

## 2.10 Квалитет на електричната енергија – терминологија

За полесно разбирање на многуте поими од овде разгледуваната проблематика, во продолжение е даден преглед и толкување на најважните термини, застапени во проблематиката на квалитетот на електрична енергија. Во најголем дел, дефинициите се во согласност со актуелните индустриски стандарди. Овој оддел особено ќе биде корисен за електроинженерите од македонско говорно подрачје, бидејќи термините се даваат паралелно и на англиски (како може да се најдат во стручната литература на англиски) и на македонски. Притоа, немајќи усвоена терминологија, ние некои именки сами ги предлагаме, свесни дека тие можеби не се најдобрите.

➤ **active filter = активен филтер**

Заеднички назив за некој од многуте денес познати решенија за елиминирање на хармониското изобличување.

➤ **CBEMA curve = CBEMA крива**

Збир на криви кои се приказ на способностите на компјутерите да ги издржат без последици различните величини и времетраења на напонски пречки. Претставува производ на Computer Business Equipment Manufacturers Association (CBEMA), и како таков доби репутација на, де факто стандард за мерење на перформансите на сите типови опрема и енергетски системи.

➤ **coupling = спој (врска)**

Елемент или елементи од електричното коло или електричната мрежа кои можат да се сметаат како заеднички за влезната и за излезната мрежа и преку кои се остварува взаемниот трансфер на енергијата.

➤ **crest factor = фактор на темена вредност**

Вредност која ја покажуваат многу од инструментите наменети за мониторинг на квалитетот на електричната енергија. Претставува однос меѓу темената вредност на измерениот бранов облик и неговата ефективна вредност. На пример, факторот на темена вредност на синусоиден бран изнесува 1,414.

➤ **critical load = критично оптоварување**

Уреди и опрема со чие неправилно функционирање се загрозува здравјето и безбедноста на персоналот кој ги опслужува, што понатаму резултира во целосен престанок на функцијата, финансиска загуба и штета врз опремата на корисникот.

➤ **current distortion = струјно изобличување**

Изобличување на наизменичната линиска струја.

➤ **distortion = изобличување**

Секое отстапување од нормалниот синусен бран, за наизменични големини.

➤ **dropout = испад**

Престанок на функционирањето на опремата, како последица на шум, напонска јама или прекин.

➤ **dropout voltage = напон на испад**

Напон при кој уредот ја откажува својата функција.

➤ **electromagnetic compatibility = електромагнетна компатибилност**

Способност на уредот, опремата или системот, да функционираат задоволително добро во својата електромагнетна околина, без да предизвикува нетолерантни електромагнетни пречки врз било што во околината.

➤ **equipment grounding conductor = заземјителен проводник на опремата**

Проводникот кој се користи за поврзување на деловите кои не се под напон во нормална состојба, а кои се делови на системот кој е под напон, со заземјениот проводник (неутрален) како и со заземјената електрода.

➤ **fast tripping = брзо исклучување**

Се однесува на вид на делување на релејната заштита во електростопанските постројки, во кои прекинувачот на моќност или линискиот превклучувач дејствува пред осигурувачот да успее да прегори. Ова се нарекува уште и спасување на осигурувачот. Ефикасно е за отстранување на грешки од типот на привремени куси врски, без да се предизвика траен прекин.

➤ **fault = грешка, куса врска**

Генерално, се однесува на куса врска во енергетскиот систем.

➤ **fault, transient = грешка, од привремен карактер**

Куса врска во системот која обично е предизвикана од удар на гром, гранки на дрвја или животни кои можат да се отстранат со моментално прекинување на струјата.

➤ **frequency deviation = фреквентна девијација**

Пораст или намалување на мрежната фреквенција. Времетраењето на ова фреквентно отстапување може да е од неколку циклуси, па се до неколку часови.

➤ **frequency response = фреквентен одговор**

Во областа на проблематиката со квалитетот на електрична енергија, се однесува на варијацијата на импедансата на системот, или пак на некој мерен претворувач, во функција од фреквенцијата.

➤ **fundamental (component) = основна компонента**

Компонента од прв ред (50 или 60 Hz) од Фуриеровиот развој на периодичната големина.

➤ **ground = земја, заземјување**

Проводна врска, намерна или случајна, преку која електричното коло или опремата е поврзана со земјата, или со некое проводно тело со релативно голема маса, кое служи наместо земјата. *Забелешка:* Се користи за воспоставување и одржување на потенцијалот на проводниците на потенцијал на земјата (или проводливото тело) кои се поврзани со земјата (проводливото тело) и за одведување на струите кон и од земјата (проводливото тело).

➤ **ground electrode = заземлителна електрода**

Проводник или група на проводници во директен контакт со земјата, со цел обезбедување на врска со земја.

➤ **ground grid = доземна мрежа**

Систем од меѓусебно поврзани голи проводници, составени во еден вид на шаблон или мрежа над некоја област и поставени на, или закопани

под површината на земјата. Примарната цел на оваа доземна мрежа е да се обезбеди безбедност за работниците, со ограничување на потенцијалните разлики во својот периметар на задоволително сигурносно ниво, а за случај на појава на високи струи и доаѓање на колото на кое се работи под напон и тоа од било кои причини или на пример, поради неправилност во соседното струјно коло. За истата цел, често се употребуваат и површински проводливи покривки или метални премази. Ова не мора да биде истовремено и референтна мрежа за сигнали.

➤ **ground loop = доземна јамка**

Потенцијално штетна јамка, која се формира кога две или повеќе точки во еден електричен систем, кои номинално се на доземен потенцијал, се поврзани преку проводна патека така што или едната или и двете точки не се на истиот доземен потенцијал.

➤ **harmonic (component) = хармоник**

Компонента од ред поголем од еден, од Фуриевиот ред на периодична големина.

➤ **harmonic distortion = хармониско изобличување**

Периодично изобличување на синусниот бран.

➤ **harmonic filter = хармониски филтер**

Уред за “филтрирање” на еден или повеќе хармоници од енергетскиот систем. Повеќето вакви решенија се пасивни комбинации од индуктивност, капацитивност и активна отпорност. Поновите технологии вклучуваат активни филтри кои што така можат да ги задоволат потребите од реактивна енергија.

➤ **harmonic number = реден број на хармоникот**

Цел број, добиен како однос меѓу фреквенцијата на хармоникот со основната фреквенција.

➤ **impulsive transient = импулсна преодна појава**

Ненадејна промена не со индустриската фреквенција, при стабилна состојба на напонот или струјата која е со само еден поларитет, или само позитивна, или само негативна.

➤ **instantaneous = миговен**

Кога се употребува како модификатор, за одредување на времетраењето на краткотрајната варијација; одговара на временски опсег од 0,5 до 30 циклуси, на индустриската фреквенција.

➤ **instantaneous reclosing = миговно ревклучување**

Термин кој се користи при повторното вклучување на прекинувачот во електродистрибуција, што е можно побрзо по прекилот на струјата на грешка. Типичното време е меѓу 18 и 30 циклуси.

➤ **interharmonic (component) = меѓухармоник**

Фреквентна компонента на периодична големина која не е целоброен множител на фреквенцијата на која е предвиден да работи системот.

➤ **interruption, momentary = прекин, моментален (терминологија во енергетски системи)**

Прекин со ограничено времетраење, ограничено со периодот потребен за повторно враќање на работната состојба со автоматско или мануелно вклучување. Ваквите прекинувачки операции мора да се завршат во време кое не надминува 5 минути.

- **interruption, momentary = прекин, моментален (термин во квалитет на ел. енергија)**

Вид на краткотрајна варијација. Целосно губење на напонот ( $< 0,1$  единични големини) кај една или повеќе фази, за време помеѓу 30 циклуси и 3 секунди.

- **interruption, sustained = прекин, траен (енергетски системи)**

Секој прекин кој не се смета за моментален.

- **interruption, sustained = прекин, траен (квалитет на ел. енергија)**

Вид на долготрајна варијација. Целосно губење на напонот ( $< 0,1$  единични големини) кај еден или повеќе фазни проводници, за време поголемо од 1 минута.

- **interruption, temporary = прекин, привремен**

Вид на краткотрајна варијација. Целосно губење на напонот ( $< 0,1$  единични големини) кај една или повеќе фази, за време помеѓу 3 секунди и една минута.

- **isolation = изолација**

Одделување на една секција на системот од несакани влијанија на други секции.

- **linear load = линеарен потрошувач**

Потрошувачки електричен уред, кој во состојба на стационарна работа претставува во суштина константна импеданса спрема напојниот извор за целото време на циклусот на применетиот напон.

- **long-duration voltage = долготрајна варијација**

Варирање на ефективната вредност на напонот од номиналната, за време подолго од една минута.

- **momentary = моментално**

Се користи како атрибут да ја означи големината на времетраењето на краткотрајна варијација, при што одговара на време од 30 циклуси до 3 секунди, при индустриска фреквенција.

- **noise = шум**

Несакани електрични сигнали кои предизвикуваат непожелни ефекти во колата на контролните системи во кои се појавуваат. (Во текстов, со терминот контролен систем се мисли на осетлива електронска опрема, целосна или делови од неа).

- **nominal voltage ( $U_n$ ) = номинален напон**

Номинална вредност која се донесува во колото или системот и која е конвенционално утврдена како класа на напон ( $U_0$  САД 208/120, 480/277 или 600, а во Европа на пример 230/400 V).

- **nonlinear load = нелинеарно оптоварување**

Електрично оптоварување кое повлекува дисконтинуирана струја или чија импеданса варира за време на брановиот циклус на влезната наизменична струја.

- **normal mode voltage = напон во нормален мод**

Напонот кој се појавува помеѓу активните проводници во колото, на пример меѓу фазата и нулата.

- **notch = засек**

Прекинувачко (или друго) пореметување на нормалниот бранов облик на напонот што трае помалку од половина циклус; секогаш е со спротивен поларитет од брановиот облик.

➤ **oscillatory transient = осцилаторна преодна појава**

Ненадејна промена со фреквенција различна од индустриската фреквенција, при стабилна состојба на напонот или струјата, која вклучува вредности и со позитивен и со негативен поларитет.

➤ **overvoltage = пренапон**

Се среќава при опишувањето на специфичен тип на долготрајна варијација, а се однесува на напон кој има вредност за најмалку десет проценти над номиналниот напон, за период на време подолг од една минута.

➤ **passive filter = пасивен филтер**

Комбинација од калеми, кондензатори и отпорници, проектирани да елиминираат еден или повеќе хармоници. Најчесто среќавана комбинација е едноставна врска на калем, во серија со кондензатор, што “на кусо” го отстранува главниот изобличувачки хармоник од системот.

➤ **phase shift = фазно поместување**

Изместување во време на еден напонски бранов облик во однос на друг (други).

➤ **power factor, displacement = фактор на моќност на изместување**

Фактор на моќност на компонентите на основната фреквенција на брановите облици на напонот и струјата.

➤ **power factor (true) = фактор на моќност (вистински)**

Однос помеѓу активната моќност (во вати) и привидната моќност (во волтампери).

➤ **pulse = импулс**

Брза и ненадејна варијација со краткотрајно дејство на физичката големина, проследено со нагло враќање на иницијалната (почетна) вредност.

➤ **reclosing = повторно вклучување (ревклучување)**

Практика на електростопанство кај надземните водови за повторно вклучување на прекинувачот, за краток период по отстранувањето на грешката, кое нешто ја има предноста ако се знае дека повеќето грешки се преодни или привремени појави.

➤ **recovery time = време на повраќање**

Временскиот интервал потребен за излезниот напон или струја да се вратат на пропишаната вредност, после нагло оптоварување или промена во мрежата. Исто така, може да означува временски интервал потребен да се врати системот во оперативна состојба, по прекин или испад.

➤ **sag = напонска (струјна) јама**

Намалување на ефективната вредност на напонот или на струјата на вредност помеѓу 0,1 и 0,9 единични големини, на индустриска фреквенција, во временски интервал во траење од 0,5 циклуси до една минута.

➤ **shield = плашт (оклоп)**

Присутен е кај мерните кабли, а се однесува на проводен слој (обично метален), кој е нанесен врз изолацијата на проводникот или групата проводници, со цел да редуцира било каква врска меѓу вака заштитените проводници и некои други, кои можат да бидат извор на несакани електростатички или електромагнетни полиња (шум).

➤ **shielding = оклопување**

Претставува употреба на проводна и/или феромагнетна бариера помеѓу потенцијален извор на пореметувачки шум и осетливо коло. Оклопите се користат за заштита на кабли (со податоци, енергетски) или електронски кола.

- **shielding (of utility lines) = заклонување (на дистрибутивните водови)**

Поставување на заземјен проводник над водовите, со задача да ги пресретне ударите на гром и да ги задржи притоа настанатите струи надвор од енергетскиот систем.

- **short-duration variation = краткотрајна варијација**

Варирање на ефективната вредност на напонот од номиналната за време подолго од половина циклус но пократко или еднакво на една минута, при индустриска фреквенција. Вообичаено дополнително се карактеризира величината на напонската варијација или времетраењето на таа варијација (на пример, миговно, моментално или привремено).

- **signal reference grid (or plane) = референтна мрежа за сигнали**

Систем од проводни патеки помеѓу меѓусебно поврзаната опрема кои ги редуцираат индуцираните напонски шумови на нивоа кои минимизираат можност за појава на неправилно функционирање.

- **sustained = трајни**

Кога се сака да се определи големината на времетраењето на напонскиот прекин; одговара на временска рамка која е карактеристична за долготрајна варијација (подолго од една минута).

- **swell = зголемување на напонот**

Привремен пораст на ефективната вредност на напонот за повеќе од десет проценти од номиналната, при индустриска фреквенција, со времетраење од половина циклус до една минута.

- **synchronous closing = синхронно затварање**

Генерално, се користи со значење дека се затвораат сите три пола на кондензаторскиот прекинувач во синхронизам со енергетскиот систем, а со цел да се минимизираат преодните појави.

- **temporary = привремен**

Се користи при определувањето на времетраењето на краткотрајните варијации и одговара на време од 3 секунди до 1 минута.

- **total demand distortion (TDD) = изобличување на вкупната побарана струја**

Однос помеѓу ефективната вредност на хармониската струја и ефективната вредност на основниот хармоник на номиналната или максималната побарана струја, изразен во проценти.

- **total disturbance level = вкупно ниво на пречки**

Ниво на дадено електромагнетно пореметување, причинето од збирот на сите емисии од сите делови на опремата во дадениот систем.

