koristiti sredinom osamdesetih godina prošlog vijeka kada na nju počinju značajno obraćati pažnju kako isporučioци tako i krajnji korisnici električne energije.

Zavisno od tačke gledišta, postoje različite definicije kvaliteta električne energije. Tako npr. sistem isporuke električne energije može definisati kvalitet električne energije kao pouzdanost i pokazati statistiku koja demonstrira da je njihov sistem 99.98% pouzdan.

S druge strane proizvođači električne opreme definišu kvalitet električne energije kao karakteristike sistema napajanja koji obezbjeđuje ispravan rad električne opreme.

U svakom slučaju, odmah se mora naglasiti da je problem kvaliteta električne energije prije svega vezan za krajnjeg kupca tj. potrošača električne energije.

### Definicija 1:

Kvalitet električne energije se odnosi na studiju izvora, posljedica i kontrola poremećaja koji se prenose preko električnog sistema napajanja.

### Definicija 2:

Kvalitet električne energije predstavlja bilo koji problem manifestovan u deformacijama napona, struje ili frekvencije a koji za posljedicu ima kvarove ili pogrešan rad električne potrošačke opreme.

Međutim, mora se naglasiti da postoji mnogo neslaganja u vezi uzroka narušavanja kvaliteta električne energije. Slika 1.1 pokazuje statističke rezultate Georgija Power Company U.S.A. gdje se jasno vidi da su uzroci u problemima kvaliteta električne energije značajno različiti sa stanovišta isporučioца (prodavca) i potrošača (kupca) električne energije. To dolazi iz razloga što pogrešno funkcionisanje ili potpuni prekidi rada električne opreme ne moraju biti statistički registrovani kod isporučioца električne energije. Tako npr. skorašnja istraživanja u U.S.A. na jednom primjeru rada električne opreme pokazuju da su se potpuni prekidi rada opreme desili 30 puta u toku 9 mjeseci, dok je u distributivnom sistemu registrovano svega 5 operacija isključenja prekidača.

U svakom slučaju, pojam kvaliteta električne energije sve više dolazi do izražaja posljednjih godina jer električni potrošači postaju veoma zavisni o kvalitetu napajanja s obzirom da su sve više bazirani na elektroničkim odnosno mikroprocesorskim komponentama koje su vrlo osjetljive na poremećaje u napajanju. Osim toga, kvalitet električne energije je danas dodatno aktualizovan s obzirom na liberalizaciju tržišta električne energije.

U uslovima deregulisanog tržišta električne energije, kada električna energija postaje roba kao i svaka druga roba, ona mora zadovoljiti određen kvalitet koji je definisan od strane potrošača električne energije kao kupca. Normalno, s tim u vezi i potrošači, isto kao i proizvođači električne energije, moraju zadovoljiti odgovarajuće standarde u vezi kvaliteta električne energije.

Normalne sklopne operacije sa kondezatorskim baterijama za popravku fakora snage, zatim uključivanja ili isključivanja slabo opterećenih transformatora ili nadzemnih vodova, atmosferska pražnjenja itd. dovode do prelaznih pojava koje imaju značajan uticaj na kvalitet električne energije.

Dodatno, na pogoršan kvalitet električne energije također utiče sve veći broj nelinearnih potrošača koji generišu harmonike struje koji za posljedicu imaju deformacije napona napajanja. Istovremeno, upravo ovi nelinearni potrošači su sve više osjetljivi na deformacije napona napajanja.

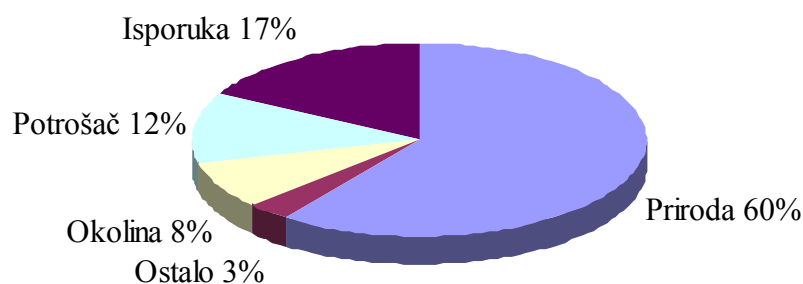
Također, u današnjim uslovima kompleksnih proizvodnih procesa koji su praćeni velikim brojem elektroničkih i elemenata automatske regulacije i upravljanja, bilo koja greška u funkcionisanju neke komponente sistema nužno dovodi do veoma značajnih ekonomskih posljedica.

Električna energija je proporcionalna naponu i struji. Međutim, isporučilac može jedino kontrolisati kvalitet napona napajanja, odnosno on ne može upravljati strujama pojedinačnih potrošača. Bilo koja značajna deformacija amplitude, frekvencije ili talasnog oblika napona napajanja je potencijalni izvor narušenog kvaliteta električne energije. Zato se često pojam kvaliteta električne eneregije identifikira sa pojmom kvaliteta napona napajanja. Normalno, napon i struja se ne mogu kruto i potpuno nezavisno posmatrati budući da su ove dvije veličine uvijek međusobno povezane. Naime, deformisana struja potrošača, zajedno sa impedansom sistema, može da ima za posljedicu različite deformacije naponskog talasa napajanja, i pod pretpostavkom da generatori na izlasku iz elektrana proizvode gotovo idealan sinsoidalni napon. Tako npr. u slučaju nelinearnog potrošača njegova

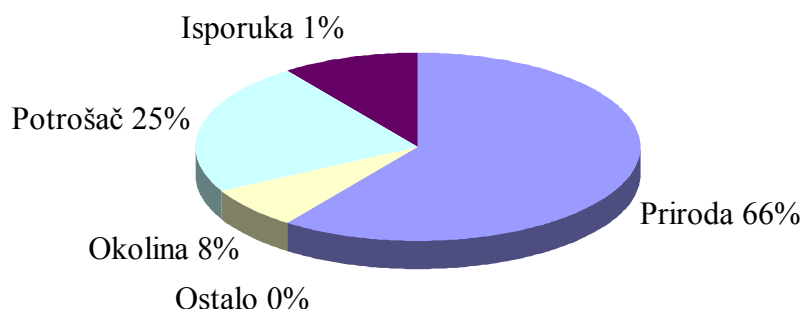
nesinusoidalna struja zajedno sa impedansom sistema utiče na moguću deformaciju napona na njegovim priključcima koji može istovremeno napajati i druge potrošače.

Na kraju treba istaći da je osnovni razlog proučavanja problematike kvaliteta električne energije prije svega vezan za ekonomske razloge. Nisu rijetki primjeri da kratkotrajni prekidi napajanja nekih industrijskih kompleksa dovode do katastrofalnih finansijskih gubitaka po njih tako da su potrošači danas sve više zainteresovani sa podizanjem nivoa kvaliteta električne energije. Npr. nisu rijetki primjeri koji pokazuju da prekidi napajanja nekih industrijskih postrojenja manji od 0.1 sec imaju za posljedicu gubitke od oko \$ 200 000, ili prekidi reda 2 sec imaju za posljedicu gubitke veće od \$ 600 000.

### Gledište potrošača



### Gledište isporučioaca



Slika 1.1 Rezultati istraživanja uzroka problema kvaliteta električne energije, *Georgia Power Comp.*

Ukratko se može ponoviti da je **interes za analizu kvaliteta električne energije** u posljednje vrijeme u stalnom porastu zbog **sljedećih razloga**:

- električna i elektronička oprema postaju **sve više osjetljiva** na poremećaje u naponu
- upravo električna i elektronička oprema **sve više generiše poremećaje u naponu**
- kvalitet električne energije ima naročit **značaj u uslovima deregulisanog tržišta** i
- razvojem savremenih mjernih uređaja, danas se kvalitet električne energije relativno **jednostavno može mjeriti i memorisati**.

## 2. POJMOVI I DEFINICIJE U OBLASTI KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE

### (ПОИМИ И ДЕФИНИЦИИ ВО ОБЛАСТА PQ)

Postoje **dvije glavne kategorije** problema u analizi kvaliteta električne energije a to su:

a) **Poremećaji:** (*поремећувања, нарушувања*)

Tranzijenti (*преодни процеси*)

Propadi i porasti napona (*напонски јами и порастии*)

Prekidi u napajanju (*прекини во напојувањеџо*)

b) **Stacionarne varijacije:** (*стационарни варијации*)

Regulacija napona

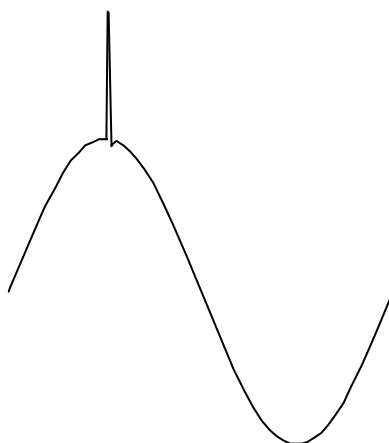
Harmonijska distorzija

Flikeri napona

### 2.1 TRANZIJENTI (*ПРЕОДНИ ПРОЦЕСИ*)

Tranzijenti se odnose na kratkotrajne i neželjene promjene talasnih oblika napona ili struje nastali pri tranziciji električnog sistema iz jednog u drugo stacionarno stanje.

**Impulsivni tranzijent:** (*импулсен пренапон*)



Slika 2.1.1 Impulsivni tranzijent

Impulsivni tranzijent predstavlja **kratkotrajni poremećaj** velike **amplitudne vrijednosti**, velike **brzine uspona**, veoma **brze promjene** stacionarnog stanja talasnih oblika napona i/ili struje i **jednosmjernog polariteta** (dominantno ili pozitivnog ili negativnog).

*Frekventno područje:* > 5 kHz (visoka frekvencija)

*Dužina trajanja:* 30 – 200 μsec

***Uzroci:***

Atmosferska pražnjenja

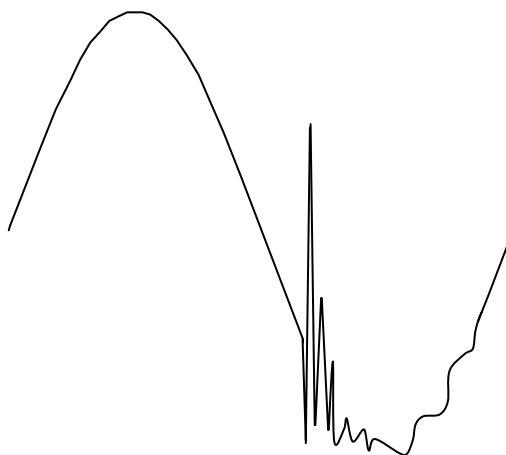
***Posljedice:***

Kvarovi transformatora

Kvarovi odvodnika prenapona

Oštećena električne opreme

**Oscilatorni tranzijent:** (осцилаторен пренапон)



**Slika 2.1.2 Oscilatorni tranzijent**

Impulsivni tranzijent predstavlja privremenu i brzu flukvaciju stacionarnog stanja talasnih oblika napona i/ili struje, i dvosmijernog polariteta (uključuje pozitivan i negativan polaritet).

*Niskofrekventni tranzijenti:* < 500 Hz

*Trajanje:* < 30 perioda

***Uzroci:***

Uključivanje/isključivanje kondezatorskih baterija

***Posljedice:***

Kvarovi osjetljive električne opreme

Povećanje napona na mjestu ugradnje kondezatorskih baterija

*Srednjefrekventni tranzijenti:* 500 Hz – 2 kHz

*Trajanje:* < 3 perioda



***Uzroci:***

Putujući talasi nastali kao posljedica djelovanja atmosferskih pražnjenja

Uključivanje/isključivanje kondenzatorskih baterija ili prekidača

***Posljedice:***

Kvarovi osjetljive električne opreme

*Visokofrekventni tranzijenti:* > 2 kHz

*Trajanje:* < 0.5 perioda

***Uzroci:***

Uključivanje sekundarnih sistema

Lokalna ferorezonancija

Indukovanje nastalo djelovanjem atmosferskih pražnjenja

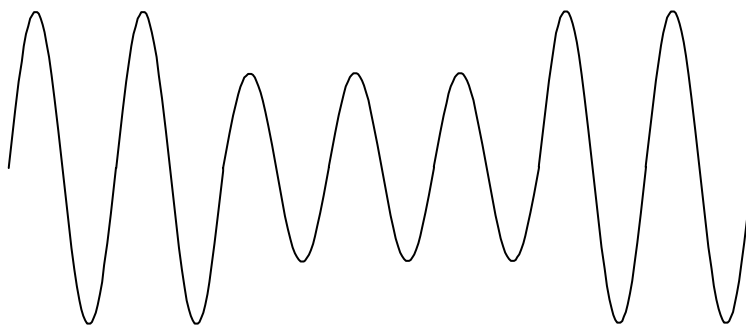
***Posljedice:***

Kvarovi osjetljive elektroničke opreme

Šum nastao ovim tranzijentom može oštetiti osjetljivu elektroničku opremu

Veoma brz uspon oscilacija može dovesti do zanemarenja napajanja u niskonaponskom sistemu

## **2.2 KRATKOTRAJNE VARIJACIJE NAPONA**

***Propad napona:***

**Slika 2.2.1 Propad napona**

Propad napona predstavlja smanjenje efektivne vrijednosti napona ili struje na vrijednost između 0.1 i 0.9 p.u., pri nazivnoj frekvenciji čija je dužina trajanja od 0.5 period do 1 min.