- **total harmonic distortion (THD) = вкупно хармониско изобличување**

Однос помеѓу ефективната вредност на хармониската содржина и ефективната вредност на основниот хармоник, изразен како процент од основниот хармоник.

- **transient = преодна појава**

Обележува појава или големина која варира помеѓу две последователни стабилни состојби, за време на временски интервал кој е краток, споредено со времето кое се посматра. Преодната појава може да биде еднополарен импулс од било кој поларитет или пригушен осцилаторен бран со прв максимум од било кој поларитет.

➤ **tripplen harmonics = тројни хармоници**

Термин кој често се однесува на непарните множители на третиот хармоник, кои заслужуваат посебно внимание поради нивната природна тенденција да бидат со нулти редослед.

➤ **undervoltage = поднапон**

Се употребува кога се сака да се опише посебен тип на долготрајна варијација, а се однесува на измерениот напон кој има вредност најмалку десет проценти помала од номиналната, за време подолго од една минута.

➤ **voltage change = промена на напонот**

Варијација на ефективната или врвната вредност на напонот помеѓу две последователни нивоа, со недефинирано времетраење.

➤ **voltage distortion = изобличување на напонот**

Изобличување на наизменичниот линиски напон.

➤ **voltage fluctuation = флукуација на напонот**

Сериј на напонски промени или циклични варијации на напонската амплитуда (обвојница).

➤ **voltage imbalance (unbalance) = несиметрија на напонот**

Состојба при која трифазните напони се разликуваат по својата големина или пак се изместени од нивното нормално меѓусебно фазно поместување од 120 степени, или и двете. Често се прикажува како однос помеѓу инверзната или нултата компонента на напонот и директната компонента на напонот, во проценти.

➤ **voltage interruption = прекин на напон**

Исчезнување на напојувањето кај една или повеќе фази.

➤ **voltage regulation = регулација на напон**

Степен на контрола или стабилност на ефективната вредност на напонот при оптоварувањето. Често оди заедно со други параметри, како што се промени на влезниот напон, промени на оптоварувањето или температурни промени.

➤ **waveform distortion = изобличување на брановиот облик**

Отстапување од идеалната синусна крива, при индустриска фреквенција, првенствено карактеризирано со спектралниот состав на отстапувањето.

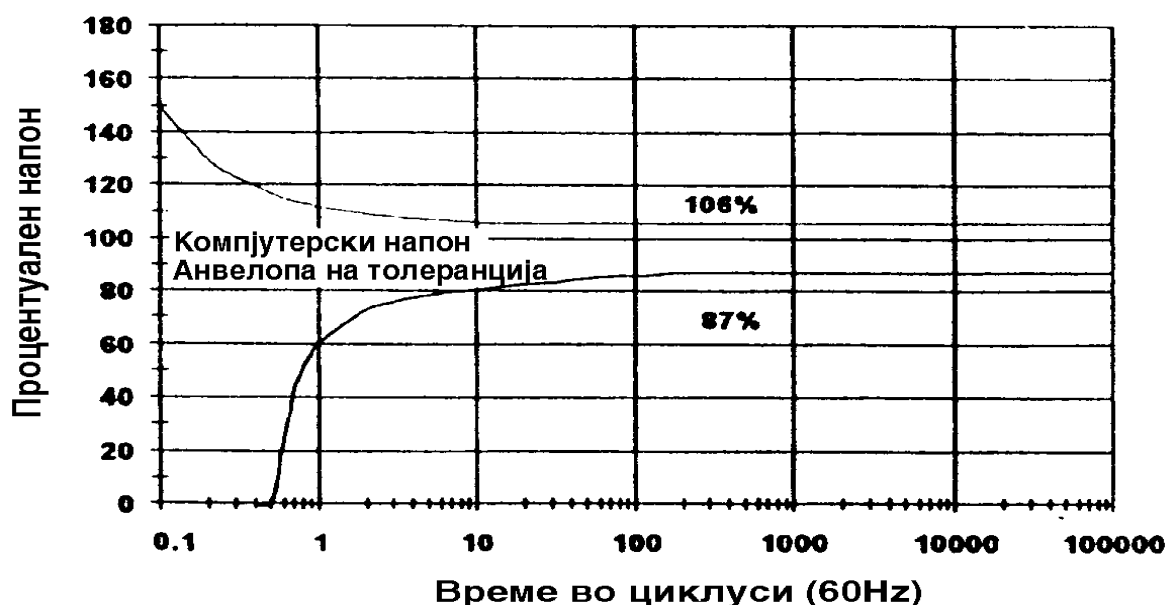
## 2.11 Двосмислени термини

Продавачите на опрема, со цел да ги привлечат потенцијалните муштерии, креирале сопствени интересни фрази за одредени технички термини. За жал, многу од тие фрази се премногу двосмислени за да можат да бидат прифатени и користени во техничките документации. Зборовите кои следуваат како илустрација на овде кажаново, имаат различна историја на појавување и употреба. *Пример:* blackout-укинува, брише, паѓа во несвест; blink-трепка, светка; brownout-затемнува; bump-

удар; raw power-суро̀ва, необработена моќност; clean power-чиста моќност, dirty power- нечиста моќност; spike-клин; wink-намигнување и многу други.

## 2.12 СВЕМА крива

Еден од најчесто користените показатели за квалитетот на енергијата е таканаречената СВЕМА<sup>1</sup> крива. Дел од оваа крива, извадок од



Слика 2.11 Дел од СВЕМА кривата, која се користи како цел за постигање за произведената опрема и критериум за формирање на извештај за варијациите на квалитетот на електричната енергија

IEEE Standard 446, кој наоѓа примена во анализите од овде разгледуваната проблематика е прикажан на Слика 2.11. Оваа крива е оригинално развиена од СВЕМА, а со цел да даде приказ на издржливоста на компјутерската опрема на големината и времетраењето на напонските варирања во енергетскиот систем. Иако денес постојат многу нови модерни компјутери чии толеранции на погоре споменатите пречки не се во опсегот на СВЕМА, сепак оваа крива се здоби со имиџ на стандард за осетливата опрема која се вградува во системот и која е гарант за податоците, кои пак се илустрација на евентуалните промени во квалитетот на работата на тие системи.

Оските на сликата ги претставуваат големината на напонот (на ординатата, во %) и времетраењето (циклуси за 60 Hz, на апсцисата) на разгледуваниот случај. Точките под долната крива се за состојба при која настанува испад и останување без напојување, а како последица на недостатокот на енергија. Точките пак, над горната крива, се за состојби при кои настануваат најразлични неправилни и штетни ситуации и при кои

<sup>1</sup> СВЕМА е кратенка за едно здружение во САД на производителите на компјутери и слична опрема (Computer Business Equipment Manufacturing Assotiation)



најчесто исклучува заштитата (од пренапони), има презаситување и сл. Горната крива всушност е дефинирана од 0,001 циклуси каде има вредност од околу 375 % на напонот. Ние вообичаено ја користиме ова крива некаде од 0,1 циклуси па нагоре, во склад со ограничувањата во квалитетот на мерните инструменти и разликите во дефинирањето на врвните вредности на големината на напонот, во временски сегменти помали од еден циклус.

Оваа крива се користи во текстов за да ја дефинира способноста за опстанок на разни потрошувачи и уреди при заштитата од варирање на квалитетот на ел. енергија. За нагледно да се прикажат резултатите од мониторирањето на квалитетот на ел. енергија, често пати се додава и трета оска, за да се прикаже бројот на настани во рамките на дефинирана клетка на амплитуда и траење. Ако се користи само како дводимензионална слика, и ако бројот на снимени настани е многу голем, би се добило големо преклопување и натрупување на точките на непрегледен начин, што не е многу корисно.

### 3. ХАРМОНИЦИ

Исправна претпоставка за повеќето електростопански компании е дека синусниот бранов облик на напонот, генериран во големите електрични центри е навистина добар. Во повеќето области, напонот кој го пренесува дистрибутивниот систем е со изобличување кое е доста помало од еден процент. Сепак, како доаѓаме до потрошувачите, изобличувањето се зголемува. За некои оптоварувања, брановите облици на струјата се едвај слични на синусен облик. Електронските конвертори ја сечат струјата во привидно произволни облици. Иако постојат неколку случаи каде изобличувањето е случајно, тоа е пред сè **периодично или хармониско**. Уште повеќе што, од еден циклус (на електричните величини) кон друг, имаме многу слаба промена или таа воопшто не постои. Сево ова ја зголеми употребата на терминот *хармоници*, со кој се опишуваат искривувањата во брановите облици.

Кога во седумдесеттите години од минатиот век, електронските конвертори за прв пат влегоа во употреба, се јави загриженост меѓу инженерите од енергетиката кои се сомневаа дали дистрибутивната мрежа ќе биде во состојба да се приспособи на хармониското изобличување. Се појавија лоши прогнози за судбината на енергетскиот систем, ако се дозволи работата на тие уреди. Иако голем дел од таквите предвидувања беа преувеличени, проблематиката која се занимава со анализата на квалитетот на електричната енергија им должи голема благодарност токму на тие луѓе, кои со таа своја загриженост допринесоа да се прошират истражувањата од таа област, со што се дојде до нови сознанија за сите аспекти на подобрување на квалитетот на енергијата.

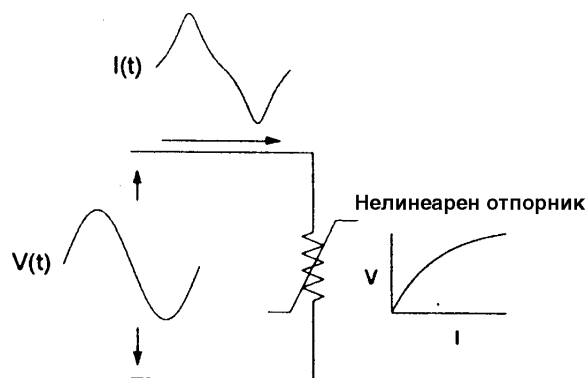
За некои, хармониското изобличување е сеуште најзначаен проблем за квалитетот на електричната енергија. Истиот им се спротивставува на многу од конвенционалните правила кои важат за енергетскиот систем, чие функционирање е поврзано со основната фреквенција. Поради тоа, инженерот се соочува со несекојдневна појава чие решавање бара исто така несекојдневни алатки и непозната опрема.

Иако проблемите со хармониците можат да бидат тешки, тие сепак не се така бројни во еден електродистрибутивен систем. За разлика од нив, напонските јами и прекините на пример, се скоро универзални за секој напоен систем и ги претставуваат најбројните и најзначајните отстапувања од квалитетната електрична енергија. Корисничкиот сектор многу повеќе страда од проблемите со хармониците отколку самото електростопанство. Посебно чувствителна е индустриската гранка која со своите регулирани електромоторни погони, лачните и индукционите печки и слично, навистина е погодена од проблемите чиј предизвикувач е токму хармониското изобличување.

Хармониското изобличување не е нова појава во енергетските системи. За него се зборувало уште од самите почетоци на производството на наизменична струја. Прегледувајќи ја техничката литература од триесеттите и четириесеттите години на минатиот век, можат да се пронајдат многу трудови на таа тема. Во тоа време, примарни извори биле трансформаторите, а примарен проблем претставувала индуктивната интерференција врз надземните телефонски водови.

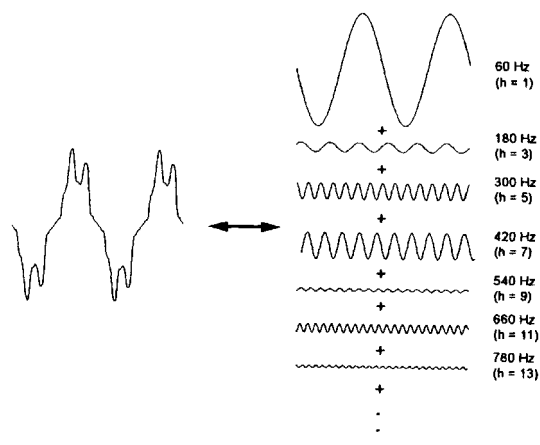
Со текот на годините, дојдено е до сознание дека ако системот е правилно проектиран да се справи со сите барања на потрошувачите, мала е можноста хармониците да можат да предизвикаат штета врз енергетскиот систем, иако сепак не е исклучен проблемот со телекомуникациите. Проблемите во системот најчесто се зголемуваат кога капацитетот на системот стапува во резонанција со индуктивитетот на критичната хармониска фреквенција, кое нешто драматично го зголемува изобличувањето над нормалната големина. Иако такви проблеми може да настанат во дистрибутивниот напоен систем, сепак најтешките случаи обично се среќаваат во индустриските напојни системи, каде се јавува поизразена резонанција.

### Хармониско изобличување



Слика 3.1 Струјна изобличеност предизвикана од нелинеарен отпор

Хармониското изобличување е последица на нелинеарните уреди во енергетскиот систем. Нелинеарен уред е тој кај кого струјата не е пропорционална со доведениот напон. Сликата 3.1. го покажува ова со случајот на синусоидален напон применет на едноставен нелинеарен отпорник во кој напонот и струјата варираат според прикажаната крива.



Слика 3.2. Нагледна претстава за изобличен бран кој се еквивалентира со Фуријеова низа од хармонични функции

(За случајот на наизменичен напон и индуктивитет без железо и капацитет е линеарен елемент, бидејќи на синусоидален напон, реакцијата е синусоидална струја).

Така, додека напонот е перфектно синусоидален, резултирачката струја е изобличена. Зголемување на напонот за само неколку проценти би имало за последица удвојување на струјата и добивање на поинаков бранов облик. Тоа, во основа е изворот на хармониското изобличување во енергетскиот систем.

За да стане појавата појасна, да дадеме некои примери. Активен отпор, капацитет и индуктивитет во едно електрично коло за наизменична струја се "линеарни" елементи. Критеријум е: ако на нив приклучиме наизменичен синусоидален напон, ќе добиеме синусоидална струја низ нив. Но една диода е нелинеарен елемент во едно електрично коло за наизменична струја. Ако на истата се приклучи синусоидален напон, низ неа ќе протече струја во вид на еднонасочни полубранови - полусинусоиди. Според Фурие, таквиот сигнал се разложува на бесконечен збир на синусоиди со поголеми фреквенции (цел број пати поголема фреквенција од основната). Според тоа, секој покомплициран склоп кој содржи елементи од електрониката, како што се диоди, транзистори, тиристори, тријаки и други слични, е всушност нелинеарен елемент, и според тоа и извор на струјни, а како последица на тоа и на напонски хармоници. А вакви електронски склопови се најзастапени во енергетската електроника за регулирано и управувано контролирање на електричната енергија низ разни потрошувачи, како што се регулираните електромоторни погони, печки и други.

Сликата 3.2 покажува дека секој периодичен, изобличен бранов облик, може да се претстави како сума од синусоиди. Тоа е кога брановиот облик е идентичен од еден циклус до следниот и кога претставува сума на чисто синусоидални бранови компоненти во кои фреквенцијата на секоја одделна синусоида е целоброен множител на основната фреквенција на изобличениот бран. Таквите компоненти се нарекуваат **виши хармоници** на појдовниот периодичен бран. Целобројниот множител не

фреквенцијата на вишите хармоници во однос на фреквенцијата појдовниот бран (основниот) се вика **“ред”** на хармоникот. Сумата од синусоиди се прикажува како Фуриерови ред, според големиот математичар кој го има откриено овој концепт на анализа и синтеза на периодичните функции.

Предноста од употребата на Фуриеровиот ред за претставување на изобличените бранови облици се огледа во тоа што е многу полесно да се најде одговорот на системот на влезот кој е синусоидален. Системот се анализира одвоено, секој хармоник посебно. Потоа, излезите за секоја фреквенција се комбинираат и формираат нови Фуриерови редови, од кои може да биде пресметан излезниот бранов облик, ако се сака. Честопати, од интерес се само величините на хармониците.

**Кога и обете, и позитивната и негативната полуериода на брановиот облик имаат идентичен облик, Фуриеровите редови содржат само нејарни хармоници.** Ова нуди понатамошно упростување за повеќето студии за енергетските системи, бидејќи повеќето уреди произведувачи на хармоници имаат исти облици за двата поларитети. Всушност, присуството на парен хармоник е често доволен доказ да се заклучи дека нешто не е во ред - или со опремата, или со претворувачот кој се користи во мерењето. Исклучоци од ова се полубрановите исправувачи и лачните печки, кога лакот е случаен. Тогаш навистина постојат и парните хармоници.

Вообичаено, хармониците од највисок ред (од над 25-от до 50-от, во зависност од системот), се занемарливи во анализите на системот. Иако можат да предизвикаат интерференција кај електронските уреди со мала моќност, обично не се штетни по енергетскиот систем. Исто така, многу е тешко да се соберат доволно точни податоци за моделирање на енергетскиот систем за овие фреквенции.

Ако го поделиме енергетскиот систем на сериски и шант (паралелни, кон земјата) елементи, што е и вообичаена практика, најголемиот дел од нелинеарностите во системот ги наоѓаме токму во паралелните. Сериската импеданса на енергетскиот дистрибутивен систем (импедансата на куса врска меѓу изворот и товарот) е препознатливо линеарна. Во трансформаторите, извор на хармоници е импедансата на магнетизирање на “Т” моделот; импедансата на растурање (сериската) е линеарна. **Според тоа, главни извори на хармониско изобличување ќе бидат крајните корисници.** Ова не значи дека сите крајни корисници кои се причина за хармониско изобличување се значајни извори на истите, но со ова се сака да се нагласи дека хармониското изобличување потекнува од оптоварувањата од некои крајни корисници или од комбинација на оптоварувања.

### Математичка основа на вишите хармоници

Математичката основа на вишите хармоници базирана е на работата на францускиот математичар Фурие (Fourier). Ако е зададена периодичната функција  $f(x)$  која има периода  $T$ , истата може да се замени со тригонометриска сума и тоа приближно или точно:

$$s_n(x) = \frac{a_0}{2} + a_1 \cos \omega x + a_2 \cos 2\omega x + \dots + a_{n1} \cos n\omega x + b_1 \sin \omega x + b_2 \sin 2\omega x + \dots + b_n \sin n\omega x \quad (1)$$

каде  $\omega = \frac{2\pi}{T}$ . За  $T = 2\pi$ , важи  $\omega = 1$ . Функцијата  $f(x)$  може да има било каква природа, на пример,  $x$  и  $f(x)$  да се должини, реални броеви,  $x$  да е време а  $f(x)$  да е некоја физичка величина (должина, притисок, струја, напон и сл.) Затоа, замената на една периодична функција со тригонометриска сума се користи во многу области на техниката (напр. теорија на осцилации). Во нашиот проблем,  $x$  и  $T$  имаат природа на време, а  $f(x)$  и  $s_n(x)$  се струја или напон.

Апроксимацијата  $s_n(x)$  за функцијата  $f(x)$  е најдобра (во смисла на најмала средна квадратна грешка), ако за коефициентите  $a_k$  и  $b_k$  ( $k = 1, 2, \dots, n$ ) ги одбериме Фуриеовите коефициенти за зададената функција:

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(x) \cos k\omega x dx = \frac{2}{T} \int_{x_0}^{x_0+T} f(x) \cos k\omega x dx = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} [f(x) + f(-x)] \cos k\omega x dx$$

$$k = 0, 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(x) \sin k\omega x dx = \frac{2}{T} \int_{x_0}^{x_0+T} f(x) \sin k\omega x dx = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} [f(x) - f(-x)] \sin k\omega x dx$$

$$k = 0, 1, 2, \dots, n$$

Овие формули во литературата може да се сретнат и во обликот кој важи за  $T = 2\pi$  ( $\omega = 1$ ):

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos kx dx = \frac{1}{\pi} \int_{\varphi}^{\varphi+2\pi} f(x) \cos kx dx = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} [f(x) + f(-x)] \cos kx dx$$

$$k = 0, 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$$b_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \sin kx dx = \frac{1}{\pi} \int_{\varphi}^{\varphi+2\pi} f(x) \sin kx dx = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} [f(x) - f(-x)] \sin kx dx$$

$$k = 0, 1, 2, \dots, n$$

Ако  $s_n(x)$  при  $n \rightarrow \infty$  за некое множество  $x$  клони кон одредена граница  $s(x)$ , тогаш за тие вредности на  $x$  добиваме конвергентен ред на зададената функција:

$$s(x) = \frac{a_0}{2} + a_1 \cos \omega x + a_2 \cos 2\omega x + \dots + a_{n1} \cos n\omega x + b_1 \sin \omega x + b_2 \sin 2\omega x + \dots + b_n \sin n\omega x \quad (4)$$

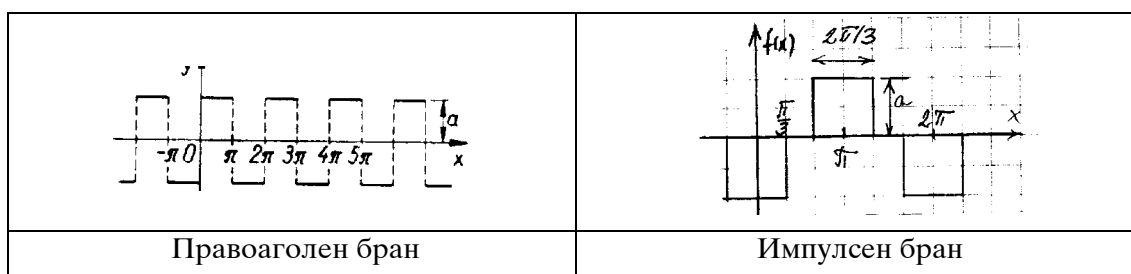
Фуриеовиот ред може да се напише и во следниот облик, ако се искористат некои тригонометриски идентичности:

$$s(x) = \frac{a_0}{2} + A_1 \sin(\omega x + \varphi_1) + A_2 \sin(2\omega x + \varphi_2) + \dots + A_n \sin(n\omega x + \varphi_n)$$

$$\text{каде се } A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \text{ и } \operatorname{tg} \varphi_k = \frac{a_k}{b_k}. \quad (5)$$

Одредувањето на Фуриеовиот ред за дадена функција се вика **Фуриеова анализа**. Множеството на амплитудите  $A_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, n$  чинат еден **дискретен амплитуден спектар**, а фазните агли  $\varphi_k$  чинат еден **дискретен фазен спектар**.

Како пример, без да спроведеме математичко решавање да видиме каков е развојот во Фуриев ред на периодична функција во вид на правоаголник, според подолните две слики. Вакви случаи на бранови облици има кај струјата која ја произведуваат некои трифазни мостни исправувачи.



Развојот, за правоаголен бран дава:

$$y = a \frac{4}{\pi} \left[ \sin x + \frac{1}{3} \sin 3x + \frac{1}{5} \sin 5x + \frac{1}{7} \sin 7x + \dots \right];$$

а за импулсен бран:

$$y = a \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \left[ \cos x - \frac{1}{5} \cos 5x + \frac{1}{7} \cos 7x - \frac{1}{11} \cos 11x + \dots \right].$$

Интересно е што колку редот на хармоникот повисок, неговата амплитуда е помала.

## Напонско или струјно изобличување

Зборот хармоници често се употребува без некое посебно додатно објаснување. На пример, може да се чуе дека некој регулиран електромоторен погон или некоја индуктивна печка не работат правилно поради хармоници. Што значи тоа? Може да значи едно од трите работи:

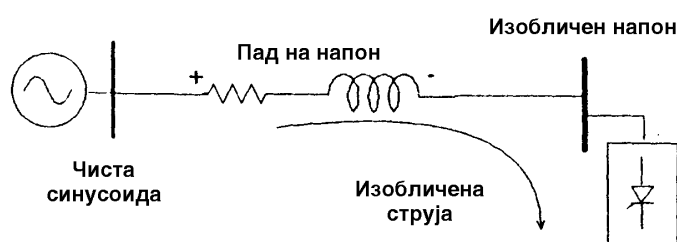
1. Хармониските напони се преголеми (напонот е премногу изобличен) за да управувањето правилно ги одреди аглиите на палење. Значи, недостатокот е во напојниот напон.

2. Хармониските струи се преголеми за капацитетот на некој уред во системот на напојување како што е трансформаторот, па тој мора да работи со помала моќност од предвидената. Значи, причина е во потрошувачот, кој повлекува премногу изобличена струја.

3. Хармониските напони се преголеми бидејќи хармониските струи предизвикани од уредот се преголеми за дадената состојба на системот. (Слично како во т. 2, но постои специфичен проблем, например, настанала резонанција)

Како што сугерира погорнава листа, постојат причинско и последични врски меѓу напоните и струите. Според тоа, терминот хармоници е дефинитивно премногу двосмислен за да опише некој проблем.

Нелинеарните уреди се сметаат за извори на хармониски струи и инјектори на истите во енергетскиот систем. Затоа, во скоро сите анализи, доволно е да се третираат овие потрошувачи-производители на хармоници едноставно како струјни извори. Исклучоците од ова правило ќе бидат дадени подоцна.



сл.3.3. Хармонични струи кои течат низ системската импеданса резултираат во хармоничен напон на товарот

Како што покажува Слика 3.3, напонското изобличување е резултат на изобличените струи кои поминуваат низ линеарните, сериски импеданси на дистрибутивниот систем. Иако беше претпоставено дека изворните собирници имаат само напон со индустриска фреквенција, хармониските струи кои поминуваат низ импедансата на системот предизвикуваат напонски пад за секој хармоник. Ова резултира во појава на напонски хармоници во собирниците кај потрошувачите. Големината на напонското изобличување зависи од импедансата и од струјата.

Додека хармониците на струјата на оптоварување во краен случај предизвикуваат напонско изобличување, треба да се потенцира дека оптоварувањето нема контрола врз напонското изобличување. Имено, исто оптоварување, на две различни локации во системот, ќе резултира во две различни вредности за напонското изобличување. Овој факт е основа за поделба на одговорностите за контрола на хармониците што се наоѓа во стандардите, како што е ИЕЕЕ стандардот 519-1992:

1. Контролата над хармоничната струја инјектирана во системот се случува кај потрошувачот на крајниот корисник.
2. Претпоставувајќи дека инјектирањето на хармоничната струја е во разумни граници, контролата над напонската дисторзија се врши од оние кои имаат контрола над системската импеданса т.е. фирмите испорачатели на ел. енергија.

Мора да се биде внимателен кога се опишува феноменот на изобличувањето, за да се разбере дека постојат суштествени разлики помеѓу причините и ефектите од хармониските струи и напони. Поради сето досега кажано, терминот хармоници мора да се користи во согласност со она за што се однесува. Така на пример, кога се користи во речникот на електростопанските компании, терминот хармоници се однесува на напонот. Во други случаи, се однесува на струјата итн.

### **Хармоници или преодни појави**

Хармониското изобличување се окривува за многу пореметувања на квалитетот на електричната енергија иако вистинската причина често се преодните појави. Мерењето во некој случај може да покаже изобличен бранов облик со очигледни високофреквентни компоненти. Иако пречките од преодните појави содржат високофреквентни компоненти, преодните појави и хармониците се препознатливо различни појави и се анализираат различно. Брановите облици поради преодни појави покажуваат високи фреквенции само накратко откако се случила ненадејната и брза промена во енергетскиот систем. Тие високи фреквенциите не мора да се и хармоници; тие се такви какви што се природните фреквенции на осцилирање на системот, во времето на прекинувачката операција. Овие фреквенции немаат никаква врска со основната фреквенција на системот.

Хармониците, по дефиниција, се појавуваат во стабилна состојба и се целобројни множители на основната фреквенција. Изобличувањето на брановиот облик кое создава хармоници е присутно континуирано или најмалку неколку секунди. Транзиентите обично исчезнуваат после неколку циклуси. Тие се поврзуваат со промените во системот, како што е вклучувањето на кондензаторски батерии. Хармониците пак, се поврзуваат со континуирано работење на оптоварувањето.

Еден случај кога разликата меѓу две опишувани појави е нејасна е ставањето под напон на енергетски трансформатор. Ова е преодна појава, но може да создава значително изобличување на брановиот облик, за време од повеќе секунди и се знае дека возбужда резонанција на системот.

### **Целосното хармониско изобличување и ефективната вредност**

Постојат неколку мерки кои се користат за индикација на хармониската содржина на брановиот облик со еден единствен број. Една од нив е и со помошта на целосното хармониско изобличување (Total Harmonic Distortion) (*THD*), кое може да се пресмета и за напон или за струја:

$$THD(M) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} M_h^2}}{M_1} \quad \dots [3.01]$$



каде  $M_h$  е ефективната вредност на хармониската компонента со ред  $h$ , на величината  $M$ .  $THD(M)$  е мерка за ефективната вредност на хармониските компоненти на изобличениот бранов облик, што укажува потенцијалната моќ за загревање предизвикано од хармониците, во однос на моќта на основниот хармоник.