***Uzroci:***

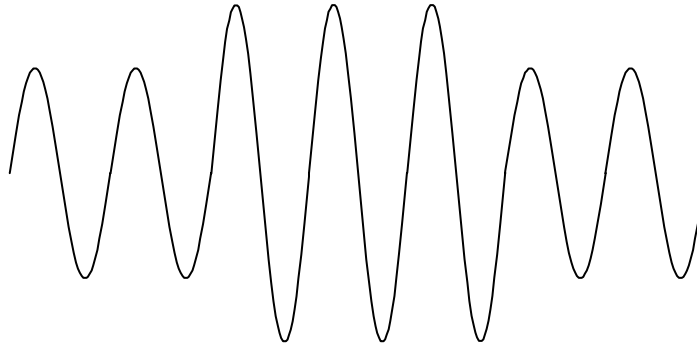
Lokalni i udaljeni kratki spojevi

Startovi motora velike snage

**Posljedice:**

Ispadi osjetljive električne opreme

**Porast napona: (voltage swells)**



**Slika 2.2.2 Porast napona**

Porast napona predstavlja povećanje efektivne vrijednosti napona ili struje na vrijednost između **1.1** i **1.8 p.u.**, pri nazivnoj frekvenciji čija je dužina trajanja od **0.5** period do **1 min.**

**Uzroci:**

Jednofazni kratki spojevi sa zemljom (zemljospoj)

Ispadi motora velike snage

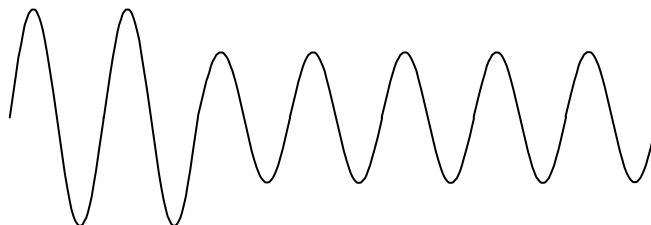
**Posljedice:**

Prenaponi na električnoj opremi

Oštećenja odvodnika prenapona koji preuzimaju prenapone na sebe

**2.3 DUGOTRAJNE VARIJACIJE NAPONA**

**Podnaponi: (undervoltages)**



**Slika 2.3.1 Podnapon**

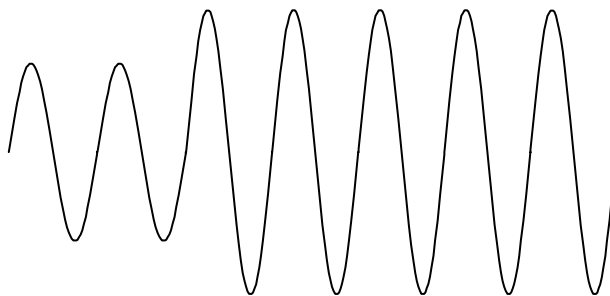
Podnapon predstavlja smanjenje efektivne vrijednosti izmjeničnog napona ispod **90 %** nazivne, pri nazivnoj frekvenciji čija je dužina trajanja veća od **1 min.**

***Uzroci:***

Uključivanje opterećenja  
Isključivanje kondenzatorskih baterija  
Sistem naponske regulacije

***Posljedice:***

Problemi sa opremom koja zahtijeva konstantan stacionarni napon napajanja

**Prenapon:**

**Slika 2.3.2 Prenapon**

Podnapon predstavlja povećanje efektivne vrijednosti izmjeničnog napona iznad **110 %** nazivne, pri nazivnoj frekvenciji čija je dužina trajanja veća od **1 min.**

***Uzroci:***

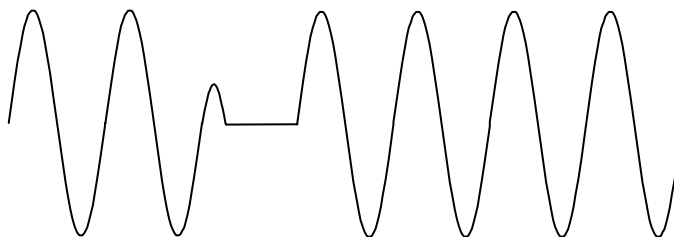
Rasterećenja ili potpuni ispadi opterećenja  
Uključivanje kondenzatorskih baterija  
Sistem naponske regulacije

***Posljedice:***

Problemi sa opremom koja zahtijeva konstantan stacionarni napon napajanja

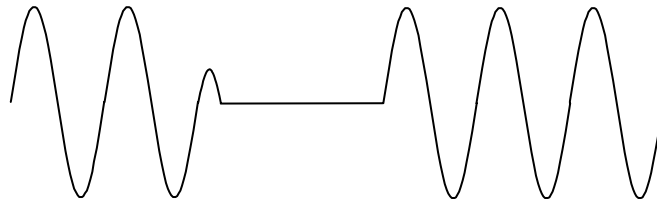
**2.4 PREKIDI NAPAJANJA**

Trenutni prekid napajanja: dužina trajanja **0.5 – 30 perioda**, amplituda napona **< 0.1 p.u.**



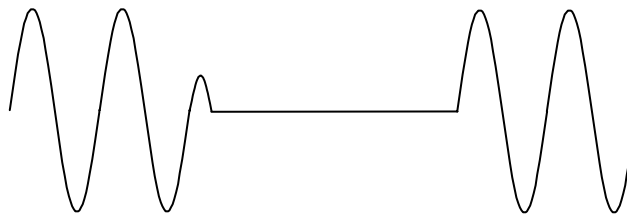
**Slika 2.4.1 Trenutni prekid napajanja**

Momentalni prekid napajanja: dužina trajanja 30 perioda – 3 sec, amplituda napona < 0.1 p.u.



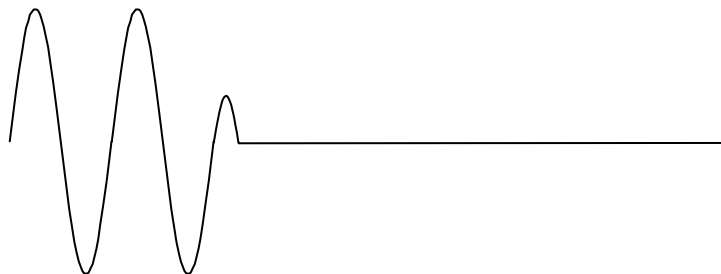
Slika 2.4.2 Momentalni prekid napajanja

Privremeni prekid napajanja: dužina trajanja 3 sec – 1 min, amplituda napona < 0.1 p.u.



Slika 2.4.3 Privremeni prekid napajanja

Dugotrajni prekid napajanja: dužina trajanja > 1 min, amplituda napona < 0.1 p.u.



Slika 2.4.4 Dugotrajni prekid napajanja

***Uzroci:***

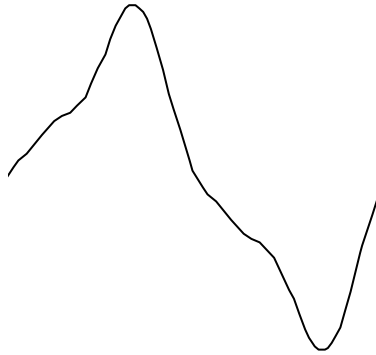
- Privremeni kratki spojevi
- Udar groma
- Otklanjanje kvara nastalog spojem dva voda preko drvenih komada
- Neotklonjeni kratki spojevi u sistemu

***Posljedice:***

- Prekidi rada, gubici u proizvodnji i gubici u poslovanju (dohotku)

## 2.5 DISTORZIJE TALASNIH OBLIKA

### Harmonici:



Slika 2.5.1 Tipičan talasni oblik koji nosi više harmonijske komponente

Nelinearni potrošači, kao što je elektronička oprema, generiše nesinusoidalne talasne oblike struje pri napajanju sinusoidalnim naponom napajanja. Ova opterećenja **injektiraju** više harmoničke komponente struje u sistem. Više harmoničke komponente struje, proticanjem duž impedansu sistema, imaju za posljedicu **distorziju napona** koja utiče na umanjenu pouzdanost i **skraćenje životnog vijeka** trajanja električne opreme. Praktično su interesantni viši harmonici reda od **0** do **100**.

### *Uzroci:*

Nelinearna opterećenja

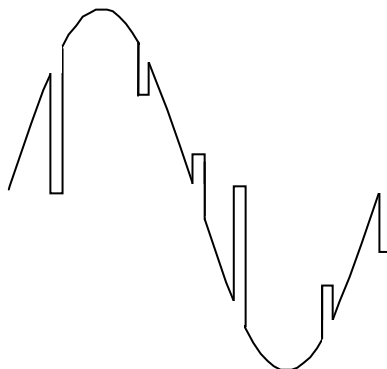
### *Posljedice:*

Neispravan rad osjetljive opreme

Kvarovi na kondenzatorima ili izgaranje osigurača

Interferencija sa sistemom telefonije

### Usjeci (urezi): (**зачеуи**)



Slika 2.5.2 Tipični usjeci (urezi) talasnog oblika napona

Usjeci (urezi) predstavljaju **periodičke poremećaje napona** uzrokovane normalnim radom **uređaja energetske elektronike** kada dolazi do **komutacije** struje iz jedne u drugu fazu.

***Uzroci:***

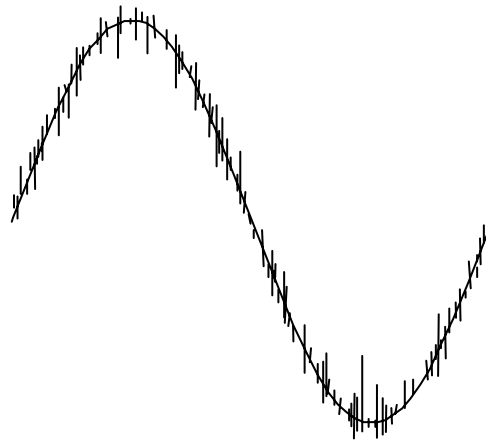
Normalan rad uređaja energetske elektronike

***Posljedice:***

Neispravan rad opreme

Kvarovi opreme

**Šumovi:**



**Slika 2.5.3 Tipičan talasni oblik šuma**

Šum predstavlja bilo koji **neželjeni električni širokopolasni signal** frekventnog spektra manjeg od **200 kHz** superponiran sa naponom sistema ili faznom strujom provodnika a koji se može identifikovati na neutralnom provodniku ili prenosnoj liniji.

***Uzroci:***

Nepravilno uzemljenje

Normalan rad elektroničke opreme

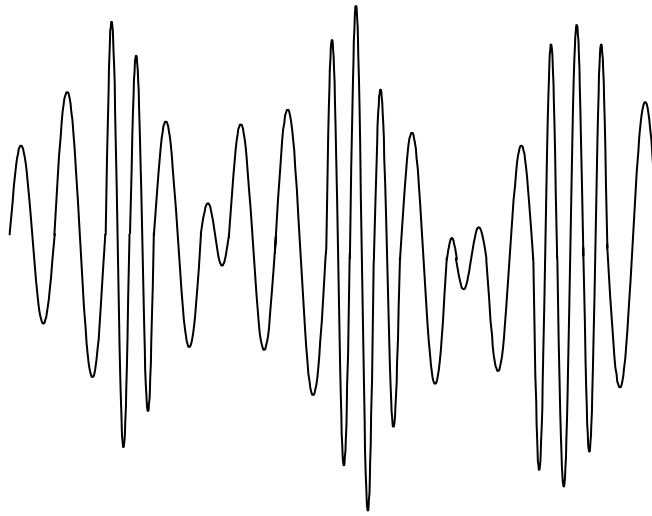
Uređaji koji rade na bazi električnog luka (elektrolučni transformator)

***Posljedice:***

Poremećeni rad elektroničkih uređaja kao što su mikroprocesori i programibilni kontroleri

## 2.6 FLUKTUACIJE NAPONA

### Fluktuacije napona – naponski flikeri:



Slika 2.6.1 Fluktuacije (flikeri) napona

Fluktuacije napona su pravilne varijacije envelope napona ili serije slučajnih promjena napona, sa amplitudama koje se uobičajeno kreću u granicama od 0.9 do 1.1 p.u. Flikeri napona su naponske fluktuacije pri kojima ljudsko oko postaje osjetljivo na promjene inteziteta svjetlosti električnih lampi. Ove fluktuacije uglavnom nastaju pri naglim promjenama struje opterećenja, naročito njene reaktivne komponente (efekat  $L \cdot di / dt$ ).

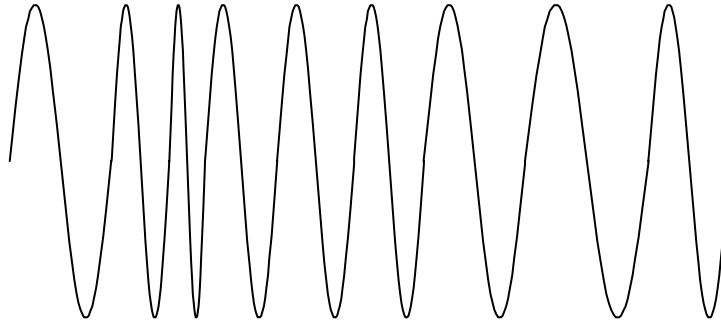
#### ***Uzroci:***

- Elektrolučne peći
- Pogoni intermitiranih opterećenja

#### ***Posljedice:***

- Svjetlosni fliker
- Neispravan rad osjetljivih potrošača

## 2.7 VARIJACIJE FREKVENCije



Slika 2.7.1 Primjer varijacije frekvencije

Varijacija frekvencije predstavlja odstupanje fundamentalne frekvencije sistema od njegove specificirane nazivne vrijednosti (50 Hz).

### ***Uzroci:***

- Slaba regulacije brzine lokalnih generatora
- Kratki spojevi na velikom dijelu elektroenergetskog sistema
- Ispadi velikih potrošačkih blokova (pogona)
- Ispadi generatorski jedinica velike snage

### ***Posljedice:***

- Kvarovi opreme

Tabela 2.I daje sumarni pregled različitih kategorija elektromagnetnih fenomena u elektroenergetskom sistemu, vezanih za probleme kvaliteta električne energije, s obzirom na njihov spektralni sadržaj, dužinu trajanja i amplitunde vrijednosti.

Bitno je napomenuti da se kratkotrajne varijacije prema vremenskom trajanju dijele na:

- trenutne: (ми́гновени) 0.5 – 30 perioda,
- momentalne: (моментальни) 30 perioda – 3 sec i
- privremene: (привремени) 3 sec – 1 min,

S druge strane, dugotrajne varijacije imaju vrijeme trajanja veće od 1 min.



Na kraju se treba istaći da se za identifikaciju, klasifikaciju i procjenu problema kvaliteta električne energije koriste različite metode i pristupi kao što su:

- brza Fourierova transformacija,
- Kalmanov filter,
- wavelet transformacija,
- kratkotrajna Fourierova transformacija,
- statističke metode,
- neuronske mreže,
- fuzzy logika,
- u posljednje vrijeme modifikovana wavelet –  $S$  transformacija itd.

**Tabela 2.I Kategorije i karakteristike elektromagnetnih fenomena**

Kategorija	Tipičan spektralni sadržaj	Tipična dužina trajanja	Tipična amplituda napona
<b>1.0 Tranzijenti</b>			
1.1 Impulsivni			
1.1.1 Nanosekundi	5 nsec uspon	< 50 nsec	
1.1.2 Mikrosekundi	1 µsec uspon	50 nsec – 1 msec	
1.1.3 Milisekundi	0.1 msec uspon	> 1 msec	
1.2 Oscilatorni			
1.2.1 Niskofrekventni	< 5 kHz		0 – 4 p.u.
1.2.2 Srednjefrekventni	5 – 500 kHz	0.3 – 50 msec	0 – 8 p.u.
1.2.3 Visokofrekventni	0.5 – 5 MHz	20 µsec	0 – 4 p.u.
		5 µsec	
<b>2.0 Kratkotrajne varijacije</b>			
2.1 Trenutne			
2.1.1 Prekid napajanja		0.5 – 30 perioda	< 0.1 p.u. 0.1 – 0.9 p.u. 1.1 – 1.8 p.u.
2.1.2 Propad napona		0.5 – 30 perioda	< 0.1 p.u.
2.1.3 Porast napona		0.5 – 30 perioda	0.1 – 0.9 p.u.
2.2 Momentalni			
2.2.1 Prekid napajanja		30 perioda – 3 sec	< 0.1 p.u. 0.1 – 0.9 p.u.
2.2.2 Propad napona		30 perioda – 3 sec	1.1 – 1.2 p.u.
2.2.3 Porast napona		3 sec – 1 min	p.u.
2.3 Privremeni			
2.2.1 Prekid napajanja		30 perioda – 3 sec	0.0 p.u.
2.2.2 Propad napona			0.8 – 0.9
2.2.3 Porast napona		3 sec – 1 min	1.1 – 1.2 p.u.
<b>3.0 Dugotrajne varijacije</b>			
3.1 Prekidi			
3.2 Podnaponi			0.5 – 2 %
3.3 Prenaponi		> 1 min	
<b>4.0 Nesimetrije napona</b>			
	0 – 100ti harmonik	> 1 min	0 – 0.1 %
	0 – 6 kHz		0 – 20 %

5.0 Distorzija naponskog talasa	širokopojasni	stacionarno stanje	0 – 2 %
5.1 DC offset			0 – 1 %
5.2 Harmonici	< 25 Hz		
5.3 Međuharmonici		stacionarno stanje	0.1 – 7 %
5.4 Usjek (urez)		stacionarno stanje	
5.5 Šumovi		stacionarno stanje	
6.0 Fluktuacije napona		stacionarno stanje	
7.0 Varijacije frekvencije napona		stacionarno stanje	
		stacionarno stanje	
		intermitirano	
		< 10 sec	

### 3. NAPONSKI TRANZIJENTI

Djelovanje **groma**, kvarovi kao i različite **sklopne manipulacije** unutar elektroenergetske mreže generišu tranzijente struje čije su posljedice prenaponi unutar elektroenergetskog sistema. U zavisnosti o vrijednostima **amplituda**, **dužini** trajanja i talasnom **obliku** ovi prenaponi mogu imati **neznatan uticaj** na normalan rad elemenata elektroenergetskog sistema i elektroničke opreme ili mogu prouzrokovati njihovo **pogrešno funkcionisanje**, kvarove i potpune ispade sa napojne mreže.

#### 3.1 KLASIFIKACIJA PRENAPONA: IEC 71-1

Prema **IEC 71-1 standardu** prenapon je definisan na sljedeći način:

“Prenapon je bilo koji napon između faznog provodnika i zemlje ili između faznih provodnika a koji ima tjemenu vrijednost koja premašuje odgovarajuću najveću dozvoljenu tjemenu vrijednost propisanu za električnu opremu”.

U okviru ovog standarda, naponi i prenaponi se **klasifikuju** prema njihovom **obliku** i **dužini** trajanja. Prema tome naponi i prenaponi se dijele u sljedeće grupe:

- **Trajni napon pogonske frekvencije** (*power frequency – pf*): je napon **konstantne efektivne vrijednosti** sa nazivnom frekvencijom napajanja u sistemu koji je trajno priključen na stezaljke opreme.
- **Privremeni, prolazni prenapon** (*temporary*): je prenapon pogonske (*pf*) frekvencije relativno **dugog vremena trajanja**: Može biti neprigušen ili slabo prigušen. U nekim slučajevima njegova frekvencija može biti nekoliko puta manja ili veća od pogonske frekvencije.
- **Tranzijentni, prelazni prenapon** (*transient*): je **kratkotrajni prenapon** od svega **nekoliko milisekundi** ili manje, oscilatornog ili neoscilatornog karaktera, obično jako prigušen. Tranzijentni prenaponi se dijele na:
  - a) **Prenapon sporog uspona čela**: je tranzijentni prenapon, obično jednog polariteta, sa vremenom trajanja čela  $20\ \mu s < T_1 < 5000\ \mu s$ , i ukupne dužine trajanja  $T_2 < 20\ ms$ .
  - b) **Prenapon brzog uspona čela**: je tranzijentni prenapon, obično jednog polariteta, sa vremenom trajanja čela  $0,1\ \mu s < T_1 < 20\ \mu s$ , i ukupne dužine trajanja  $T_2 < 300\ \mu s$ .

c) *Prenapon veoma brzog uspona čela*: je tranzijentni prenapon, obično jednog polariteta, sa vremenom trajanja čela  $T_1 < 0,1 \mu s$ , i ukupne dužine trajanja  $T_2 < 3 ms$ , obično superponiran sa dodatnim oscilacijama frekvencija  $30 kHz < f < 100 MHz$ .

- *Kombinovani (privremeni prenapon*, prenapon sporog uspona čela, prenapon brzog uspona čela, prenapon veoma brzog uspona čela) prenapon koji se sastoji od dva ili više komponentnih prenapona istovremeno, a koji opterećuje izolaciju opreme priključenu između faze i zemlje. Realno, svi prenaponi su ustvari kombinovani prenaponi.

Modelovanje komponenti elektroenergetskog sistema u širokom spektru frekvencija je praktički nemoguće. Zbog ovog razloga, i zbog naročitih svojstava specifičnog elementa elektroenergetske mreže koji igraju značajne uloge u analiziranoj prelaznoj pojavi, potrebno je u zasebnim frekventnim područjima načiniti odgovarajuće modele elemenata. Tabela 3.1.I pokazuje četiri osnovne grupe frekvencija, sa nekim preklapanjima, i njima pridružena odgovarajuća prenaponska stanja, u kojima se različito modeluju pojedini elementi mreže.

Tabela 3.1.I

Grupa	Frekventno područje:	U vremenskom domenu to su:	Za analize aktuelni:
I	0.1 Hz – 3 kHz	Niskofrekventne oscilacije	Privremeni prenaponi
II	50 Hz – 20 kHz	Talasi sporog uspona čela	Sklopni prenaponi
III	10 kHz – 3 MHz	Talasi brzog uspona čela	Atmosferski prenaponi
IV	100 kHz – 50 MHz	Talasi vrlo brzog uspona čela	Prenaponi nastali podskakivanjima kontakata prekidača

Tabela 3.1.II daje pregled različitih uzroka prelaznih pojava unutar elektroenergetskog sistema zajedno sa pripadajućim frekventnim područjima istih.

Tabela 3.1.II

Izvor	Frekventno područje
Uključenje transformatora Ferorezonancija	(DC) 0,1 Hz – 1 kHz
Rasterećenje	0,1 Hz – 3 kHz
Otklanjanje kvara Inicijalizacija kvara	50 Hz – 3 kHz 50 Hz – 20 kHz
Uključenje voda Automatsko ponovno uključenje	50 Hz – 20 kHz (DC) 50 Hz – 20 kHz
Prelazni povratni napon Kvar na priključcima Kvar na vodu	50 Hz – 20 kHz 50 Hz – 100 kHz
Podskakivanje kontakata prekidača	10 kHz – 1 MHz
Atmosferska pražnjenja Kvarovi u postrojenjima	10 kHz – 1 MHz
Sklopne operacije rastavljača i kvarovi u GIS	100 kHz – 50 MHz

U pojednostavljenim analizama kvaliteta električne energije prenaponski tranzijenti se dijele u **dvije osnovne grupe**:

- a) **impulsivni** tranzijenti i
- b) **oscilatorni** tranzijenti

Osnovni **uzroci prenaponskih tranzijentnih pojava** u elektroenergetskom sistemu su:

- a) atmosferska pražnjenja
- b) uključivanje/isključivanje kondezatorskih baterija
- c) **uključivanje** neopterećenih **transformatora**
- d) **ferorezonancija**
- e) **uključivanje/isključivanje voda**
- f) **rasterećenja** ili potpuni **ispadi opterećenja**
- g) **inicijalizacija** i **otklanjanje kratkih spojeva** itd.

### 3.2 TRANZIJENTI NASTALI KAO POSLJEDICA ATMOSFERSKIH PRAŽNENJA

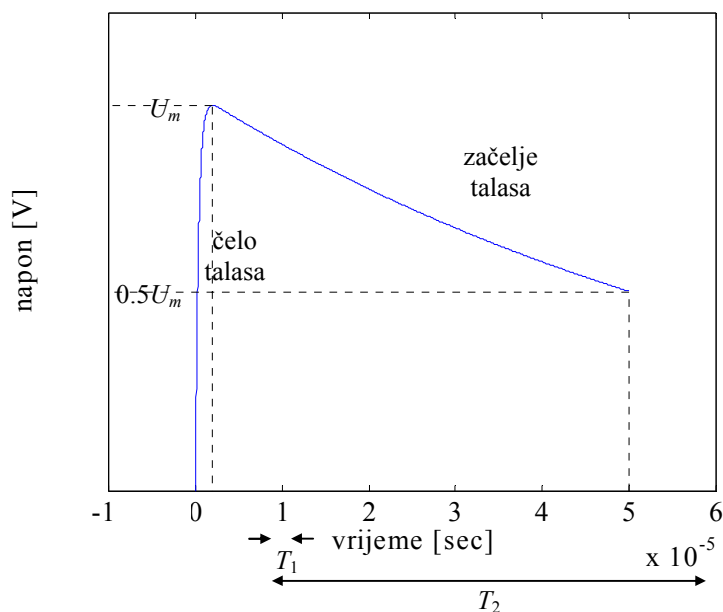
Prenaponi atmosferskog porijekla nastaju kao posljedica atmosferskog elektriciteta i njihov uticaj na elektroenergetsku mrežu je teško izbjeći. Ova vrsta prenapona može nastati usljed statičkog elektriciteta ili direktnog pražnjenja u vidu groma.

Amplitude prenapona koje nastaju kao posljedica statičkog elektriciteta mogu dostići vrijednosti do nekoliko stotina kilovolti. Prenosni vodovi u mreži najčešće imaju galvansku vezu sa zemljom (kao što je npr. zvjezdište energetskih transformatora ili uzemljenje preko mjernih transformatora) preko koje se statički elektricitet odvodi u zemlju. Iz ovih razloga ovi prenaponi ne predstavljaju veliku opasnost za visokonaponske vodove.