Ефективната вредност на целиот бранов облик (кој е составен од повеќе хармоници) не е сума од индивидуалните компоненти туку е квадратен корен од сумата на квадратите:

$$M_{ef} = \sqrt{M_1^2 + M_2^2 + \dots + M_n^2 + M_0^2} = \sqrt{\sum_{h=0}^n M_h^2}$$

каде  $M_0$  е еднонасочната компонента, ако таква постои.

Врската на  $THD$  со ефективната вредност на брановиот облик е според следната равенка:

На пример, нека сложениот бранови облик има ефективна вредност  $M_{ef}$  и нека е составен од компонентите чии ефективни вредности се  $M_h, h = 1, \dots, h_{\max}$ :

$$M_{ef} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{\max}} M_h^2} = M_1 \sqrt{1 + THD(M)^2}, \text{ и применливо за напонот и струјата:}$$

$$U_{ef} = U_1 \sqrt{1 + THD(U)^2} \quad ; \quad I_{ef} = I_1 \sqrt{1 + THD(I)^2} \quad \dots [3.02]$$

(*rms* или на други места RMS доаѓа како кратенка од Root mean square што значи корен од средна вредност на квадратите, а тоа е дефиницијата за ефективна вредност на еден сигнал, напон или струја. Затоа, во англиска литеартура наместо индексот *ef* може да се сретне индексот *rms*).

$THD$  е многу корисна големина за многу примени, но мора да бидат сфатени неговите ограничувања. Може да покаже колку екстра топлина ќе се реализира кога изобличен напон ќе се донесе на активно оптоварување. Индикација е и на додатните загуби, причинети од текот на струјата низ некој проводник. Но, не е добар индикатор на напонското напрегање во кондензаторите бидејќи тоа зависи од врвната вредност на напонскиот бранов облик, а не на неговата ефективна вредност или моќ за загревање.

Хармониските напони скоро секогаш се однесуваат на фундаменталната<sup>2</sup> вредност на брановиот облик (и се мерат како проценти од фундаменталната вредност), во времето на земањето на примерокот. Бидејќи напонот варира за само неколку проценти, (значи, неговата вредност многу не се менува, (напр. нискиот напон може да биде 230 +/- 20 V) напонскиот  $THD$  е скоро секогаш значаен (смислен, логичен) број. Ова не е случај со струјата. Мала струја може да има висок  $THD$ , а да не биде

<sup>2</sup> Под “Фундаментална” секогаш во текстов го разбираме основниот хармоник, т.е. хармоникот со реден број 1.

сериозна закана за системот. Со оглед на тоа што, повеќето уреди за мониторинг даваат THD базиран на зементиот примерок во мерениот момент, корисникот може да биде погрешно наведен на мисла дека струјата е опасна. Некои аналитичари се имаат обидено да ги избегнат овие потешкотии, со вклучување на терминот изобличување на вкупната побарана струја т.е  $TDD$ , на местото од  $THD$ , термин кој служи како основа за смерниците од стандардот IEEE Standard 519-1992 (таму е

$$TDD(I) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} I_h^2}}{I_n}.$$

### Вежби:

#### Ефективна и темена вредност

**Ефективна вредност** (на англиски: root mean square value или rms value) на една периодична величина на пример струја е:

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} \quad \text{а средна вредност:} \quad I_{sr} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} i dt$$

Со ефективната вредност на струјата е поврзан ефектот на загревање кога таа тече низ некој отпор, а со средната вредност - количеството протечено електричество. Ако периодичната величина е синусоида, меѓу темената и ефективната вредност владее односот:

$$\frac{I_m}{I_{ef}} = \sqrt{2} = 1,414.$$

Ако функцијата е изобличена (присуство на виши хармоници) овој однос може да биде и помал и поголем од 1,414. Меѓу ефективната и средната вредност пак кај синусоидата, односот е 1,1. Аналогно вреди и ако величината е напон.

Многу од поевтините амперметри и волтметри мерат всушност средна вредност, но со вграден коефициент во самата показна скала од 1,1 тие при чист синусоидален облик покажуваат ефективна вредност. Ако обликот не е синусоидален, тие покажуваат погрешна вредност.

Денес преовладуваат електронски мерни инструменти кај кои може релативно полесно да се оствари мерење на ефективна вредност. Тоа не значи дека порано не постоеле инструменти кои покажуваат вистинска ефективна вредност на напонот и струјата. Постоеле, но тие за мерење користеле некој физички ефект кој зависи од ефективната вредност на величината која се мери, на пример загревање на жица кај мерење на струјата, односно електростатичка сила кај електростатичкиот волтметар. Но секогаш, па и денес, кога во мерната техника доминираат електронските инструменти, мерењето на вистинска ефективна вредност е својство на поскапите инструменти. На нив стои ознаката "true RMS".

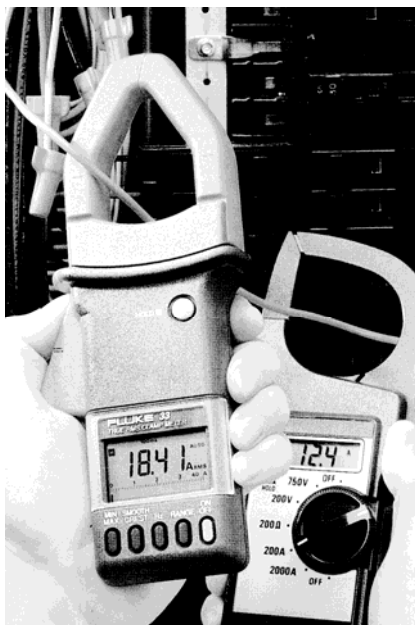
Затоа, важно е да знаеме со какви инструменти располагаме. Значи инструментите кои мерат вистинска ефективна вредност, исправно ќе мерат ефективна вредност и кога обликот содржи виши хармоници и кога се работи за идеална синусоида. Се разбира, и овде има некоја граница на изобличеност до која мерењето е точно, што може да се види од техничкото упатство на инструментот. Некои од модерните инструменти кои мерат вистинска ефективна вредност, имаат можност да ја измерат и темената вредност. И ова својство ни е потребно за откривање на вишите хармоници.

### **Фактор на темената вредност, фактор на обликот (англиски: crest factor)**

Под овој поим го разбираме односот на темената кон ефективната вредност. Видовме дека за синусоида тој однос е  $\sqrt{2}$  односно 1,4142. Ако обликот отстапува од синусоида, и овој однос отстапува од оваа вредност. Значи, потребно е да го утврдиме овој однос за напонот или струјата. Ако измерениот фактор е различен од  $\sqrt{2}$ , тогаш ова значи дека се присутни виши хармоници во мерената величина. По правило, колку е поголема добиената разлика во однос на  $\sqrt{2}$ , толку е поголема содржината на вишите хармоници. Кај напонските мерења, типично е да се добие помала вредност од  $\sqrt{2}$  (затапен облик на напонот), додека кај струјните мерења - се добива обично вредност поголема од  $\sqrt{2}$ .

Откако се утврди присуство на виши хармоници, понатамошните квантитативни сознанија може да се добијат ако се употребат понатамошни специјализирани мерни инструменти за вакви мерења, односно се ангажира специјалист по проблематиката.

Поедноставен начин да се утврди присуството на виши хармоници во струјата, е со употреба на симултано мерење на иста струја со два инструменти, од кои едниот мери вистинска ефективна вредност, а другиот ефективната вредност ја мери преку мерење на средната вредност. Ако мериме со струјни клешти (згоден начин, бидејќи не мораме да го прекинуваме струјното коло) едната струјна клешта е посовршена (на пример Fluke 33) а другата некоја поедноставна, која мери преку мерење на средната вредност, би добиле различни измерени вредности, сл.1.



сл.1

сл.1: Симултано мерење на струјата со две струјни клешти кои работат на различен мерен принцип

И во овој случај, после дијагностицирањето, потребни се натамошни мерења и испитувања ако сакаме да добиеме подлабоки сознанија.

### Примери:

**1. Задача** Најди ја ефективната вредност на следните функции (сигнали):

а)  $U_m \cos \omega_o t$ ,  $T = \frac{2\pi}{\omega_o}$ ;

б)  $U_m \cos(\omega_o t) + U_h \cos 3\omega_o t$ ,  $T = \frac{2\pi}{\omega_o}$ .

### Решение:

а) За функцијата :  $U_m \sin \omega_o t$ ,  $T = \frac{2\pi}{\omega_o}$ , имаме:

$$\begin{aligned}
 U_{rms} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T f^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U_m^2 \cos^2 dt} = U_m \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \frac{1 + \cos 2\omega t}{2} dt} = \\
 &= \\
 U_m \sqrt{\frac{1}{T} \left( \frac{1}{2} t + \frac{\sin 2\omega_o t}{4\omega_o} \right) \Big|_0^T} &= U_m \sqrt{\frac{1}{T} \left( \frac{1}{2} T + \frac{\sin 2\omega_o T}{4\omega_o} \right)} = U_m \sqrt{\left( \frac{1}{2} + \frac{1}{T} \frac{\sin 2\omega_o T}{4\omega_o} \right)} = \\
 U_m \sqrt{\left( \frac{1}{2} + \frac{\omega_o}{2\pi} \frac{\sin 2\omega_o \frac{2\pi}{\omega_o}}{4\omega_o} \right)} &= U_m \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{1}{2\pi} \frac{\sin 4\pi}{4}} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 1,41 U_m.
 \end{aligned}$$

б) За функцијата  $U_m \cos(\omega_o t) + U_h \cos 3\omega_o t$ ,  $T = \frac{2\pi}{\omega_o}$  имаме:

$$\begin{aligned}
 U_{rms} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T f^2(t) dt} = \\
 &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (U_m^2 \cos^2 \omega_o t + U_h^2 \cos^2 3\omega_o t + 2U_m U_h \cos \omega_o t \cos 3\omega_o t) dt} =
 \end{aligned}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (U_m^2 \frac{1 + \cos 2\omega_o t}{2} + U_h^2 \frac{1 + \cos 6\omega_o t}{2} + U_m U_h \cos 2\omega_o t + U_m U_h \cos 4\omega_o t) dt} =$$

$$= \sqrt{(I_1 + I_2 + I_3)}, \text{ каде } I_1, I_2 \text{ и } I_3 \text{ се соодветните интеграли.}$$

Првиот интеграл веќе го имавме во задачата под 1 и тој е:

$$I_1 = \frac{U_m^2}{2}$$

Вториот интеграл дава:

$$I_2 =$$

$$\frac{1}{T} \int_0^T U_h^2 \cos^2 3\omega_o t dt = U_h^2 \int_0^T \frac{1 + \cos 6\omega_o t}{2} dt = U_h^2 \left( \frac{1}{2} t \Big|_0^T + \frac{1}{2} \int_0^T \cos 6\omega_o t dt \right) =$$

$$= \frac{1}{T} U_h^2 \left( \frac{1}{2} T + \frac{1}{2} \int_0^{12\pi} \frac{1}{6\omega_o} \cos z dz \right) = \frac{1}{T} U_h^2 \left( \frac{1}{2} T + \frac{1}{12\omega_o} \sin z \Big|_0^{12\pi} \right) =$$

$$= \frac{1}{T} U_h^2 \left( \frac{1}{2} T + \frac{1}{12\omega_o} (0 - 0) \right) = \frac{1}{T} U_h^2 \frac{1}{2} T = \frac{U_h^2}{2}$$

При ова е користена смената:

$$z = 6\omega_o t; \quad dt = \frac{1}{6\omega_o} dz; \quad t = 0 \Rightarrow z = 0; \quad t = T \Rightarrow z = 6\omega_o T = 6\omega_o \frac{2\pi}{\omega_o} = 12\pi$$

Третиот член каде функцијата е производ на двете функции со различни фреквенции ќе даде:

$$I_3 = \frac{1}{T} \int_0^T 2U_m U_h \cos \omega_o t \cos 3\omega_o t dt = \frac{1}{T} \int_0^T (U_m U_h \cos 2\omega_o t + U_m U_h \cos 4\omega_o t) dt = 0$$

е очигледно нула, но и во претходната форма тоа би требало да е јасно бидејќи двете подинтегрални функции се ортогонални функции, а како такви, интеграл од нивниот производ за цел број периоди е еднаков на нула (види математички прирачници). Значи, ефективната вредност на целиот сигнал е:

$$U_{rms} = \sqrt{(I_1 + I_2 + I_3)} = \sqrt{\left(\frac{U_m}{2} + \frac{U_h}{2}\right)} = \sqrt{\left(\frac{U_m}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{U_h}{\sqrt{2}}\right)^2} = \sqrt{U_{rms}^2 + U_{hrms}^2}.$$

Од овој пример можеме да извлечеме два важни заклучоци:

1. Интеграл во цела периода од производ на два виши хармоници со различна фреквенција е еднаков на нула (заради взаемната ортогоналност на функциите). Оттука следува, дека ако едната функција е напон а другата струја, ваквиот производ нема да даде средна моќност, односно средната моќност е еднаква на нула. Значи виши хармоници со различен ред (вкрстен ред) не даваат активна моќност!

$$p_{i,j} = \int_0^T U_i \sin i\omega_o t \cdot I_j \sin j\omega_o t = 0, \quad i \neq j$$

2. Сложен сигнал, кој е составен од повеќе виши хармоници, има ефективна вредност која се добива како квадратен корен од сумата на квадратите на поедините ефективни вредности на компонентите:

$$U_{rms} = \sqrt{U_{1rms}^2 + U_{2rms}^2 + \dots + U_{irms}^2}$$

од што следува дека членовите со мал износ многу малку придонесуваат кон вкупната ефективна вредност.