Mnogo opasniji prenaponi nastaju prilikom udara groma direktno u vodove ili u njihovoj neposrednoj blizini. Jedan od najvažnijih parametara groma je jačina struje koja može dostići vrijednosti i do 1000 kA, za udare pozitivnog polariteta tj. do 200 kA, za udare negativnog polariteta, ali se kod proračuna obično uzima da ona iznosi 40 do 60 kA. Struja groma u vremenskom domenu ima oblik talasa sa naglim porastom i laganim padom. Osim jačine struje veoma su bitni strmina čela kao i brzina opadanja talasa. Čelo talasa traje do 50  $\mu$ sec za udare pozitivnog polariteta, 10 do 15  $\mu$ sec za udare negativnog polariteta a dužina cijelog strujnog talasa je do 0.1 sec za udare pozitivnog polariteta, reda do 100  $\mu$ sec za udare negativnog polariteta.

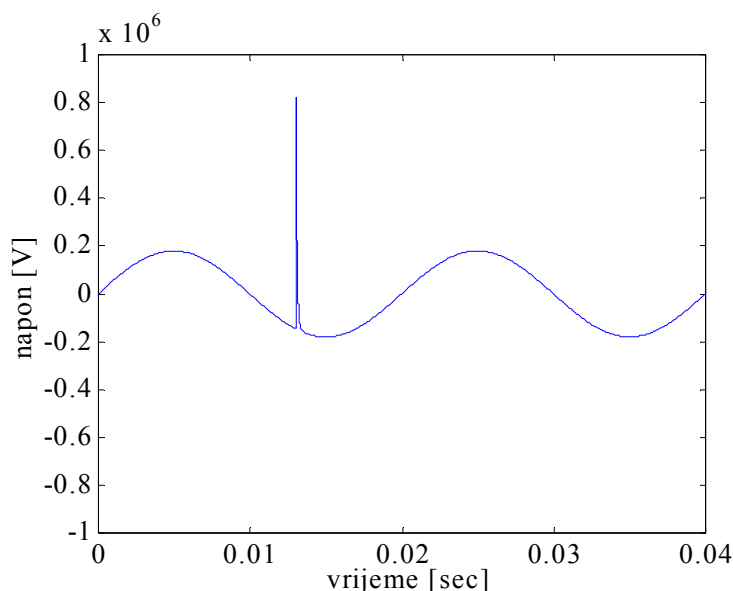
Atmosferski prenaponi su direktna posljedica generisane struje groma i oni imaju talasni oblik analogan talasnom obliku struje groma. Veličina nastalih prenapona zavisi o jačini struje groma i veličine talasnog otpora voda koja za nadzemne vodove iznosi oko 400  $\Omega$  i za kablove oko 50  $\Omega$ . Nastali prenaponi se u obliku putujućih prenaponskih talasa kreće na obje strane od mjesta udara ili indukovanja. Direktni udar groma u fazni vod, kod dobro izoliranih vodova, prouzrokuje nastanak prenapona reda i do nekoliko miliona volti. Takvu vrijednost prenapona nije u stanju izdržati nijedna do danas poznata izolacija. Ovi prenaponi izazivaju najveći broj oštećenja i kvarova na vodovima, postrojenjima i ostaloj električnoj opremi.

Slika 3.2.1 predstavlja vremenski oblik standardnog prenaponskog talasa 1.2/50  $\mu$ sec, tj. talasa čije je vrijeme uspona čela do tjemene vrijednosti  $T_1=1.2 \mu$ sec i vrijeme opadanja do polovine tjemene vrijednosti na začelju  $T_2=50 \mu$ sec.



Slika 3.2.1 Standardni prenaponski talas  $T_1=1.2 \mu\text{sec}$ ,  $T_2=50 \mu\text{sec}$

Slika 3.2.2 pokazuje tipičan primjer impulsnog prenaponskog talasa na prenosnoj liniji, nastalog kao posljedica indukovanja atmosferskog pražnjenja. Amplituda prenaponskog talasa nastalog atmosferskim pražnjenjem se prigušuje prolaskom kroz sistem tako da talasni oblik impulsnog tranzijenta ima različit izgled na različitim mjestima sistema.

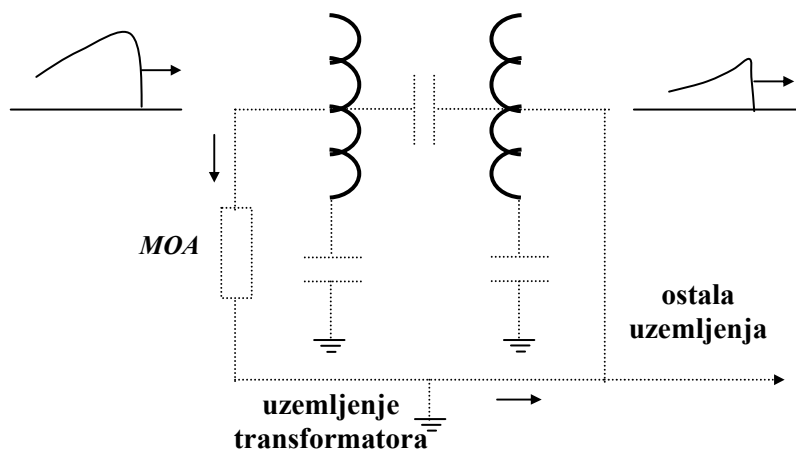


Slika 3.2.2 Impulsni prenaponski tranzijent nastao kao posljedica atmosferskog pražnjenja

Zbog visoke frekvencije tranzijenta nastalog atmosferskim pražnjenjem, nastali prenaponski talasi se uglavnom prostiru duž kapacitivnih puteva transformatora, i to preko kapacitivne veze između namota



primara i sekundara kao i kapacitivne veze između obaju namota i zemlje, slika 3.2.3 Praktični slučajevi konstruktivnih izvedbi transformatora pokazuju da kapacitet između namota i zemlje može da bude veći od kapaciteta između samih namota, tako da se većina prenaponskog talasa skreće u zemlju.

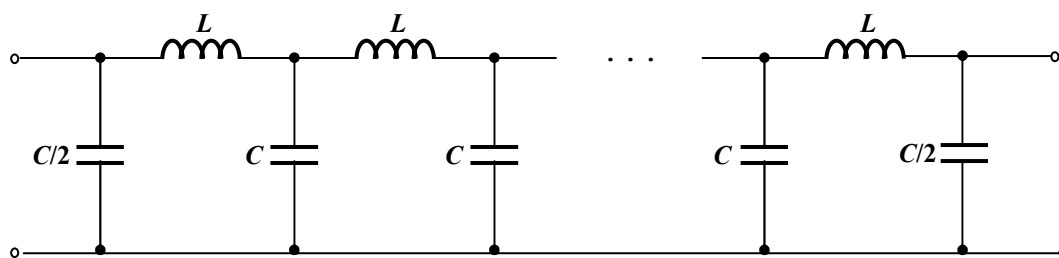


**Slika 3.2.3 Putevi širenja visokofrekventnih prenaponskih talasa nastalih djelovanjem groma**

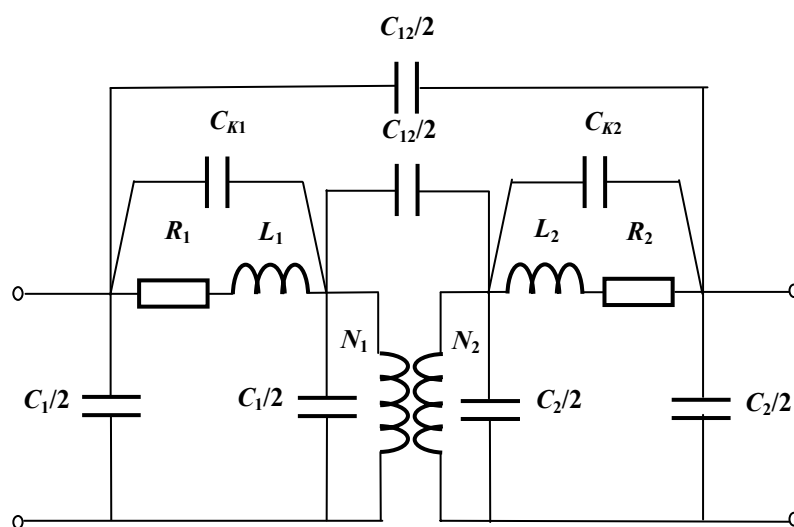
Dodatno, ako transformator sa primarne strane ima ugrađen odvodnik prenapona tada pri odvođenju struje groma kroz njega može da dođe do porasta potencijalne razlike lokalnog uzemljenja transformatora na nekoliko kV, u odnosu na ostala uzemljenja u blizini. Ovo vrlo često može da ima za posledicu neispravan rad elektroničke opreme koja ima vezu sa pomenutim uzemljenjem.

Atmosferska pražnjenja prije svega utiču na ispravan rad elemenata elektroenergetskog sistema kao što su transformatori, odvodnici prenapona, generatori itd. izlažući ih mehaničkim i termičkim naprezanjima. Pored toga osjetljiva elektronička oprema može biti značajno ugrožena putujućim talasima nastalim pri udarima groma.

Za analize atmosferskih pražnjenja moraju se uvažiti odgovarajući modeli elemenata elektroenergetskog sistema koji pripadaju njemu pripadajućem frekventnom području, reda **10 kHz – 1 MHz**. Tako se prenosna linija modeluje distribuiranim parametrima kao na slici 3, dok se transformator dominantno predstavlja sa odgovarajućim ekvivalentnim kapacitetima između namota primara i sekundara, sopstvenim kapacitetima namota kao i ekvivalentnim kapacitetima između obaju namota i zemlje, slike 3.2.4 i 3.2.5.



Slika 3.2.4 Model prenosne linije aplikativan  
za analize atmosferskih pražnjenja



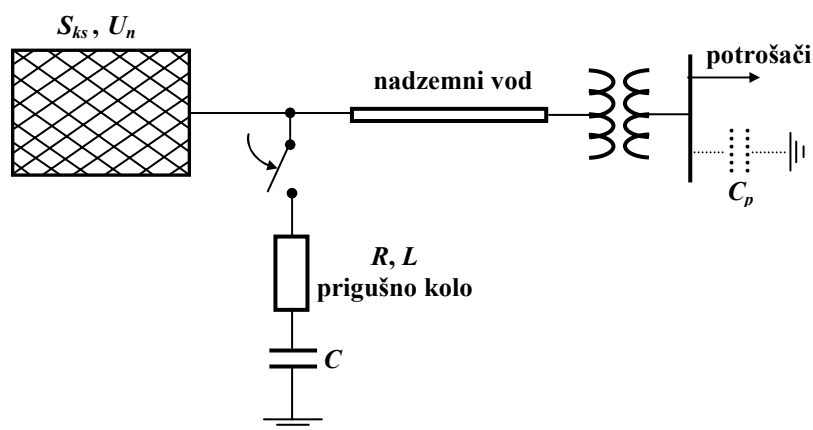
Slika 3.2.5 Model transformatora aplikativan  
za analize atmosferskih pražnjenja

### 3.3 PRENAPONI NASTALI UKLJUČIVANJEM KONDEZATORSKIH BATERIJA

Kondezatorske baterije se koriste radi:

- a) poboljšanja faktora snage i
- b) podizanju napona sistema u uslovima preopterećenja.

U uslovima pogoršanja faktora snage ili preopterećenja dolazi do uključenja kondezatorskih baterija na mrežu. Pri uključenju baterija na sistem, pojednostavljeno gledajući, dolazi do interakcije kapaciteta baterija sa induktivitetom sistema, rezultujući u oscilatorni tranzijent koji se može prigušiti ugradnjom odgovarajućih  $R - L$  kola. Pojednostavljeni model priključenja kondezatorskih baterija na mrežu dat je na slici 3.3.1.

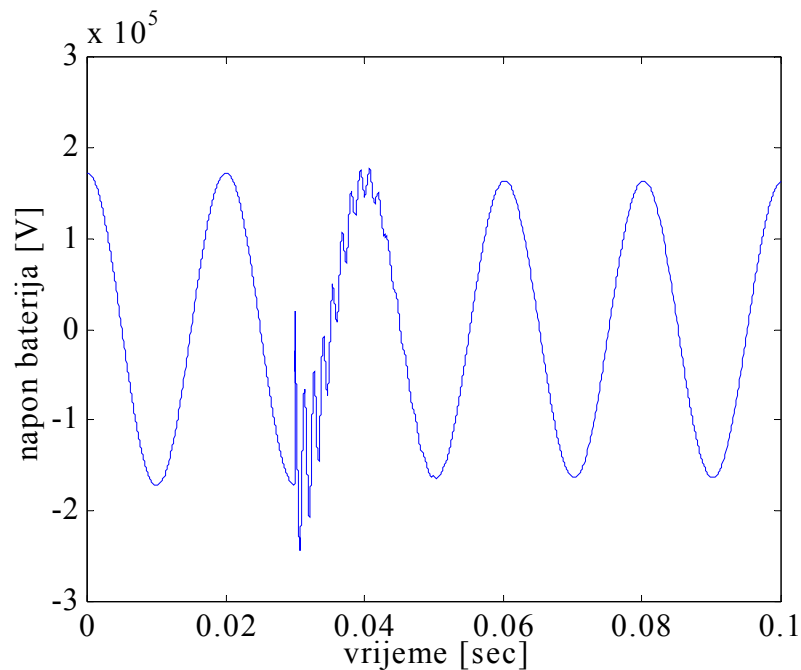


Slika 3.3.1 Pojednostavljeni model priključenja kondezatorskih baterija na mrežu

Tipičan talasni oblik oscilatornog prenaponskog tranzijenta nastalog uključivanjem kondezatorskih baterija dat je na slici 3.3.2. Frekvencija generisane tranzijentne pojave je obično reda ispod 5 kHz uz maksimalnu dužinu trajanja od oko 50 msec. Prenaponi nastali uključivanjem kondezatorskih baterija su obično reda od 1.0 do 2.0 p.u. zavisno od prigušenja u sistemu. Tranzijent, prikazan na slici 3.3.2, se dalje propagira kroz distributivni transformator u sistem lokalnih potrošača. Amplituda i dužina trajanja prenapona nastalog uključivanjem kondezatorskih baterija se može dodatno povećati u slučaju da je na strani potrošača, na niskonaponskoj strani distributivnog transformatora, već instaliran kondezator kao što je to kondezator  $C_p$  na slici 3.3.1.

Prenaponski tranzijent nastao uključivanjem kondezatorskih baterija generalno može uticati na ispravan rad elektroničke opreme

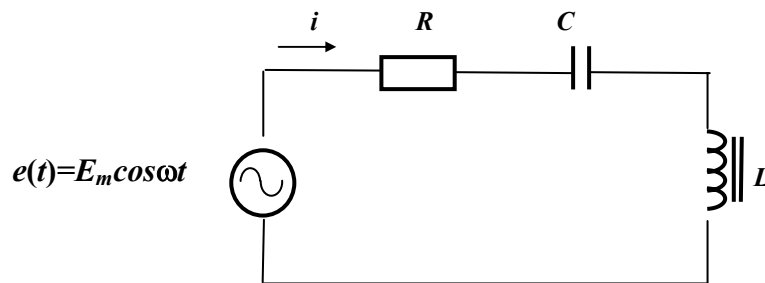
priključene na niskonaponskoj strani transformatora. Također, nekada prenaponska zaštita može djelovati prepoznavajući ovaj prenapon kao uzrok mogućeg oštećenja opreme i zbog toga isključiti potrošač sa napajanja. Na sličan način se može desiti da prekostrujna zaštita reaguje isključujući potrošač, budući da vrijednosti struja uzrokovane uključivanjem kondenzatorskih baterija mogu znatno premašiti nazivne vrijednosti.



Slika 3.3.2 Oscilatorni tranzijentni prenapon nastao uključivanjem kondenzatorskih baterija

### 3.4 FENOMEN FEROREZONANCIJE

U linearnim električnim kolima definisao se pojam rezonacije kao stanje u kolu kada je prinudna učestanost izvora jednaka sopstvenoj učestanosti kola. Pri rezonanciji se javljaju povećanja amplituda napona i struje u kolu. Amplitude su ograničene omskim otporom kola. U nelinearnim električnim kolima najčešći nelinearni parametar je induktivitet željezne jezgre transformatora, reaktora itd. Zbog toga se pojava analogna rezonanciji kod linearnih električnih kola u nelinearnim kolima naziva ferorezonancija. Prema konfiguraciji elemenata električnog kola razlikujemo serijsku i paralelnu ferorezonanciju. Posmatrajmo serijsku vezu otpora  $R$ , kondezatora  $C$  i nelinearnog induktiviteta  $L$ , slika 3.3.1.



Slika 3.3.1 Serijsko ferorezonantno kolo

Jednačina naponske ravnoteže za ovo električno kolo je:

$$e(t) = \sqrt{2}E \cos \omega t = Ri(t) + \frac{d}{dt}[Li(t)] + \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i(\tau) d\tau$$

ili u fazorskoj formi:

$$\bar{E} = \bar{U}_R + \bar{U}_L + \bar{U}_C = R\bar{I} + jU_L - j\frac{1}{\omega C}\bar{I} = R\bar{I} + j\left(U_L - \frac{1}{\omega C}\bar{I}\right)$$

Uz pretpostavku  $\bar{I} = Ie^{j0}$  dobijamo:

$$E^2 = R^2 I^2 + \left(U_L - \frac{1}{\omega C}I\right)^2$$

Posljednju jednačinu ćemo razbiti na dvije jednačine:

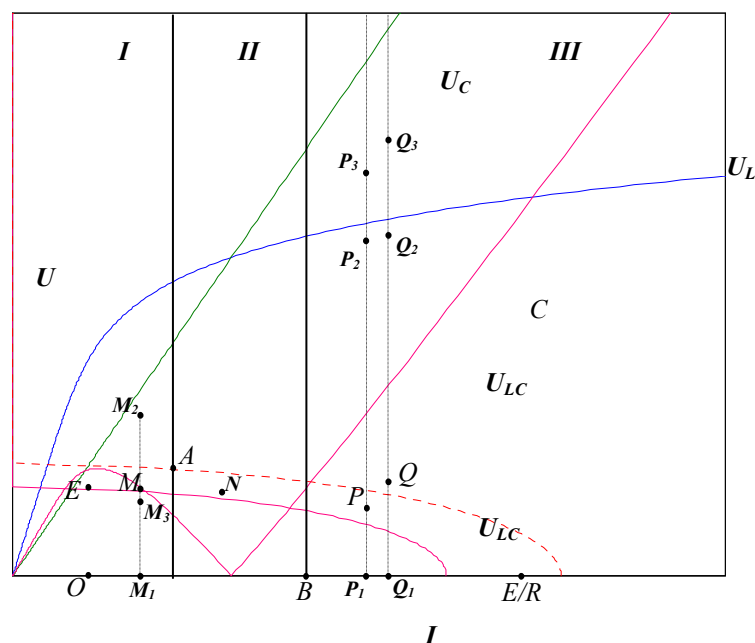
$$U_{LC} = \left|U_L - \frac{1}{\omega C}I\right|$$

$$E^2 = R^2 I^2 + U_{LC}^2$$

Iz posljednje jednačine se nalazi  $\frac{I^2}{\left(\frac{E}{R}\right)^2} + \frac{U_{LC}^2}{E^2} = 1$ , što predstavlja

centralnu elipsu sa poluosama  $E/R$  i  $E$  u  $I$ - $U$  koordinatnom sistemu, slika 3.3.2.

Na slici 3.3.2 su dati karakteristika magnećenja nelinearnog induktiviteta kao  $U_L = \xi(I)$  i napon na kondenzatoru kao  $U_C = \frac{1}{\omega C} I$ .



Slika 3.3.2 Grafička analiza fenomena ferorezonancije

Stanje u koju je definisano presjekom krivih  $U_{LC} = \left| U_L - \frac{1}{\omega C} I \right|$  i  $\frac{I^2}{\left( \frac{E}{R} \right)^2} + \frac{U_{LC}^2}{E^2} = 1$ . Ove dvije krive se sijeku u tri ili u samo jednoj tački,

zavisno o vrijednosti napona izvora  $E$ . Za vrijednost napona izvora  $E$ , kao na slici 3.3.2, postoje tri tačke presjeka  $M$ ,  $N$  i  $P$ . Tačka  $A$  u kojoj kriva  $U_{LC} = \left| U_L - \frac{1}{\omega C} I \right|$  ima maksimalnu vrijednost odgovara koljenu krivulje magnetiziranja. Tačka  $B$  odgovara rezonantnom režimu rada jer su induktivni i kapacitivni padovi napona u kolu jednaki, i u kolu protiče čisto aktivna struja. Razlikuju se tri oblasti:  $I$  oblast, stabilna jer sa povećanjem napona  $E$  dolazi do povećanja struje u kolu,  $II$  oblast, nestabilna jer sa povećanjem napona  $E$  dolazi do smanjenja struje u kolu,  $III$  oblast, stabilna ali sa velikim vrijednostima struja u kolu.

Dakle, sa povećanjem napona izvora  $E$  radna tačka se kreće po krivoj  $U_{LC} = \left| U_L - \frac{1}{\omega C} I \right|$  sve do tačke  $A$  u kojoj elipsa tangira ovu krivu.

Daljim povećanjem napona radna tačka skače u tačku  $Q$  na dijelu  $BC$  krive gdje ponovo nastupa stabilno stanje ali sa velikom strujom u

kolu. Vrijednosti napona na induktivitetu i kapacitetu su  $U_L = d(Q_1, Q_2)$ ,  $U_C = d(Q_1, Q_3)$ . Očito su vrijednosti prenapona na ovim elementima znatno veće od vrijednosti napona izvora  $E$ . Zanimljivo je da ponovnim smanjivanjem napona izvora radna tačka se neće vratiti na polazni dio krive  $OA$  nego se seli u tačku  $P$ . I u ovoj tački se zadržavaju velike vrijednosti struje u kolu te napona na jalovim elementima kola  $U_L = d(P_1, P_2)$ ,  $U_C = d(P_1, P_3)$ . Dakle, jedna vrijednost napona izvora  $E$  može imati dvije odgovarajuće radne tačke, jedna ( $M$ ) sa malim vrijednostima struje u kolu kao i napona na gomilištima energije  $U_L = d(M_1, M_2)$ ,  $U_C = d(M_1, M_3)$ . Druga tačka ( $P$ ) sa velikim vrijednostima pomenutih veličina.

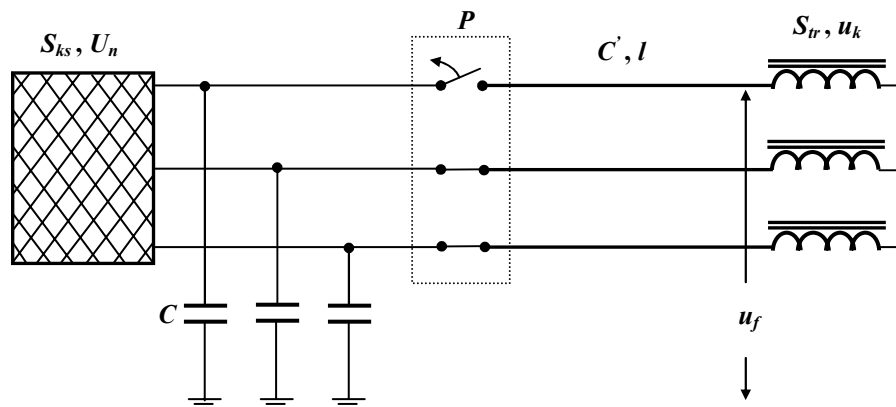
Prelaz iz tačke  $A$  na tačku  $P$  je moguć uz izvjesno povišenje napona izvora a to je praktično moguće pri kakvoj sklopnoj operaciji uključenja/isključenja u analiziranom električnom kolu. Pojava kada pri operaciji uključenja/isključenja u električnom kolu dolazi do velikih vrijednosti struje kola kao i prenapona na pojedinim elementima kola zove se ferorezonancija. Ovako velika struja i prenapon može značajno oštetiti izolaciju pomenutih elemenata u kolu.

**Može se napomenuti da:**

- ferorezonancija nastupa u svim slučajevima kada je kapacitivni otpor kola između induktivnog otpora kola prije i poslije zasićenja, tj. oblast u kojoj nastupa ferorezonancija je mnogo šira od nego kod obične rezonancije. Drugim riječima, do pojave ferorezonancije dolazi ukoliko je prinudna učestanost izvora između sopstvenih učestanosti kola u nezasićenom i zasićenom području željezne jezgre.
- amplituda struje nije ograničena aktivnim otporom kola nego zasićenjem magnetnog kola (npr. struje i prenaponi su veći pri smanjenju otpora sa  $R \neq 0$  na vrijednost  $R = 0$ ).
- prenaponi uslijed ferorezonancije nastupaju odmah nakon promjene stanja kola i teoretski traju beskonačno dugo (sve dok se napon izvora ne isključi ili ne dođe do proboja izolacije, prekida kola i sl.)

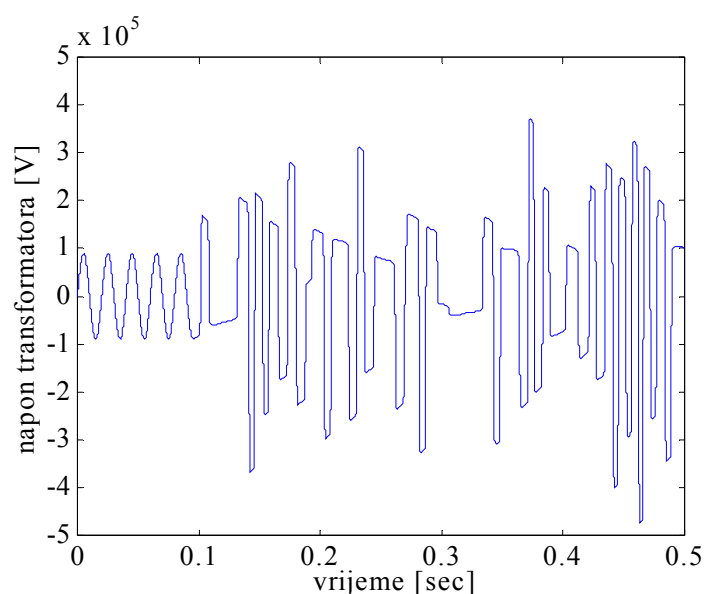
Praktični primjeri ferorezonancije nastaju pri uključenju serijske kompenzacije sa slabo opterećenim transformatorima, isključenju naponskih mjernih transformatora kada ferorezonantno kolo čine kondezator za izjednačavanje potencijala na polovima prekidača i naponski transformator i neregularne operacije trofaznih prekidača.