На пример, нека е дададен еден сигнал кој ги има следните хармоници:

ред	1	3	5	7
Износ, %	95	5	3	1,5
Износ, релативни ед.	0,95	0,05	0,03	0,015

Ефективната вредност е:

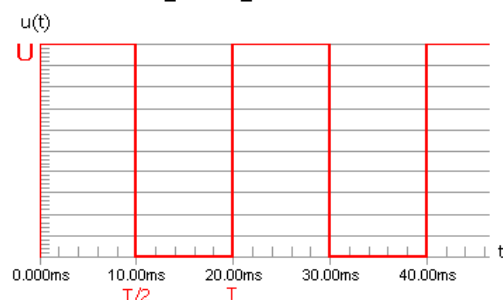
$$U_{rms} \equiv U_{ef} = \sqrt{0,95^2 + 0,005^2 + 0,03^2 + 0,015^2} = 0,952$$

Ако го занемариме на пример третиот хармоник, ќе добиеме:

$$U_{rms} \equiv U_{ef} = \sqrt{0,95^2 + 0,03^2 + 0,015^2} = 0,9506$$

**Задача 2:** Да се одреди ефективната вредност на напон кој е зададен со:

$$u = U \text{ за } t \in \left[0, \frac{T}{2}\right]; \quad u = 0 \text{ за } t \in \left[\frac{T}{2}, T\right]. \quad (\text{нацртај го сигналот!})$$

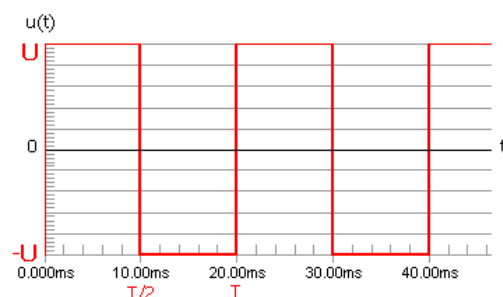


**Решение:**

$$U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \left( \int_0^{T/2} u^2 dt + \int_{T/2}^T u^2 dt \right)} = \sqrt{\frac{1}{T} (U^2 t \Big|_0^{T/2} + 0)} = \sqrt{U^2 \frac{1}{T} \frac{T}{2}} = U \sqrt{\frac{1}{2}} = \frac{U}{\sqrt{2}}$$

**Задача 3:** Да се одреди ефективната вредност на сигнал со обликот: (нацртај го обликот!)

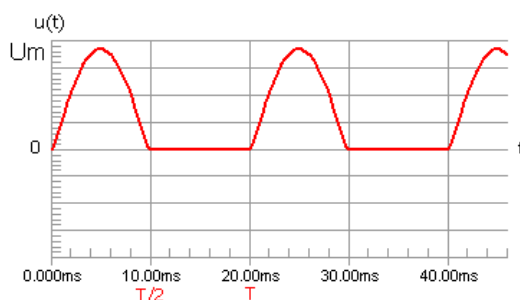
$$u = U, \text{ за } t \in \left[0, \frac{T}{2}\right], \quad u = -U \text{ за } t \in \left[\frac{T}{2}, T\right].$$



**Решение:**

$$U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \left( \int_0^{T/2} U^2 dt + \int_{T/2}^T (-U)^2 dt \right)} = U \sqrt{\frac{1}{T} \left( \frac{T}{2} + \left(T - \frac{T}{2}\right) \right)} = U.$$

**Задача 4:** Да се одреди ефективната вредност на напонот кој е даден со  $u = U_m \sin \omega t$  за  $t \in \left[0, \frac{T}{2}\right]$ ;  $u = 0$  за  $t \in \left[\frac{T}{2}, T\right]$ . (Нацртај ја сликата на сигналот!).



**Решение:**

$$U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{T/2} U_m^2 \sin^2 \omega t dt} = U_m \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{T/2} \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} dt} =$$

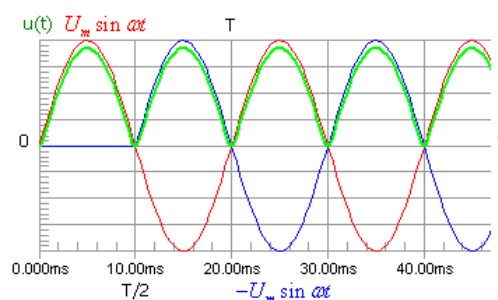
$$U_m \sqrt{\frac{1}{T} \left( \frac{1}{2} t \Big|_0^{T/2} - \frac{1}{4\omega} \sin 2\omega t \Big|_0^{T/2} \right)} = U_m \sqrt{\frac{1}{T} \frac{T}{4}} = U_m \frac{1}{2}$$

**Задача 5:** Да се одреди ефективната вредност на напонот даден со равенката:  $u = U_m \sin \omega t$  за  $t \in \left[0, \frac{T}{2}\right]$ ;  $u = -U_m \sin \omega t$ , за  $t \in \left[\frac{T}{2}, T\right]$

(Нацртај ја функцијата).

Задачата ќе ја решиме користејќи ги досега изведените зависимости и решенија. Имено, ќе ја разделиме дадената функција на две поединечни функции за кои важат зависностите од 0 до  $\frac{T}{2}$  и од  $\frac{T}{2}$  до  $T$ .

$$U_{ef} = \sqrt{U_{1ef}^2 + U_{2ef}^2} = \sqrt{\left(\frac{U_m}{2}\right)^2 + \left(\frac{U_m}{2}\right)^2} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}.$$



### 3.5 Моќност и фактор на моќност

Хармониското изобличување ја комплицира пресметката на моќноста и на факторот на моќност, затоа што многу од поедноставувањата кои инженерите ги користат при пресметките при индустриската фреквенција при синусоудални услови, едноставно не можат да се применат.

Постојат три стандардни големини поврзани со моќноста:

**Привидна моќност,  $S$ .** Производ на ефективната вредност на напонот и ефективната вредност на струјата,  $S = U_{ef} I_{ef}$ ; (забелешка<sup>3</sup>). Оваа дефиниција важи и за синусоидални, и за изобличени услови (но во обата случаи мора да внимаваме  $U_{ef}$  и  $I_{ef}$  правилно да ги пресметаме).

**Активна моќност,  $P$ .** Средна стапка на предавање на енергијата, или средна вредност на моменталната моќност, сфатена како функција од време. Ваквата дефиниција е општа и важи и за синусоидални и за несинусоидални услови; Математички таа се пресметува со:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t)dt \quad (3.00)$$

<sup>3</sup> Во американска литература наместо индексот  $ef$  се користи индексот  $rms$  кое означува исто, ефективна вредност, и доаѓа од “root mean square value”. На пример  $U_{rms}$  наместо  $U_{ef}$ .



Во услови на изобличени напони и струи, во активната моќност имаат дел сите производи на хармониците на  $u$  и  $i$  кои се од исти ред. Производите на компонентите со различен ред – вкрстените производи, не даваат активна моќност, туку реактивна. За ова поегзактно, види потаму).

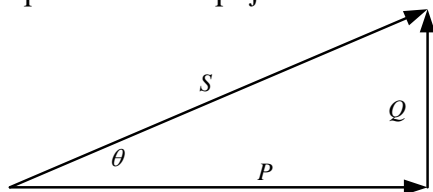
*Реактивна моќност,  $Q$ .* Делот од привидната моќност, кој не е во фаза со активната моќност. (Реактивната моќност не врши корисна работа. Всушност тоа е моќност која постојано осцилира меѓу индуктивитетот и капацитетот и притоа предизвикува активни загуби).

За синусоидални услови на напонот и струјата (неизобличени) но и кај изобличени услови, но само за основната фреквенција, важат следните големина, односно равенки:

$$P = S \cos \theta \quad \dots [ 3. 03 ]$$

$$Q = S \sin \theta \quad \dots [ 3. 04 ]$$

каде  $\theta$  е фазен агол помеѓу напонот и струјата. Исто така постои и правоаголен триаголник на моќностите и зависноста  $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ . Обично овој однос меѓу трите моќности се прикажува во вид на правоаголен триаголник:



Факторот  $\cos \theta$  се нарекува *фактор на моќност*. Бидејќи (3.03) и (3.04) важат само за синусоидални величини (и поконкретно, за првиот одн. основниот хармоник), а активна моќност и фактор на моќност се дефинираат и во несинусоидални услови, за да нема забуна, изразот  $\cos \theta$  попрецизно носи наслов **"фактор на ѝомесџување"**, бидејќи агол  $\theta$  може да се дефинира само во синусоидални услови. (За изобличени услови пресметката на  $P, Q, S$  е според други формули, види потаму)

Постоењето на три моќности е карактеристично за колата на наизменична струја. Всушност, тоа е резултат на постоењето на фазна разлика меѓу напонот и струјата. Ако фазната разлика е голема, при исто  $P$  (корисно употребена моќност) ќе постои поголемо  $Q$  и системот ќе работи нерационално: струјата ќе биде голема, иако корисно употребената моќност ќе биде мала. Затоа, реактивната (или уште наречена "јалова") моќност  $Q$  се настојува да биде што помала, односно фазната разлика меѓу напонот и струјата да биде помала, по можност да нема фазна разлика. Тоа е целта и на испорачателот и на корисникот на ел. енергија. Испорачателот го стимулира потрошувачот да има висок фактор на моќност, близу до 1, преку пенали во сметката за потрошена ел. енергија и преземената реактивна моќност. Оваа проблематика, имено, намалувањето на факторот на моќноста, спаѓа во рационално користење на ел. енергија. Бидејќи енергетскиот систем е претежно индуктивен, за да

се намали фазната разлика и реактивната моќност, и во дистрибуцијата и кај поголемите потрошувачи се инсталираат кондензатори за “компензација” или за “поправка на фактотот на моќност”.

Поопшто и попрактична дефиниција е факторот на моќност да се дефинира поопшто, да важи и за несинусоидални услови. (во понатамошниот текст-PF, од power factor) како:

$$PF = \frac{P}{S} \quad \dots [3.05]$$

каде  $S$  и  $P$  се дефинирани на најопшт начин, така да важат и за случај на изобличени напон и струја. Вака дефиниран фактор на моќност се вика **вистински фактор на моќност** (true power factor). Сега нема јасен концепт за агол на фазна разлика при ситуации со изобличени напон и струја. Сега  $P$  и  $S$  се дефинираат на следниот начин:

$$S = U_{rms} I_{rms} = U_{ef} I_{ef} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{\max}} U_h^2} \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{\max}} I_h^2} \quad \dots [3.06]$$

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t)dt \quad \dots [3.07]$$

Кога напонот,  $U$ , е целосно со основна фреквенција (неизобличен, односно синусоидален), или пак се посматра **само** компонентата со основна фреквенција  $U_1, I_1$ ,  $P$  се добива по познатата формула:

$$P = \frac{\hat{U}_1 \hat{I}_1}{2} \cos \theta_1 = U_1 I_1 \cos \theta_1 = U_1 I_1 \cos \theta_1 \quad \dots [3.08]$$

што покажува дека средната активна моќност е функција само од големините за основната фреквенција. Бидејќи изобличувањето на напонот е многу ниско во енергетските системи (помало од 5%), оваа равенка е добра апроксимација, без оглед на тоа колку е изобличена струјата. Но ако и напонот е многу изобличен, пресметката на  $P$  е многу посложена, види потаму.

Од друга страна, привидната и реактивната моќност се во значаен дел зависни од изобличувањето. Привидната моќност е мерка за потенцијалното напрегање на оптоварувањето, врз термичката способност на системот. Пропорционална е на ефективната вредност на изобличената струја и нејзината пресметка е едноставна, иако е нешто покомплицирана отколку за синусоидален случај. Исто така, многу струјни мерни сонди сега можат директно да ја покажат вистинската ефективна вредност на изобличениот бран на струјата.

Постои одредено несогласување меѓу изучувачите на хармониците, како да дефинира  $Q$ , во присуство на хармониско изобличување. Од друга страна, се смета дека е многу поважно определувањето на  $P$  и на  $S$ .  $P$  покажува колку енергија е консумирана (во единица време), додека  $S$  е показател за капацитетот на системот кој е потребен за да се дистрибуира  $P$ . Само за себе,  $Q$  всушност воопшто не е корисна. Секогаш се трудиме

таа да е помала, бидејќи нејзиното присуство во системот се пенализира од страна на изпорачателот на ел. енергија.

Реактивната моќност, кога постои изобличување, има една друга необичност. Всушност, може и не е прикладен називот реактивна моќност. Концептот за тек на реактивна моќност во енергетскиот систем е длабоко всаден во сфаќањата на повеќето инженери. Она што многумина не го сфаќаат е што овој концепт е валиден само за синусоидална стационарна состојба. Кога постои изобличување, компонентата од  $S$  што останува откако се одземе  $P$  не е конзервативна (т.е. не подлежи на правилото за конзервација или континуитет, кое произлегува од првиот Кирхофов закон), т.е сумата на реактивните моќности не е нула во некој јазол. Имено, за синусоидален случај се претпоставува дека количините на моќност течат низ системот на конзервативен начин, т.е. алгебарската сума во некој јазол е нула.

Ова не значи дека за  $P$  или за струјата, на пример, не важи законот за одржување на енергијата бидејќи тој закон и Кирховите закони за струи се сеуште применливи за секој бранов облик. Реактивните компоненти се всушност квадратен корен од сумата на квадратите. Ова ги натера некои аналитичари да предложат  $Q$  да служи за обележување на оние реактивни компоненти кои се конзервативни, и да се создаде нова големина за тие што не се. Таквата големина се вика **реактивна моќност на дисипорзијата**,  $D$ . Нејзината мерна единица е во волтампери реактивни (исто како за  $Q$ ), но не може точно да се каже дека големинава се однесува како моќност бидејќи не тече низ системот на начин кој е својствен за моќноста.  $D$  ги претставува сите вкрстени ( $j \neq i$ ) производи на напонот и струјата на различни фреквенции кои не даваат средна моќност.<sup>4</sup> Равенките за споменатите големина се следниве:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad \dots [3.09]$$

$$Q = \sum_k U_k I_k \sin \theta_k \quad \dots [3.10]$$

(само производите на хармониците со ист ред).

Според тоа,  $D$  може да се одреди според:

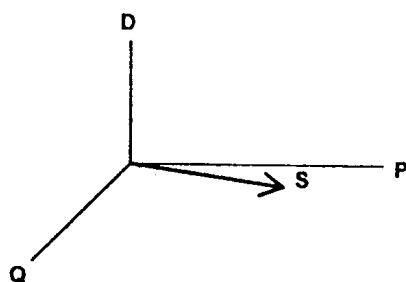
$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad \dots [3.11]$$

На аудиториски вежби, на студентите ќе им се појасни математичката основа на постоењето на овие четири моќности во случај на изобличени напон и струја. Овде накратко со зборови да дообјасниме уште и следното: Ако струјата и напонот се изобличени, за нив аналогно на равенката (3.00) во пресметката на моќностите влегуваат суми на фуриеовите редови за

<sup>4</sup> Ако се интегрираат производите на синусоидални величини кои имаат различни фреквенции (каков што е случајот со вишите хармоници) ќе се добие нула, својство познато од математиката како "ортогоналност" на тригонометриските функции. Интегралот на хармониските компоненти на напонот и струјата со ист ред, даваат активна моќност и реактивна моќност. За таквите производи средната вредност на интегралот не е нула.