Posmatrajmo trofazno električno kolo dato na slici 3.3.3 gdje su povezani dugi kabl (podužnih parametara  $C'$  i  $l$ ) i neopterećeni transformator s izolovanom neutralnom tačkom. Transformator se uključuje ili isključuje preko trofaznog prekidača  $P$ . U slučaju neregularne sklopne operacije prekidača može doći do značajnih prenapona između nekorektno prekinutog faznog voda i zemlje. Povećanje napona nastaje uslijed ferorezonancije uspostavljene između kapaciteta kabla i nelinearnog induktiviteta nekorektno prekinutog faznog namota transformatora.



Slika 3.3.3 Pojednostavljena shema za izučavanje efekta ferorezonancije u trofaznom sistemu

Slika 3.3.4 pokazuje rezultat simulacije ferorezonantnog prenaponskog stanja registrovanog upravo na neregularno isključenoj fazi u toku prvih 0.5 sec.



Slika 3.3.4 Ferorezonantni fazni napon u neregularno isključenoj fazi

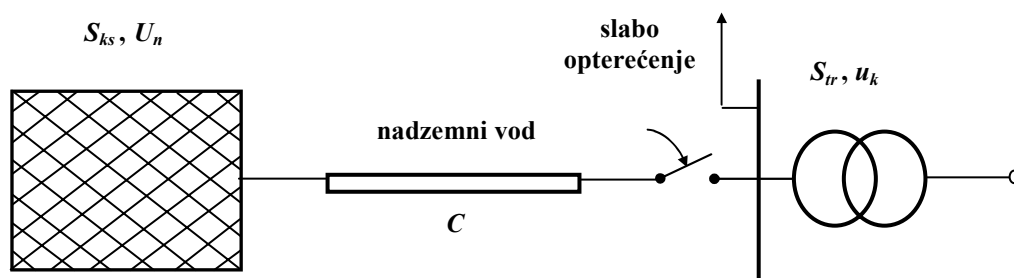


Kao **posljedica ferorezonancije** mogu nastupiti **trajni** simetrični ili nesimetrični talasni **oblici deformisanog napona i struje**. Rezultujući talasni oblici mogu imati **fundamentalnu frekvenciju** sistema ili **parne** odnosno **neparne subharmonijske frekvencije**.

Ferorezonancija može dovesti i do talasnih oblika sa **slučajnim frekvencijama oscilovanja**, pojava tkzv. haotične ferorezonancije. Posljedica ferorezonantnih prenapona su **termička** i **mehanička naprezanja** transformatora, odvodnika prenapona i kvarovi električne i elektroničke opreme.

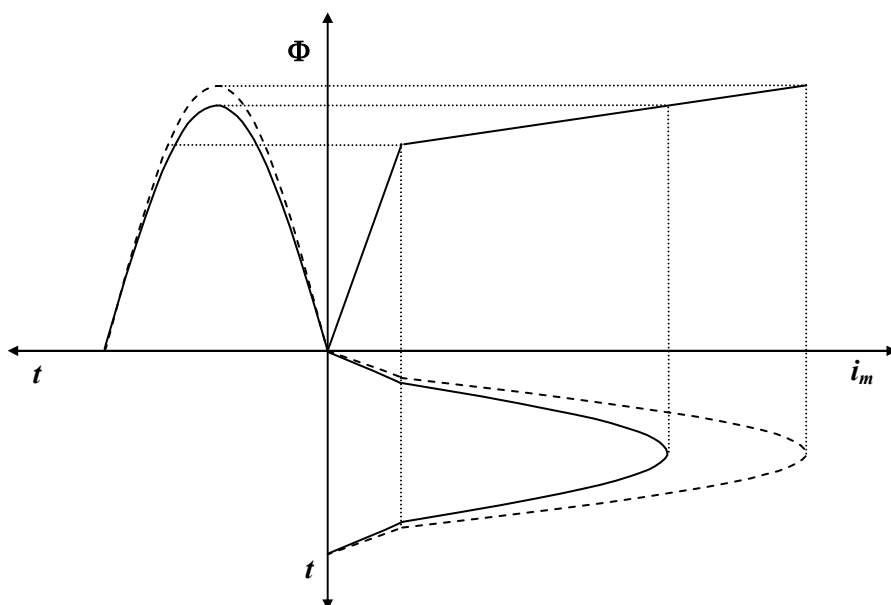
### 3.5 PRENAPONI NASTALI UKLJUČIVANJEM NEOPTEREĆENIH TRANSFORMATORA

Pojednostavljena zamjenska shema **priključenja neopterećenog transformatora**, preko nadzemnog voda kapaciteta  $C$ , na mrežu data je na slici 3.4.1:

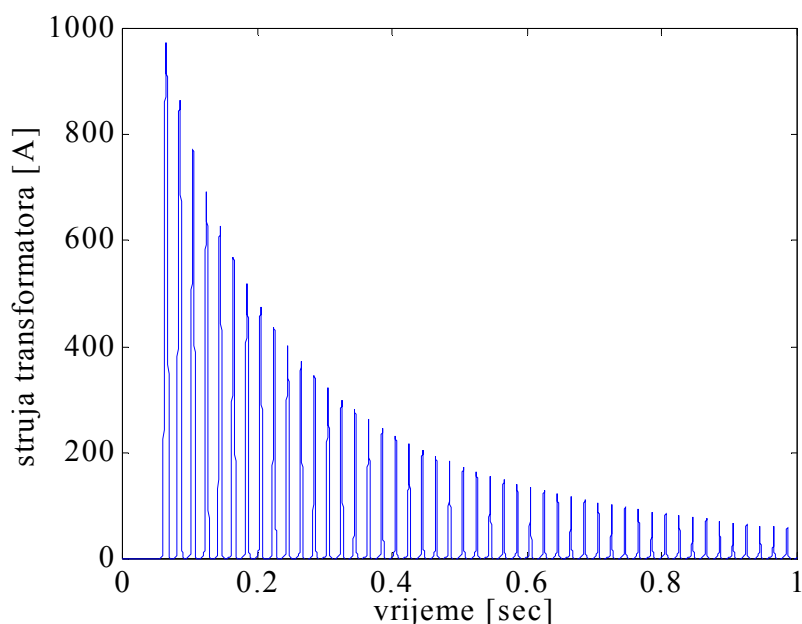


Slika 3.4.1 Uključenje neopterećenog transformatora

Pri normalnim uslovima rada **struja uključenja** neopterećenog transformatora je reda oko **1%** nazivne struje transformatora. Međutim, **uključenje** transformatora **u trenutku** kada **napon** sistema, **prolazi kroz nultu vrijednost** dovodi do **jakih strujnih udara** koji su zbog nelinearnog karaktera transformatora nesinusoidalne veličine, slike 3.4.2 i 3.4.3. Detaljnije analize pokazuju dominantno prisustvo prvih 7-10 harmoničkih komponenti struje.



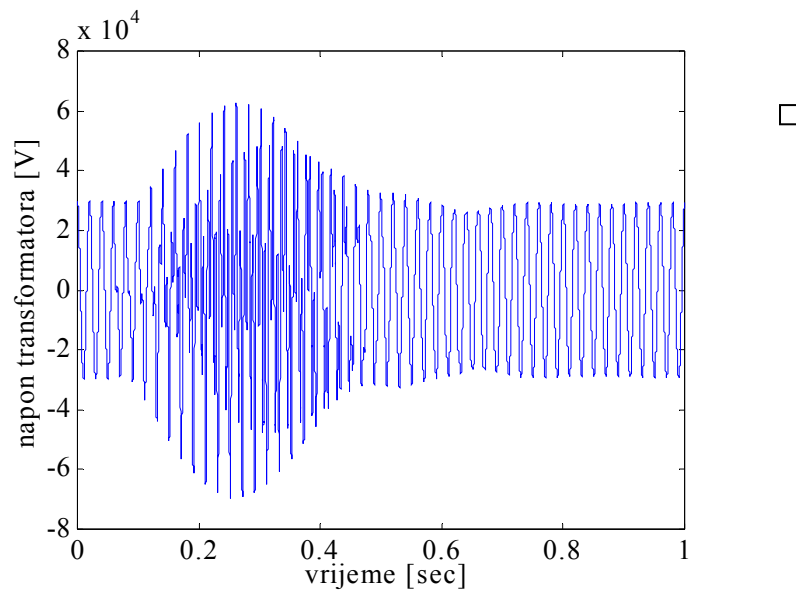
Slika 3.4.2 Nesinusoidalna struja magnetiziranja transformatora



Slika 3.4.3 Talasni oblik struje uključenja neopterećenog transformatora

Ukoliko se desi da **više harmonijske komponente** generisane strujom transformatora **koincidiraju sa rezonantnim frekvencijama** sistema može doći do **privremenih, niskofrekventnih, nesinusoidalnih prenapona** na priključcima transformatora. Najvažnija karakteristika ovih prenapona je relativno **velika dužina trajanja** (preko **100 perioda**, ekstremno i preko **10 sekundi**).

**Primjer talasnog oblika** privremenog prenapona na priključcima neopterećenog transformatora, nastalog nakon njegovog priključenja na mrežu, dat je na slici 3.4.4. **Odvodnici** prenapona instalirani uz transformatore mogu biti **jako termički opterećeni** ovom vrstom prenapona. Zagrijavanje odvodnika bitno zavisi od posmatrane konfiguracije mreže i od parametara sistema kao i odgovarajućih **početnih uslova** (**trenutak uključenja prekidača, remanentni magnetizam** transformatora itd.). **Amplituda**, dužina **trajanja** ovakvih privremenih prenapona a samim time i zagrijavanje odvodnika prenapona su **znatno izraženiji** u uslovima **slabih elektroenergetskih sistema**.



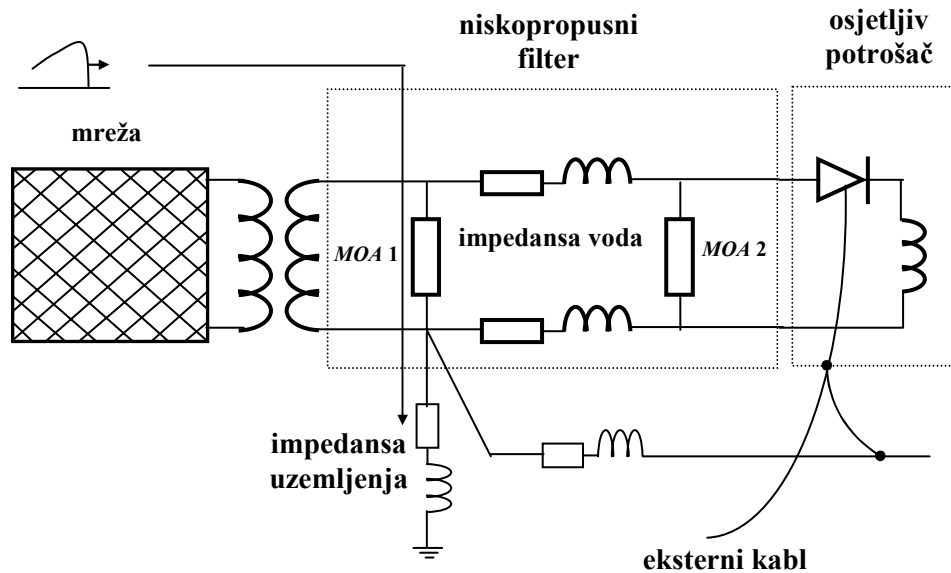
Slika 3.4.4 Privremeni prenapon na transformatoru nakon njegovog priključenja

Ostali primjeri nastanka tranzijentih prenapona u elektroenergetskom sistemu nastaju pri:

- Uključenje nadzemnih vodova ili kablova
- Inicijaliciji i otklanjanju kratkih spojeva u sistemu
- Isklapanju malih induktivnih i malih kapacitivnih struja
- Rasterećenjima ili potpunom ispadu opterećenja itd.

### 3.6 OSNOVNI PRINCIPI PRENAPONSKE ZAŠTITE

Osnovni principi prenaponske zaštite potrošača predstavljani su na slici 3.5.1.



Slika 3.5.1 Osnovni principi prenaponske zaštite

a) **skrenuti strujni talas** od potrošača

Odvodnik prenapona *MOA1*, instaliran između faznog provodnika i uzemljenja, služi za skretanje strujnog talasa prema zemji. Njegova osnovna funkcija je preuzimanje većine energije tranzijenta na sebe ne dozvoljavajući da ta energija ne dopre do osjetljivih potrošača.

b) **ograničiti napon** na osjetljivoj opremi

Odvodnik prenapona *MOA2*, instaliran između faznog provodnika i uzemljenja, služi za zaštitu izolacije osjetljivih potrošača kada je iza odvodnika prenapona *MOA1* prošla dovoljna energija tranzijenta koja može da ugrozi potrošač.

c) **povezati sva uzemljena** na zajedničku referentnu tačku

Važno je **povezati sve eksterne kablove** na zajedničku referentnu tačku uzemljenja. Može se naime desiti situacija da eksterni kablovi imaju druge referentne tačke uzemljenja u odnosu na lokalno uzemljenje električne opreme. U tom slučaju npr. pri udaru groma može doći do povećanja potencijalne razlike između pomenutih referentnih tačaka uzemljenja na nekoliko kV, rezultirajući u **proboj izolacije** između pomenutih uzemljenja što za posljedicu ima pogrešan rad ili oštećenja osjetljive opreme.

d) napraviti niskopropusni filter koristeći principe blokiranja i ograničavanja

Za veoma skupu i osjetljivu opremu koja je velike važnosti, npr. kompjuteri koji nose velike memorijske jedinice, potrebno je dodatno ugraditi niskopropusne, induktivne filtere koji sprečavaju putovanje strujnog talas groma iz sistema u opremu. Blokiranje i ograničavanje visokofrekventnih strujnih talasa se obezbjeđuje ugradnjom serijskih induktiviteta.

## 3.7 UREĐAJI ZA PRENAPONSKU ZAŠTITU

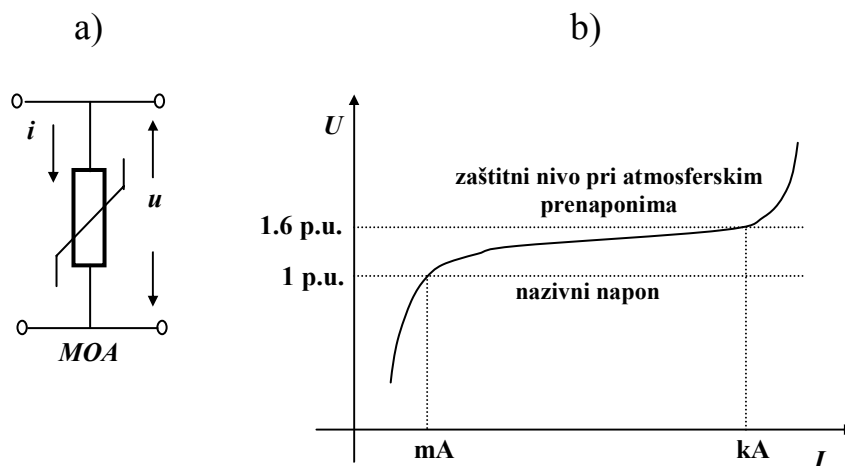
### 3.7.1 METAL OKSIDNI ODVODNICI PRENAPONA

Jedan od glavnih uređaja za prenaponsku zaštitu jesu metal oksidni odvodnici prenapona (*metal oxide arrester – MOA*). Metal oksidni odvodnici su napravljeni od MO blokova koji su povezani visoko nelinearnim vezujućim slojevima koji djeluju kao barijera, odnosno oni se ponašaju tako da u zoni nazivnog napona obezbjeđuju visoku otpornost odvodnika a u zoni iznad nazivnog tj. u zaštitnoj zoni, uslijed efekta usmjeravanja elektrona, oni obezbjeđuju veoma nisku otpornost odvodnika.

Na slici 3.6.1.1 dati su model i strujno naponska karakteristika metal oksidnog odvodnika prenapona. Ova karakteristika je opisana nelinearnom funkcijom tipa:

$$I = \alpha U^\beta$$

gdje je koeficijent  $\alpha$  određen dimenzijama odvodnika, dok  $\beta$  definiše nelinearnost odvodnika, obično je  $\beta \geq 40$ .



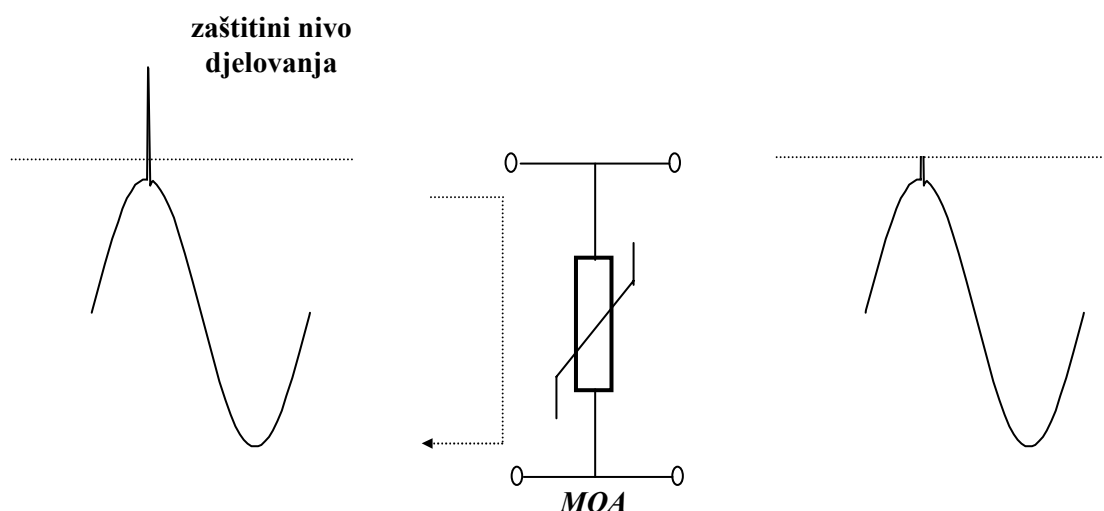
Slika 3.6.1.1 a) Model i b) strujno – naponska karakteristika odvodnika prenapona

Neke od osnovnih prednosti metal oksidnih odvodnika prenapona u odnosu na tradicionalne silicijum karbidne odvodnike za iskrištem su:

- bolja sposobnost apsorpcije energije i mogućnost paralelnog spajanja više odvodnika
- niži zaštitni nivo
- bolja sposobnost ograničenja prenapona većih strmina uspona
- manje dimenzije i jednostavnija konstrukcija

- mogućnost kontrole stanja u normalnom pogonu

U nominalnom režimu rada kroz odvodnik, koji je inače trajno priključen na štice objekta, teče veoma mala struja reda mA. U prenaponskim uslovima, kada prenapon premaši zaštitni nivo provođenja, npr. vrijednost 1.6 p.u., struja kroz odvodnik je reda kA. Zavisno od amplitudne vrijednosti i dužine trajanja prenaponskog talasa, odvodnik prenapona može biti termički preopterećen, oštećen ili potpuno uništen u toku preuzimanja energije tranzijenta na sebe. U sistemima gdje se očekuju jaka termička naprezanja štice objekata ugrađuju se paralelne veze više odvodnika prenapona. Pojednostavljeni način djelovanja odvodnika prenapona dat je na slici 3.6.1.2.



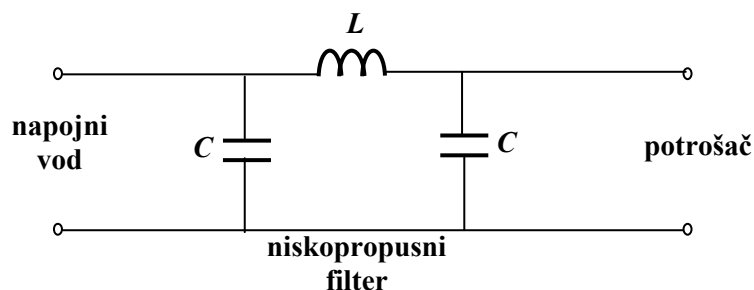
Slika 3.6.1.2 Pojednostavljeni način djelovanja odvodnika prenapona

Metal oksidni odvodnici prenapona mogu se vezati između: faznog i neutralnog provodnika, neutralnog provodnika i uzemljenja, faznog provodnika i zemlje te između faznih provodnika, tzv. *linijski odvodnici prenapona*. Međutim, i odvodnici prenapona imaju jedan osnovni nedostatak a to je da praktički odvede prenaponski talas kada njegova vrijednost premaši odgovarajući zaštitni nivo odvodnika. Međutim, mogu postojati trajne deformacije napona kao što su npr. šumovi koji još uvijek nemaju dovoljno veliku amplitudu da bi odvodnici mogli reagovati. U tom smislu su efikasniji niskopropusni električni filteri.



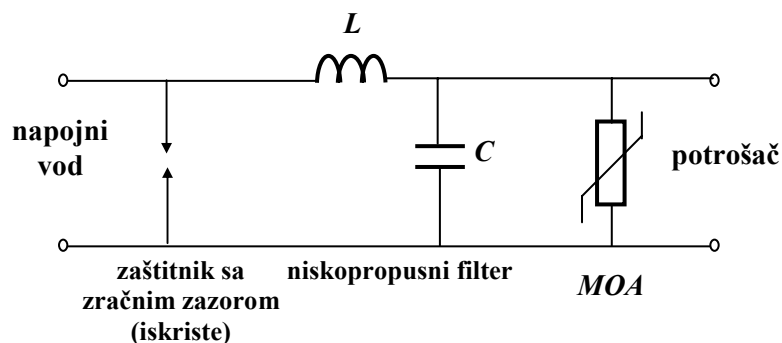
### 3.6.2 NISKOPROPUSNI ELEKTRIČNI FILTERI

Osnovni model niskopropusnog filtera dat je na slici 3.6.2.1. Osnovna funkcija niskopropusnog filtera jeste da propušta signale nazivne frekvencije a sve VF signale da prigušuje ili skreće ka zemlji.



Slika 3.6.2.1 Model niskopropusnog filtera

Generalno gledajući, niskopropusni filteri su uvijek građeni od serijskog induktiviteta i paralelnog kondezatora koji obezbjeđuju niskoomski put prema zemlji za određeni opseg frekvencija. U nekim izvedbama prenaponskih zaštitnih uređaja, pored filtera se dodatno ugrađuju i odvodnici prenapona paralelno sa kondezatorima. Slika 3.6.2.2 predstavlja najčešće korišteni hibridni zaštitni uređaj koji kombinuje dvije različite vrste odvodnika prenapona zajedno sa niskopropusnim filterom.



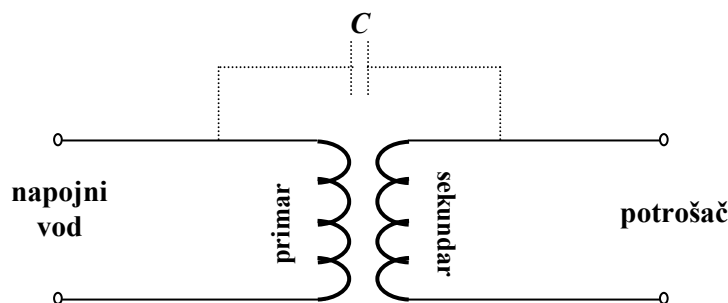
Slika 3.6.2.2 Hibridni tranzijentni zaštitni uređaj

Zaštitnik sa zračnim zazorom, postavljen na početku uređaja, služi prije svega za odvođenje što veće količine energije tranzijenta. Niskopropusni filter služi za redukovanje transfera visokofrekventnih tranzijenata na stranu potrošača. Serijski induktor prigušuje ili blokira visokofrekventne tranzijente i preusmjerava ih kroz prvi zaštitnik. Paralelni kondezator služi za ublažavanje brzine uspona prenaponskog tranzijenta. Drugi odvodnik, MOA, služi za limitiranje prenapona na nivo koji je podnosiv za štićenu opremu. Neke druge mogućnosti

izgradnje hibridnog zaštitnog uređaja su dva odvodnika MOA na početku i kraju uređaja te sa ili bez još jednog paralelnog kondenzatora poslije prvog odvodnika.

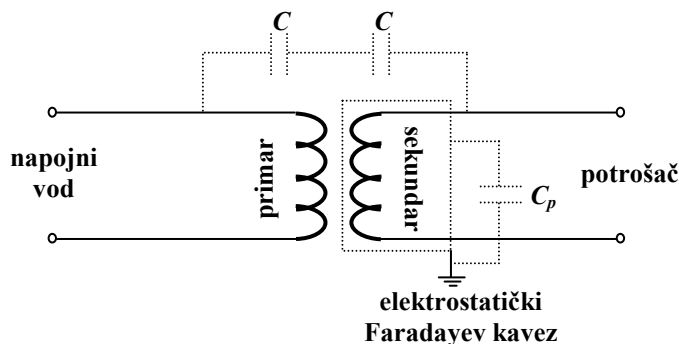
### 3.6.3 IZOLACIONI TRANSFORMATORI

Normalni transformatori služe za galvansko odvajanje potrošača od napojne mreže tako da se poremećaj u naponu izvora proporcionalno prenosnom odnosu transformatora umanjuje i prenosi na niskonaponsku stranu. S druge strane induktivni karakter transformatora prigušuje prenos poremećenih visokofrekventnih signala sa primara na sekundar transformatora. Međutim, visokofrekventni impulsi još uvijek mogu relativno lako proći na sekundarnu stranu potrošača preko kapacitivne veze primar – sekundar, slika 3.6.3.1.