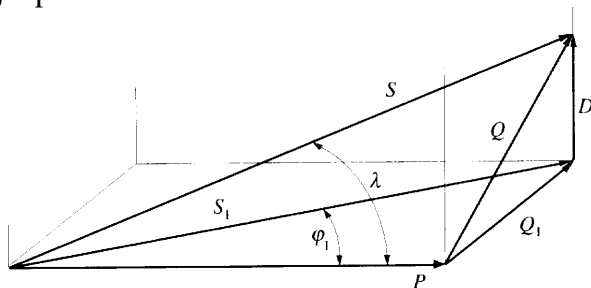
напонот и струјата, т.е.  $i(t) = \sum_1^{h_{\max}} i_h(t)$  и  $u(t) = \sum_1^{h_{\max}} u_h(t)$ , па производите со исто  $h$  (ист ред на хармоникот) ќе дадат и активна и реактивна моќност, а “вкрстените” производи (со различен ред на хармоникот) на напонот и струјата, ќе дадат моќност на дисторзија. Единици на мерење на  $P$  се W (вати), а единици за мерење на  $Q$  и  $D$  се VA<sub>r</sub> (волт - ампери реактивни) а за  $S$  се VA (волт-ампери).

Некои преферираат да користат тродимензионален векторски дијаграм, за објаснување на взаемните врски на компонентите, што е покажано на Слика 3.4.  $P$  и  $Q$  земаат учество во традиционалните синусоидални компоненти во  $S$ , додека  $D$  ги претставува додатните учесници во привидната моќност, кои се последица на хармониците.



Слика 3.4 Врска помеѓу компонентите на привидната моќност

Во Германските норми за односот на овие три моќности се дава ваков дијаграм:



Одовде испаѓа дека  $Q = \sqrt{Q_1^2 + D^2}$ .

Компонентата на реактивната моќност при основната фреквенција- $Q_1$  е корисна како помош на инженерите при димензионирањето на кондензаторите за корекција на факторот на моќност. Кондензаторите можат да го корегираат само  $Q_1$  (индексот 1 покажува дека се работи за првиот хармоник). Терминот **фактор на поместување** служи да се опише факторот на моќност со земање само на компонентите со основна фреквенција. Инструментите за следење на квалитетот на енергијата ја прикажуваат оваа големина исто како и вистинскиот фактор на моќност, што е големината, дефинирана како  $PF$ , во равенката 3.05. Многу уреди, како што се на пример регулираните електромоторни погони со PWM (Pulse Width Modulation = импулсно-широчинска модулација), имаат скоро единичен фактор на поместување, но вистинскиот фактор на моќност

може да биде од 0,5 до 0,6. Кондензаторот на наизменичната страна може да стори многу малку за да го поправи вистинскиот фактор на моќност во овој случај. Всушност, ако тоа резултира во резонанција, дисторзијата може и да се зголеми, што ќе доведе до смалување на факторот на моќност. Вистинскиот фактор на моќност покажува колку голем треба да биде дистрибутивниот систем за да го пренесува дадениот активен товар. Во разгледуваниот пример, користењето само на факторот на поместување ќе даде неточно чувство на сигурност дека се е во ред. Единствена надеж за подобрување е да се намали изобличеноста на струјата или напонот или обете.

Многу мерни уреди (за мерење на потрошената енергија и преземената моќност) би го забележале само  $Q_1$ . За среќа во повеќето случаи струјата во мерната точка на целото претпријатие не е многу изобличена како кај струите на индивидуални товари и грешката е мала (и во корист на потрошувачот). Има исклучоци на ова, како што се пумпните станици каде што PWM е единствениот товар на мерењето. Додека мерењето на енергијата треба да биде доволно точно ако е присутна ниска изобличеност на напонот, сепак при мерењето на преземената реактивна моќност би можело да има суштинска грешка. Затоа, за точно мерење на енергијата и моќноста денес се преминува на дигитално мерење кое ги нема слабостите на класичното - аналого.

Крајниот резултат е што дисторзијата резултира во додатни струјни компоненти кои течат низ системот и кои не даваат енергија во мрежата, освен што се причинители на загуби во елементите на системот низ кои поминуваат. Ова има за последици дека системот треба да биде изграден за поголем капацитет, за да ја пренесува моќноста на потрошувачите.

### **Вежби: Моќност во синусоидални и несинусоидални услови**

Моменталната моќност во едно коло со наизменична струја со моментални вредности на напонот  $u(t)$  и струјата  $i(t)$ , се пресметува од:

$$p(t) = u(t)i(t) \quad (1)$$

Оваа равенка важи и за синусоидални и за несинусоидални напони и струи. Општо земено, моменталната моќност во текот на една периода може да биде и позитивна и негативна (што физички значи дека моќноста односно енергијата тече или од изворот кон потрошувачот или обратно). Многу е важна средната вредност  $P$  на моменталната моќност  $p(t)$  во текот на една периода:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t)dt \quad (2)$$

Ако струјата и напонот се чисто синусоидални, тие се претставени со равенките:

$$u = \sqrt{2}U \cos(\omega t + \varphi_u) \quad (3a)$$

$$i = \sqrt{2}I \cos(\omega t + \varphi_i) \quad (3b)$$

каде  $U$  и  $I$  се соодветните ефективни вредности, а  $\varphi_u$  и  $\varphi_i$  се соодветните почетни фази. Така се добива:

$$\begin{aligned} p(t) &= u(t)i(t) = 2UI [\cos(\omega t + \varphi_u) \cos(\omega t + \varphi_i)] = \\ &= 2UI \frac{1}{2} [\cos(\omega t + \varphi_u + \omega t + \varphi_i) + \cos(\omega t + \varphi_u - \omega t - \varphi_i)] = \\ &= UI \cos(2\omega t + \varphi_u + \varphi_i) + UI \cos(\varphi_u - \varphi_i) = \\ &= UI \cos \varphi + UI \cos(2\omega t + \varphi_u + \varphi_i) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{при што е заменето: } \varphi = \varphi_u - \varphi_i \quad (5)$$

за фазната разлика меѓу напонот и струјата.

Гледаме дека моменталната моќност  $p(t)$  осцилира околу средната вредност  $UI \cos \varphi$  со двојна фреквенција. Оваа средна вредност се нарекува активна моќност  $P$ . Значи:

$$P = UI \cos \varphi. \quad (6)$$

Активната моќност се мери во вати (W).

Производот  $UI$  се нарекува “привидна моќност” и се обележува со  $S$ . Значи:

$$S = UI \quad (7)$$

Привидната моќност се мери во VA.

Во равенката (4) може да се елиминира или аголот  $\varphi_u$  или аголот  $\varphi_i$  со замената:

$$\varphi_u = \varphi + \varphi_i \text{ или } \varphi_i = \varphi_u - \varphi.$$

Така се добива:

$$\begin{aligned} p(t) &= UI \cos \varphi + UI \cos(2\omega t + \varphi_i + \varphi_i + \varphi) = UI \cos \varphi + UI \cos(2\omega t + 2\varphi_i + \varphi) = \\ &= UI \cos \varphi + UI [\cos(2\omega t + 2\varphi_i) \cos \varphi - \sin(2\omega t + 2\varphi_i) \sin \varphi] = \\ &= UI \cos \varphi + UI \cos(2\omega t + 2\varphi_i) \cos \varphi - UI \sin(2\omega t + 2\varphi_i) \sin \varphi. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p(t) &= UI \cos \varphi + UI \cos(2\omega t + \varphi_u - \varphi + \varphi_u) = UI \cos \varphi + UI \cos(2\omega t + 2\varphi_u - \varphi) = \\ &= UI \cos \varphi + UI [\cos(2\omega t + 2\varphi_u) \cos \varphi + \sin(2\omega t + 2\varphi_u) \sin \varphi] = \end{aligned}$$

$$= UI \cos \varphi + UI \cos(2\omega t + 2\varphi_u) \cos \varphi + UI \cos(2\omega t + 2\varphi_u) \sin \varphi.$$

И во двата случаи се добива сличен резултат. Првиот член е активната моќност, односно средната вредност, а вториот член е оној дел од активната моќност кој осцилира со двојна фреквенција, но неговата средна вредност е нула. Третиот дел пак, е исто така осцилаторен дел со двојна фреквенција кој исто така дава средна вредност нула. Тој дел го викаме реактивна моќност. Поточно, реактивна моќност се вика изразот:

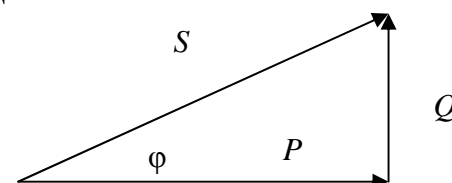
$$Q = UI \sin \varphi$$

Тој се мери во реактивни волт-ампери, VAr.

Реактивната моќност договорно се смета за позитивна, ако аголот  $\varphi$  се наоѓа меѓу  $0^\circ$  и  $180^\circ$ , односно ако струјата заостанува зад напонот.

Понатаму, важат односите:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad \text{односно} \quad S = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$



Одовде доаѓаме до триаголникот на моќностите:

Количникот на активната и привидната моќност се вика фактор на моќност и има природа на агол:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}.$$

## Несинусоидални услови

Ако се посматраат несинусоидални струи и напони кои се опишани како сума од основниот и вишите хармоници (според развитокот во Фуриев ред) одново активната моќност ќе се добие како средна вредност на моменталната моќност во текот на една периода. Ќе се докаже дека активна моќност даваат само производите на напон и струја со иста фреквенција. Значи, и натаму ќе важи:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t)dt.$$

Освен тоа, важи и:

$$u(t) = \sum_{k=1}^n \sqrt{2}U_k \cos(k\omega t + \varphi_{uk})$$

$$i(t) = \sum_{\ell=1}^n \sqrt{2}I_\ell \cos(\ell\omega t + \varphi_{i\ell})$$

каде  $U_k$  и  $I_\ell$  се ефективните вредности на хармониците, а  $k$  и  $\ell$  е нивниот ред.

Сега моменталната моќност е:

$$\begin{aligned}
 p(t) &= u(t)i(t) = \left( \sum_{k=1}^n \sqrt{2}U_k \cos(k\omega t + \varphi_{uk}) \right) \left( \sum_{\ell=1}^n \sqrt{2}I_\ell \cos(\ell\omega t + \varphi_{i\ell}) \right) = \\
 &= 2 \left( \sum_{k=1}^n \left[ U_k \cos(k\omega t + \varphi_{uk}) \sum_{\ell=1}^n I_\ell \cos(\ell\omega t + \varphi_{i\ell}) \right] \right) = \\
 &= 2 \sum_{k=1}^n \sum_{\ell=1}^n U_k I_\ell \cos(k\omega t + \varphi_{uk}) \cos(\ell\omega t + \varphi_{i\ell}) = \\
 &= 2 \sum_{k=1}^n \sum_{\ell=1}^n U_k I_\ell \frac{1}{2} [\cos(k\omega t + \varphi_{uk} + \ell\omega t + \varphi_{i\ell}) + \cos(k\omega t + \varphi_{uk} - \ell\omega t - \varphi_{i\ell})] = \\
 &= \sum_{k=1}^n \sum_{\ell=1}^n U_k I_\ell \{ \cos[(k+\ell)\omega t + \varphi_{uk} + \varphi_{i\ell}] + \cos[(k-\ell)\omega t + (\varphi_{uk} - \varphi_{i\ell})] \} = \\
 &= \sum_{k=1}^n \sum_{\ell=1}^n U_k I_\ell \cos[(k+\ell)\omega t + \varphi_{uk} + \varphi_{i\ell}] + \sum_{k=1}^n \sum_{\ell=1}^n U_k I_\ell \cos[(k-\ell)\omega t + (\varphi_{uk} - \varphi_{i\ell})] = \\
 &= \sum_{k=1}^n \sum_{\ell=1}^n U_k I_\ell \cos[(k+\ell)\omega t + \varphi_{uk} + \varphi_{i\ell}] + \\
 &= \sum_{k=1}^n \sum_{\substack{\ell=1 \\ k \neq \ell}}^n U_k I_\ell \cos[(k-\ell)\omega t + (\varphi_{uk} - \varphi_{i\ell})] + \\
 &+ \sum_{k=\ell=1}^n U_k I_\ell \cos(\varphi_{uk} - \varphi_{i\ell}).
 \end{aligned}$$

Последниот суманд во равенката ја дава активната моќност, при што компонентата за  $k = \ell = 1$  ја дава активната моќност на основниот хармоник. Сумандите за кои важи  $k = \ell > 1$  од последниот член ги даваат активните моќности на вишите хармоници. Првиот суманд ја дава реактивната моќност  $Q$ , а вториот суманд ја дава моќноста на дисторзија (изобличување)  $D$ . Временскиот тек на тие моќности осцилира околу вредноста нула.. Сите овие моќности може да се претстават во комплексна форма како вектори. Меѓу моќностите владеат следните односи:

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2$$

што одговара на сликата.

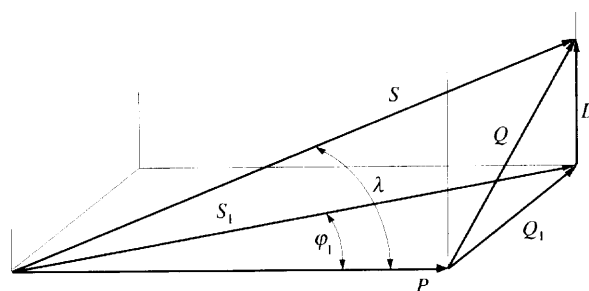
Вистински фактор на моќност е односот (true power factor)  $\frac{P}{S}$

а факторот на моќноста на изместување (displacement power factor) е

$$\cos \varphi = \frac{P}{S_1}$$



каде  $S_1$  е привидната моќност само од првиот хармоник (основниот).