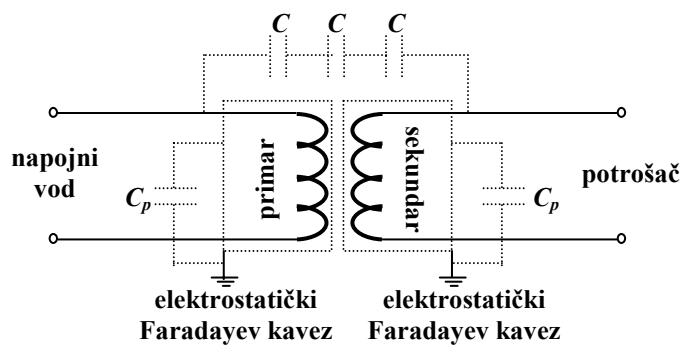


Slika 3.6.3.1 Izolacioni transformator

U vezi sa tim ugrađuju se elektrostatički Faradayevi kavez koji umanjuju međunamotajnu kapacitivnost jer se ponašaju kao da generišu više kapaciteta spojenih u seriji. Na takav način se visokofrekventni impulsi skreću sa puta prema sekundaru na put ka zemlji. Načini izvedbe izolacionih transformatora sa jednim ili dva elektrostatička Faradeyeva kaveza dati su na slikama 3.6.3.2 i 3.6.3.3. Postoji i opcija izvedbe sa tri Faradeyeva kaveza gdje treći kavez sadrži pomenuta dva.



Slika 3.6.3.2 Izolacioni transformator sa jednim Faradeyevim kavezom



**Slika 3.6.3.3 Izolacioni transformator sa dva Faradeyeva kaveza**

Ostali načini prigušenja ili eliminisanja tranzijentnih prenapona ili prekostruja su ugradnja predotpora ili primjena kontrolisanog uključenja. Ovo je posebno aplikativno pri uključivanju kondezatorskih baterija ili uključivanju transformatora.

### 3.7 PROGRAMSKI PAKETI ZA ANALIZE TRANZIJENTNIH POJAVA

Standardni programski paketi za analize elektromagnetnih tranzijentnih pojava generalno imaju sličan pristup u modelovanju električnih elemenata. Međutim, razlike postoje u veličinama odgovarajućih biblioteka gdje su pohranjeni elementi kao i u bibliotekama numeričkih metoda koji izvršavaju simulacije.

Svi današnji komercijalni programi s obzirom na korištene numeričke metode mogu se podijeliti na dvije velike grupe:

a) metodi s konstantnim korakom integracije: **EMTP–ATP**, **PSCAD/EMTDC**, **NETOMAC** i

b) metodi s promjenjivim korakom integracije: **MATLAB/Simulink/Power System Blockset**, **PSPICE**, **SABER**.

U nastavku će se ukratko predstaviti mogućnosti modelovanja u dva najpoznatija programa za analize elektromagnetskih prijelaznih pojava: EMTP–ATPa i MATLAB/Simulink/ Power System Blockseta.

**EMTP** (*Electromagnetic Transient Program*) je danas zasigurno najrašireniji namjenski program za analize elektromagnetnih prelaznih pojava u elektroenergetskom sistemu. Ovaj program trenutno ima nekoliko verzija pri čemu je u Evropi najraširenija verzija poznata pod imenom **ATP** (*Alternative Transient Program*).

**ATP** je univerzalni program za digitalno simuliranje elektromagnetnih prelaznih pojava. Ovaj programski paket ima naročite karakteristike u vezi broja pohranjenih modela. Program ima grafički korisnički interfejs (*GUI - graphical user interface*) realizovan u okviru grafičkog preprocesora **ATPDraw** koji omogućava relativno jednostavnu konstrukciju modela električnih kola. ATP je baziran na aplikaciji implicitnog trapeznog pravila koje diferencijalne jednačine komponenti mreže pretvara u odgovarajuće algebarske jednačine.

Tako, za induktivitet  $L$ , uz oznake na slici 3.7.1.a, struja grane  $k$ - $m$  u vremenskom domenu se može izračunati preko relacije:

$$i_{k,m}(t) = i_{k,m}(t - \Delta t) + \frac{1}{L} \int_{t-\Delta t}^t (v_k(\tau) - v_m(\tau)) d\tau$$

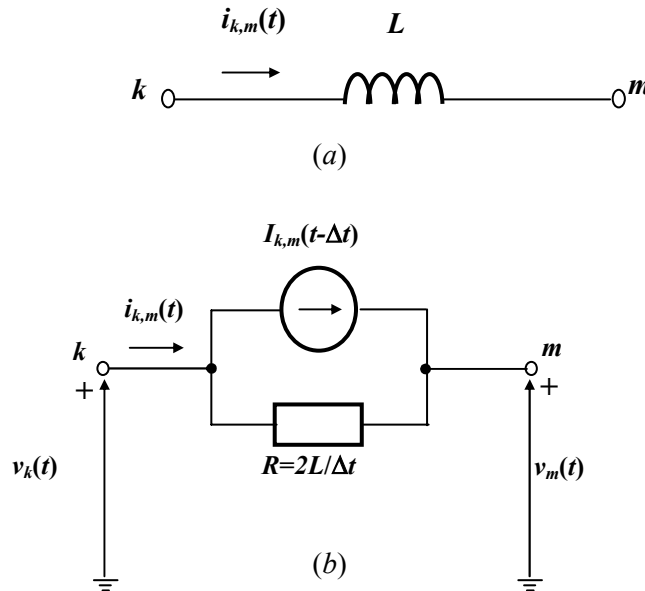
Aproksimacijom integrala u posljednjoj relaciji trapeznim pravilom dolazimo do relacije:

$$i_{k,m}(t) = \frac{\Delta t}{2L} [v_k(t) - v_m(t)] + I_{k,m}(t - \Delta t)$$

gdje je ekvivalentni strujni izvor  $I_{k,m}(t - \Delta t)$  poznat iz prethodnog koraka kao:

$$I_{k,m}(t - \Delta t) = i_{k,m}(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2L} [v_k(t - \Delta t) - v_m(t - \Delta t)]$$

Linearni induktivitet se zamjenjuje svojim ekvivalentom preko odgovarajućeg otpora  $R$  i strujnog izvora  $I$ , slika 3.7.1.b. Ekvivalentni model je tačniji ukoliko je korak integracije  $\Delta t$  manji.



Slika 3.7.1 (a) Linearni induktivitet; (b) ekvivalentni model

Analogno se formiraju ekvivalentni za kapacitet i otpor. Finalno se za linearne mreže sa  $n$  čvorova realizuje metoda napona čvorova u matricnoj formi:

$$[G][v(t)] = [i(t)] - [I]$$

gdje su:

- $[G]$  - matrica provodnosti čvorova, konstantna i simetrična, formata  $n \times n$
- $[v(t)]$  - vektor napona čvorova u trenutku  $t$ , formata  $n \times 1$
- $[i(t)]$  - vektor injektiranih struja u čvorove u trenutku  $t$ , formata  $n \times 1$
- $[I]$  - poznati vektor generisan poznatim ekvivalentnim strujnim izvorima, formata  $n \times 1$ .

Linearne matricne jednačine se rješavaju po nepoznatom vektoru  $[v(t)]$ , uglavnom Gausovim algoritmom ili triangularnom faktorizacijom matrice  $[G]$ .

Nelinearni elementi u okviru EMTP-a se modeluju na dva osnovna načina: linearizacijom dio po dio nelinearne krive ili pak direktnom

nelinearnom analitičkom funkcijom. Tako se nelinearni induktiviteti u okviru ovog programa lineariziraju po segmentima dok se nelinearni otpori predstavljaju analitičkim nelinearnim funkcijama. Pri predstavljanju nelinearnog otpora direktnom nelinearnom funkcijom npr.

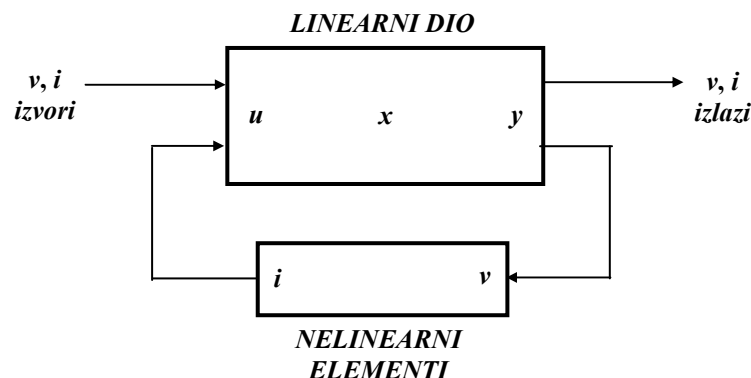
$$v_{k,m}(t) = f(i_{k,m}, t)$$

u okviru ovog programa koriste se kompenzacione metode.

*MATLAB/Simulink/Power System Blockset (PSB)* je programski paket za modelovanje, simuliranje i analizu elektroenergetskih dinamičkih sistema u okviru poznatog alata *MATLAB*. Paket podupire linearne i nelinearne sisteme modelirane u kontinuiranom vremenu ili diskretnim vremenskim trenucima, ili pak na oba načina. PSB sadrži sveobuhvatnu blok-biblioteku izvora, linearnih i nelinearnih elemenata, konektora te pratećih blok podsistema. Modeli se izgrađuju po hijerarhijskom principu. Sistem sa može vidjeti sa najvišeg nivoa gdje ulazeći u pojedine blokove tj. smanjujući nivo, razaznajemo detalje istih. Ovaj pristup daje uvid u način organizovanja modela i opis interakcije njegovih pojedinih dijelova. Na osnovu izgrađenog modela u simulacionom paketu se formiraju odgovarajuće diferencijalne i diferentne jednačine u *MATLAB* ili *C* jeziku. Nakon odabranih integracionih metoda simulacija se pokreće sa odgovarajućeg PSB menija ili sa komandnog prozora *MATLAB/Command Window*. Rezultate simulacija je moguće pratiti u toku izvršenja simulacije. Također se još u toku izvršenja mogu mijenjati parametri modela i trenutno pratiti eventualne promjene u toku izvršenja. Simulacioni rezultati se pohranjuju u *MATLAB/Workspace* za postprocesiranje, analizu i vizualizaciju. Svi demo modeli prezentirani u *PSB*-u utemeljeni su na dugogodišnjem iskustvu "Power System Testing" i "Simulation Laboratory" Hydro-Quebec, velikog elektroenergetskog postrojenja lociranog u Kanadi. S druge strane, razvijeni matematički aparat rezultat je dugogodišnjeg rada najmoćnije svjetske programske kuće ovog tipa "The MathWorks" SAD.

U okviru PSB-a model električnog sistema je predstavljen u dva osnovna dijela: model u prostoru stanja za linearni dio električnog kola i model povratne veze (koji koristi model strujnih izvora) za nelinearne elemente. Svaki blok u okviru PSB elemenata ima tri generalne karakteristike:  $u$ -vektor ulaza,  $y$ -vektor izlaza i  $x$ -vektor varijabli stanja, slika 3.7.2. Ulazne veličine determinišu naponski i strujni izvori, dok su izlazne veličine mjereni naponi i struje. Nelinearni elementi kao što su transformator ili odvodnik prenapona, prekidači, itd. se modeluju nelinearnom funkcijom  $\phi(v,i)=0$ . Svaki nelinearni element koristi napon na njegovim krajevima kao ulaznu veličinu povratne veze, te na osnovu toga, daje informaciju o struji

kao izlaznoj veličini povratne veze koja se zatim injektira u linearni dio kola.



**Slika 3.7.2 PSB blok model nastao korištenjem prostora stanja i povratne veze**

Budući da PSB radi u MATLAB/Simulink okruženju svaki njegov blok se automatski prevodi u odgovarajuću sistemsku funkciju tkzv. *S*-funkciju. Pojedinačni *PSB* blokovi, odnosno odgovarajuće *S*-funkcije, se potom povezuju generišući na kraju *S*-funkciju cijelog sistema. *S*-funkcije se zapisuju kao MATLAB *M*-fileovi gdje su pohranjene sve relevantne informacije o modelu. Specijaliziranom sintaksom pozivnih funkcija izgrađena je interakcija *M*-filea i izabranog numeričkog postupka *ODE* (*ordinary differential equations*) solvera koji rješava postavljenu zadaću.

MATLAB/Simulink a samim time i PSB imaju veoma bogatu biblioteku numeričkih solvera. Također PSB ima velike mogućnosti postprocesiranja budući da ima linkove sa ostalim *toolboxovima* kao što su *PDE* (*partial differential equations*) *toolbox*, *Image Processing toolbox*, *DATAFUN* (*data analysis and Fourier transformation*) *toolbox*, *SPLINE toolbox* itd.

Na kraju treba istaći da oba programska paketa svaki na svoj način imaju jasne komparativne prednosti: EMTP-ATP je superioran u pogledu broja i sofisticiranosti modela, dok je MATLAB/Simulink/PSB jasno dominantan u pogledu izbora numeričkih solvera kao i u pogledu postprocesiranja. Ipak i jedan i drugi program imaju niz lokalnih limitirajućih faktora (npr. ograničenja pri modeliranju elemenata) te neke negativne efekte nastale kao posljedice izgradnje i funkcionisanja samog programa (npr. efekat numeričkih oscilacija u oba programa, efekat numeričke nestabilnosti u oba programa, “*overshooting*” kod EMTP-ATP-a, algebarska petlja kod MATLAB/PSB-a) itd.