Дијаграм на моќностите за несинусоидални услови

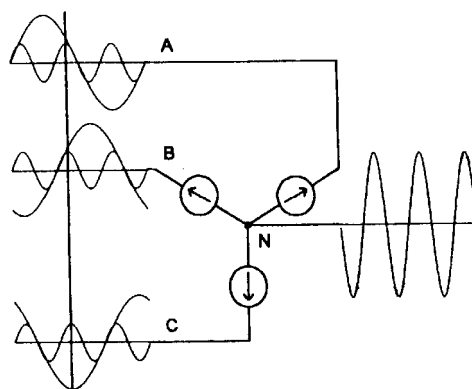
### 3. 6. Тројни хармоници

Тројни хармоници се непарните множители на третиот хармоник ( $h = 3, 9, 15, 21, \dots$ ). Тие заслужуваат посебно внимание бидејќи одговорот (реакцијата) на системот е често значајно различен за тројните хармоници отколку за останатите. Тројните хармоници се важен предмет на разгледување кај системите со заземјена ѕвезда (таков е разводот – инсталациите на низок напон 400/230V), со струја која тече низ неутралниот проводник. Два типични проблеми притоа се преоптоварувањето на неутралниот проводник и телефонските пречки.

За системот на Слика 3.5 кој има перфектно урамнотежени еднофазни оптоварувања, претпоставуваме дека се присутни компонентите на основната фреквенција и на третиот хармоник. Со собирање на струите во точката N, компонентите на основната струја во неутралниот проводник се нула (бидејќи се фазно изместени за 120 степени), но компонентите на третиот хармоник се за разлика од овие, три пати поголеми, бидејќи тие природно се совпаѓаат по фаза и во време (меѓу нив нема фазно поместување).

Оваа состојба може да се докаже и аналитички. Нека се навистина трите нелинеарни оптоварувања во сите три фази потполно урамнотежени (симетрични) односно, што се случува во првата фаза, исто се случува и во втората и во третата, но временски поместено за 120 односно 240 електрични степени:

За струите од првиот хармоник можеме да напишеме:



неутрална струја не содржи основна,  
третиот хармоник е 300% од фазната струја  
на третиот хармоник

Слика 3.5. Високи струи во неутралата кај кола кои ги послужуваат еднофазните нелинеарни товари

$$i_{1A} = I_1 \sin(\omega t + \varphi_1)$$

$$i_{1B} = I_1 \sin\left(\omega t + \varphi_1 - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$i_{1C} = I_1 \sin\left(\omega t + \varphi_1 - \frac{2 \cdot 2\pi}{3}\right)$$

Според тоа, тие претставуваат симетричен систем на три струи со директен редослед (А-В-С). Во векторски и фазорски дијаграм тие би биле претставени со 3 еднакви вектори изместени за агол  $120^\circ$ . Тоа е т.н. " директен систем " .

Струите на третиот хармоник (ако постојат) ќе бидат изразени со следните равенки:

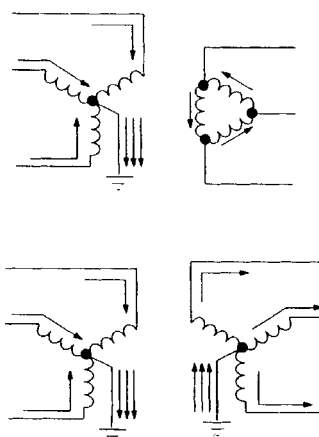
$$i_{3A} = I_3 \sin(3\omega t + \varphi_3)$$

$$i_{3B} = I_3 \sin\left(3\omega t + \varphi_3 - 3 \frac{2\pi}{3}\right) = I_3 \sin(3\omega t + \varphi_3)$$

$$i_{3C} = I_3 \sin\left(3\omega t + \varphi_3 - 3 \frac{2 \cdot 2\pi}{3}\right) = I_3 \sin(3\omega t + \varphi_3)$$

Според тоа, тие претставуваат три истовремени (истофазни) струи кои графички би се претставиле со три истовремени синусоиди со иста амплитуда или три колинеарни вектори со иста големина (во векторски - фазорски дијаграм). Тоа е т.н. " нулти систем " . Може да се докаже на ист начин дека вакви односи постојат и за другите виши тројни хармоници. Сите тие се од "нулти редослед".

Врските на трансформаторот имаат значајно влијание во текот на струите на третиот хармоник од еднофазните нелинеарни оптоварувања. Два случаи се прикажани на Слика 3.6. Во трансформаторот со врска звезда-триаголник, тројните хармоници се покажани како влегуваат во страната на звездата.



3.6. Проток на трето хармонична струја во трифазни трансформатори

Бидејќи се во фаза, се собираат во неутралниот проводник. Врската во триаголник создава еден круг на рамнотежа, така да овие кружат, но остануваат затворени во триаголникот и не се појавуваат во линиските струи на страната на триаголникот. Кога струите се во рамнотежа, струите од тројните хармоници се однесуваат сосема исто како струите на нултата компонента, што тие всушност и се. Овој тип на трансформаторско поврзување е најзастапено во дистрибутивните потстанции, со врска во звезда кон потрошувачите.

Користењето на врска со заземјена звезда на обете страни, им овозможува на тројните хармоници да течат од нисконапонската страна кон високонапонската, непречено. Со тоа, присутни се на обете страни во еднакви износи.

Некои важни заклучоци од досега изведеното се:

1. Трансформаторите, посебно неутралните врски, се склони на прегревање кога послужуваат еднофазни потрошувачи на страната на звездата, кои имаат висока содржина на трети хармоници.
2. Мерењето на линиската струја на трансформаторот на страната на триаголникот нема да покаже тројни хармоници и со тоа нема да даде вистинска мерка за загревањето на трансформаторот.
3. Текот на струите од тројните хармоници може да биде прекинат со соодветно поврзување на трансформаторот.

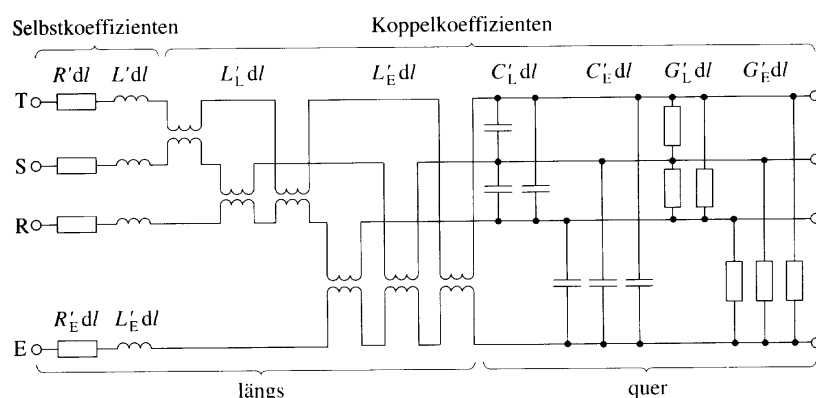
Отстранувањето на врската на неутралата со земја на едната или на двете страни на звездата, го блокира текот на струјата со тројни хармоници. Врската во триаголник го блокира текот во линиските проводници. Може да се забележи дека трансформаторите со три јадрени столба се однесуваат како да имаат “фантомски” делта терциерни намотки. Поврзувањето звезда-звезда, со само една неутрална точка поврзана со земјата, сеуште е во состојба да спроведува тројни хармоници.

Овие правила за тројните хармоници се применуваат само за услови на рамнотежно оптоварување. Кога фазите не се во рамнотежа, струите од тројните хармоници можат да се појават и таму кај што не се очекуваат. Нормална состојба за тројните хармоници е да бидат нулта компонента. Во текот на нерамнотежни состојби, можат да имаат директна и/или инверзна компонента. Ваков е случајот со трифазната лачна печка. Иако се напојува преку трансформаторска врска триаголник-триаголник, третот хармоник се појавува со големи величини во линиската струја, кога печката оперира во неурамнотежен режим.

Но кога системот е претежно урамнотежен тројните хармоници се однесуваат на опишаниот начин.

**Задачи:****Симетрични компоненти**

Односот меѓу напоните и струите на еден трифазен систем за наизменични струи (за стационарна состојба) може да се претстави со една матрична равенка, односно со помош на матрица на импеданси или на адмитанси. Сите елементи на енергетскиот систем како што се водовите, каблите, трансформаторите и машините притоа може да имаат взаемни врски од галванска, индуктивна или пак капацитивна природа. На сликата 1 даден е еден пример на краток отсечок од еден воздушен вод и на него се илустрирани овие взаемни врски.



Сл.1 Инфинитезимално мал дел од еден воздушен вод со хомогено распределени параметри.

Односот меѓу струите и напоните на системот RST гласи:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_R \\ \underline{U}_S \\ \underline{U}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{RR} & \underline{Z}_{RS} & \underline{Z}_{RT} \\ \underline{Z}_{SR} & \underline{Z}_{SS} & \underline{Z}_{ST} \\ \underline{Z}_{TR} & \underline{Z}_{TS} & \underline{Z}_{TT} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_R \\ \underline{I}_S \\ \underline{I}_T \end{bmatrix} \quad \underline{U}_{RST} = \underline{Z}_{RST} \underline{I}_{RST} \quad (1)$$

Овде нема да навлегуваме во начинот на составувањето на матрицата  $\underline{Z}_{RST}$  на еден енергетски систем или една компонента на системот. Тоа е предмет на теоријата на електрични кола. Вредностите на импедансите во импедансната матрица може во општ случај сите да бидат различни. Но бидејќи трифазниот систем е циклично - симетричен, во праксата постојат само сопствените импеданси на секоја фаза и две импеданси на спрега меѓу фазите. Така се добива циклично - симетрична матрица:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_R \\ \underline{U}_S \\ \underline{U}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_A & \underline{Z}_B & \underline{Z}_C \\ \underline{Z}_C & \underline{Z}_A & \underline{Z}_B \\ \underline{Z}_B & \underline{Z}_C & \underline{Z}_A \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_R \\ \underline{I}_S \\ \underline{I}_T \end{bmatrix} \quad (2)$$

Множеството врски меѓу поедини компоненти на трифазниот систем ги усложнува постапките за пресметка особено при пресметката на распространети мрежи. Затоа се изнашла една **математичка**

**трансформација** која трифазниот РСТ систем (физички систем) го претвора во еден друг систем (пресметковен). Таквата трансформација треба да ги има следните својства:

- Трансформираниите напони треба да зависат само од една трансформирана струја;
- При симетричен погон треба само една компонента да биде различна од нула;
- Треба да се зачува линеарниот однос меѓу напонот и струјата, односно, трансформацијата треба да е линеарна.
- При симетричен режим треба да се задржат струјата и напонот на односната компонента.

Се бара матрица на трансформација  $\underline{T}$ , таква да важи  $\underline{U}_{012} = \underline{T}\underline{U}_{RST}$

Бараната трансформација треба притоа да овозможи раздружување на трите системи на таков начин, што трите компоненти да се раздружени на следниот начин:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_0 \\ \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_0 & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}_1 & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_0 \\ \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Овие барања ги исполнува трансформацијата во **симетрични компоненти**, која за напоните и струите преку трансформационата матрица  $\underline{T}$  која според равенката 4 е претставена за напоните. Притоа факторот  $1/3$  е дел од трансформацијата и припаѓа на матрицата  $\underline{T}$ .

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_0 \\ \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_R \\ \underline{U}_S \\ \underline{U}_T \end{bmatrix} \quad \begin{aligned} \underline{U}_0 &= \frac{1}{3}(\underline{U}_R + \underline{U}_S + \underline{U}_T) \\ \underline{U}_1 &= \frac{1}{3}(\underline{U}_R + \underline{a}\underline{U}_S + \underline{a}^2\underline{U}_T) \\ \underline{U}_2 &= \frac{1}{3}(\underline{U}_R + \underline{a}^2\underline{U}_S + \underline{a}\underline{U}_T) \end{aligned} \quad (4)$$

Обратната трансформација од системот 012 во системот RST се врши со матрицата  $\underline{T}^{-1}$  според равенката 5:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_R \\ \underline{U}_S \\ \underline{U}_T \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_0 \\ \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \end{bmatrix} \quad \begin{aligned} \underline{U}_R &= \frac{1}{3}(\underline{U}_0 + \underline{U}_1 + \underline{U}_2) \\ \underline{U}_S &= \frac{1}{3}(\underline{U}_0 + \underline{a}^2\underline{U}_1 + \underline{a}\underline{U}_2) \\ \underline{U}_T &= \frac{1}{3}(\underline{U}_0 + \underline{a}\underline{U}_1 + \underline{a}^2\underline{U}_2) \end{aligned} \quad (5)$$

И за струите важат аналогни трансформации.

За трансформационите матрици  $\underline{T}$  и  $\underline{T}^{-1}$  важи:

$$\underline{T} \cdot \underline{T}^{-1} = \underline{E}, \quad (6)$$

каде  $\underline{E}$  е единична матрица. Операторите  $\underline{a}$  и  $\underline{a}^2$  се комплексни броеви и уште се наречени оператори за “вртење” и тие се:

$$\begin{aligned} \underline{a} &= e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \underline{a}^2 &= e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \\ 1 + \underline{a} + \underline{a}^2 &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

За трансформација на импедансните матрици важат равенките (8) според правилата за множење на матрици и земајќи ги предвид и равенките (4) и (6).

$$\begin{aligned} \underline{TU}_{RST} &= \underline{TZ}_{RST} \underline{T}^{-1} \underline{TI}_{RST} \\ \underline{U}_{012} &= \underline{Z}_{012} \cdot \underline{I}_{012} \end{aligned} \quad (8)$$

и така за претворање на импедансите од трифазниот систем во 012 системот, важи равенката (9):

$$\begin{aligned} \underline{Z}_0 &= \underline{Z}_A + \underline{Z}_B + \underline{Z}_C \\ \underline{Z}_1 &= \underline{Z}_A + \underline{a}^2 \underline{Z}_B + \underline{a} \underline{Z}_C \\ \underline{Z}_2 &= \underline{Z}_A + \underline{a} \underline{Z}_B + \underline{a}^2 \underline{Z}_C \end{aligned} \quad (9)$$

Импедансите на “директниот” (со индекс 1) и “инверзниот” (со индекс 2) систем се општо земено еднакви. Ова важи за сите неротирачки уреди. “Нултата” импеданса (индекс 0) најчесто има поинаква вредност од директната и инверзната. Ако не постои взаемна врска меѓу фазите, каков што е на пример, случајот кога се поврзат три еднофазни трансформатори да работат како трифазен трансформатор, тогаш нултата импеданса е еднаква на директната и инверзната.

Напонскиот вектор на RST системот е линеарно поврзан со напонскиот вектор на системот 012. Аналогно важи и за струите.

Ако постои само еден напон на 012 системот и тоа нултиот, тогаш важи:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_R \\ \underline{U}_S \\ \underline{U}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{U}_0 \\ \underline{U}_0 \\ \underline{U}_0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Меѓу трите напони на системот RST нема фазна разлика. Нултиот систем е според тоа еднофазен систем. Сликата 2 го дава векторскиот дијаграм на напоните од RST системот и напонот на нултиот систем.

<p>Сл. 2. Векторски дијаграм на напоните на RST системот и на нултиот систем при отсуство на директен и инверзен систем.</p>	<p>Сл. 3. Векторски дијаграм на напоните на RST системот и директниот систем во случај кога не постои нулти и инверзен систем.</p>	<p>Сл. 4. Векторски дијаграм на напоните на RST системот и инверзниот систем во случај кога не постои нулти и директен систем.</p>

За случај да постои само еден, директниот систем, ќе важи:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_R \\ \underline{U}_S \\ \underline{U}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \underline{U}_1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{a}^2 \underline{U}_1 \\ \underline{a} \underline{U}_1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Сега се добива еден трифазен систем со позитивен редослед на фазите RST, директен систем, сл.3. На сликата се гледа векторски дијаграм на напоните на RST системот и напонот на директниот систем.

Во случај да постои само еден, инверзен систем, ќе важи:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_R \\ \underline{U}_S \\ \underline{U}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \underline{U}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{U}_2 \\ \underline{a} \underline{U}_2 \\ \underline{a}^2 \underline{U}_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Се добива трифазен систем со спротивен (инверзен) смер на вртење на фазите R,S,T, т.е. инверзен систем. Сликата 4 го дава векторскиот дијаграм на напоните на RST системот и напонот на инверзниот систем.

Трифазните системи за наизменичен напон во општ случај се градат како циклично симетрични и така се погонуваат. Се што се случува во едната фаза, се случува и во другите, само временски поместено за 120 ел. степени. Тоа би требало да важи и за струите кои се изобличени односно се составени од виши хармоници. Да посматраме една струја  $i_R(t)$  која развиена во Фуриев ред се претставува како:

$$i_R(t) = \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} I_h \sin(h\omega t + \varphi_h) \quad (13)$$

се добива, тргнувајќи од општата зависност:

$$i_s(t) = i_R(t - (T/3))$$

(14)

$$i_T(t) = i_R(t + (T/3))$$

струите  $i_s(t)$  и  $i_T(t)$ :

$$\begin{aligned} i_s(t) &= \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} I_h \sin\left(h\omega t - h\frac{2\pi}{3} + \varphi_h\right) \\ i_T(t) &= \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} I_h \sin\left(h\omega t + h\frac{2\pi}{3} + \varphi_h\right) \end{aligned} \quad (15)$$

Притоа кај хармониците се јавува агол на фазна разлика од  $\varphi = \pm h\frac{2\pi}{3}$  меѓу фазите R, S и T. Хармониците исто така градат компоненти кои (при циклична симетрија на трифазните величини) исто така се вртат во директен, инверзен и хомополарен (нулти) смер, зависно од нивниот ред ( $h = 0, 1, 2, 3, \dots$ ), како следува:

$3h+1$  Директен систем

$3h-1$  Инверзен систем

$3h$  Нулти систем.

Во симетрично изградени трифазни мрежи струите на нултиот систем течат во троен износ низ неутралниот проводник и земјата. Ако свездиштето не е заземјено, ќе се јави на соодветната фреквенција една компонента на виш хармоник на напонот на свездиштето спрема земјата.

## Примери:

### 1. Графичко одредување на симетричните компоненти

За трифазниот систем од фазни напони  $\underline{U}_R$ ,  $\underline{U}_S$ ,  $\underline{U}_T$  кој е претставен на сликата 5, да се конструираат соодветните напони на симетрични компоненти (системот 0,1,2). Резултатот и процесот на решавање е даден на сл. 6.

### 2. Пресметковно одредување на симетричните компоненти

Да се пресметаат соодветните симетрични компоненти, ако е даден трифазниот систем струи **RST**:  $\underline{I}_R = 0 \text{ kA}$ ;  $\underline{I}_S = (1 + j5) \text{ kA}$ ;  $\underline{I}_T = (-1 + j5) \text{ kA}$ .

#### Решение:

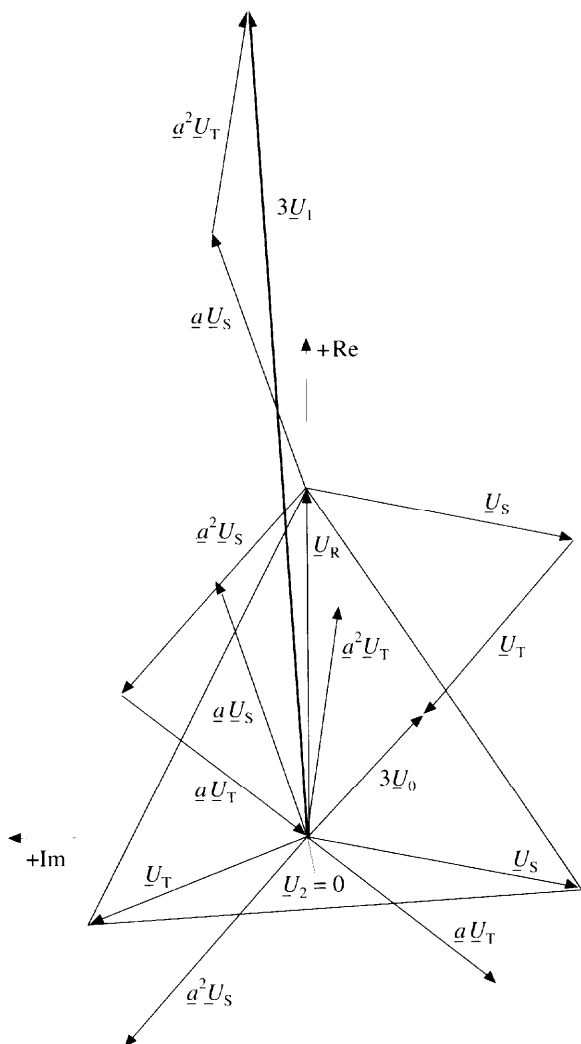
Да ги претвориме податоците во поларна форма:

$$\underline{I}_R = 0 \text{ kA} e^{j0}; \quad \underline{I}_S = 5,01 \text{ kA} e^{j78,69}; \quad \underline{I}_T = 5,01 \text{ kA} e^{j101,31}$$

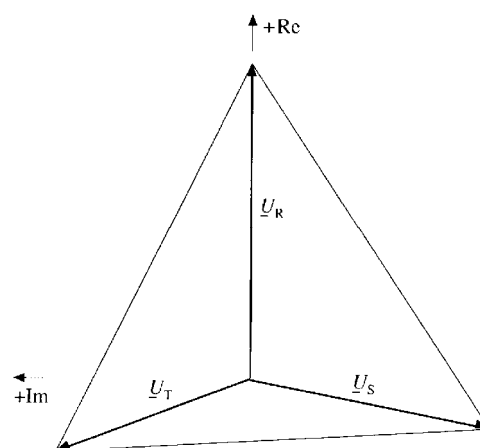
Ако се примени равернката (4) се добива:

$$\underline{I}_0 = \frac{1}{3}(\underline{I}_R + \underline{I}_S + \underline{I}_T) = \frac{1}{3}(0 e^{j0} + 5,01 e^{j78,69} + 5,01 e^{j101,31}) \text{ kA}$$





Сл. 6. Конструкција на системот симетрични компоненти 0,1,2 за системот од сликата 5.



Сл. 5. Несиметричен систем од три фазни напони

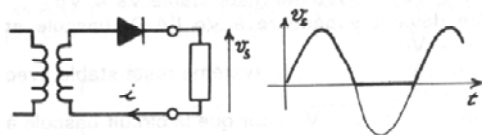
$$\begin{aligned}
 \underline{I}_1 &= \frac{1}{3}(\underline{I}_R + \underline{a}\underline{I}_S + \underline{a}^2\underline{I}_T) = \frac{1}{3}(0e^{j0} + 5,01e^{78,69}e^{j120} + 5,01e^{j101,31}e^{j240})kA \\
 &= \frac{1}{3}(0e^{j0} + 5,01e^{j198,69} + 5,01e^{j341,31})kA \\
 \underline{I}_2 &= \frac{1}{3}(\underline{I}_R + \underline{a}^2\underline{I}_S + \underline{a}\underline{I}_T) = \frac{1}{3}(0e^{j0} + 5,01e^{78,69}e^{j240} + 5,01e^{j101,31}e^{j120})kA \\
 &= \frac{1}{3}(0e^{j0} + 5,01e^{j318,69} + 5,01e^{j221,31})kA
 \end{aligned}$$

После решавањето, се добива:  
 $\underline{I}_0 = j3,275kA$ ;  $\underline{I}_2 = -j1,070kA$ ;  $\underline{I}_3 = -j2,204kA$

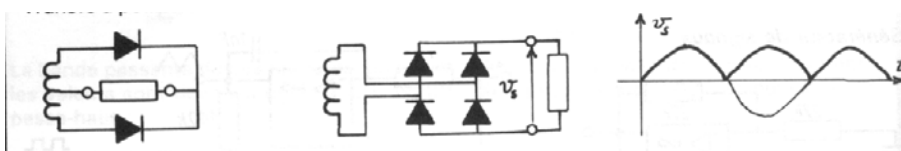
Земајќи ги предвид грешките во пресметките, може да се покаже дека сумата на струите на симетричните компоненти е еднаква на нула. Од ова се заклучува дека овој случај всушност претставува случај на двополна куса врска со допир на земјата.

## ИЗВОРИ НА ВИШИТЕ ХАРМОНИЦИ

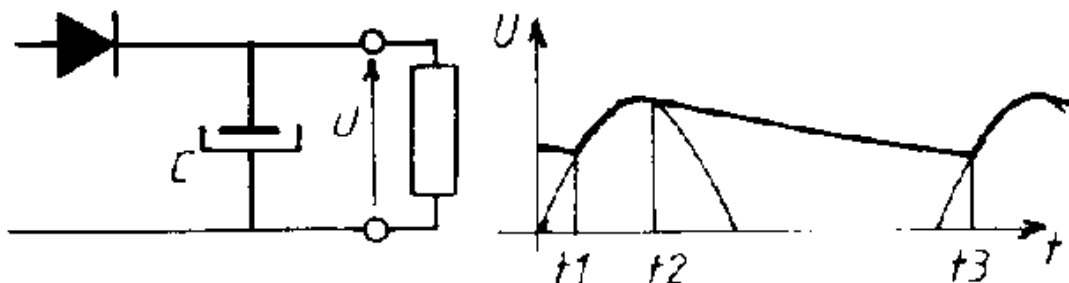
Како што се виде од претходното излагање, вишите хармоници на струјата ги создаваат нелинеарните потрошувачи. Најчесто вакви се потрошувачите во кои има вградено електроника и индустриска електроника. А таквите потрошувачи се повеќе се множат, заради се поголемата автоматизација, полесно управување, зголемена контрола и ефикасност на користењето на енергијата и слично. Не навлегувајќи во детален опис на функционирањето на ваквите уреди кои ги има многу (и кои студентите ќе ги изучуваат во други предмети) овде ќе ги наведеме само поважните и покарактеристични претставници и нивните поважни својства во врска со вишите хармоници. Подолу се примери на шеми од индустриската електроника со краток опис на нивната функција и намена.



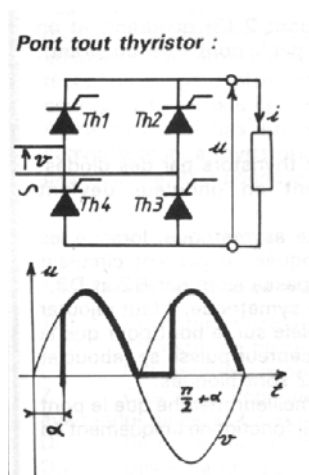
Еднополупериодно исправување. Многу неповолно за енергетскиот систем бидејќи создава еднонасочна компонента, и настанува т.н. “еднонасочно изместување”.



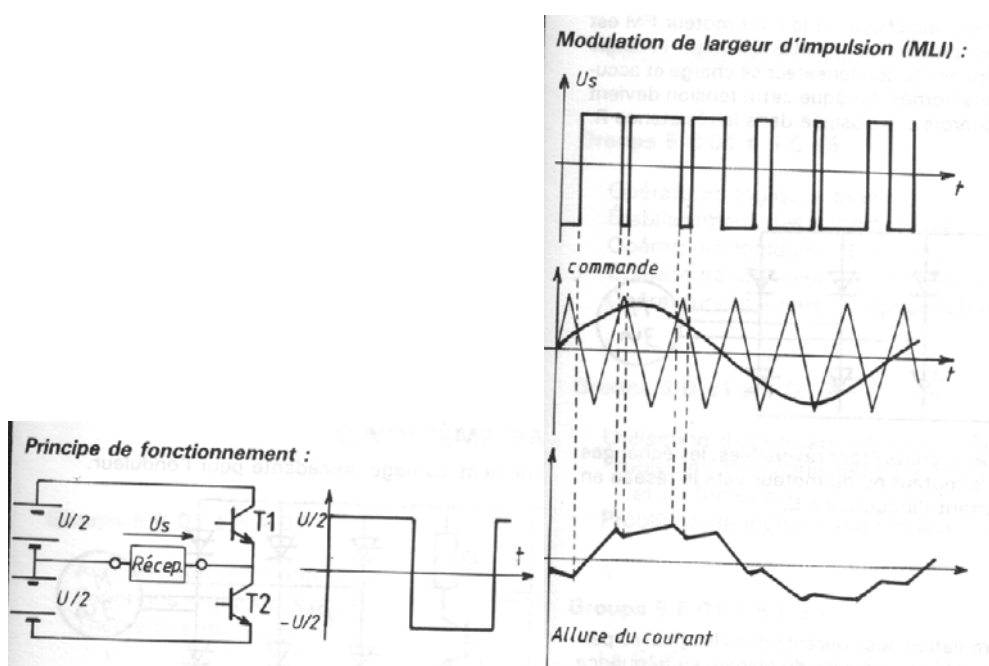
Двополупериодно исправување. Лево, со трансформатор со среден извод и две диоди; десно, со грецова врска



Еднополупериодно исправување, со кондензатор за “пеглање”

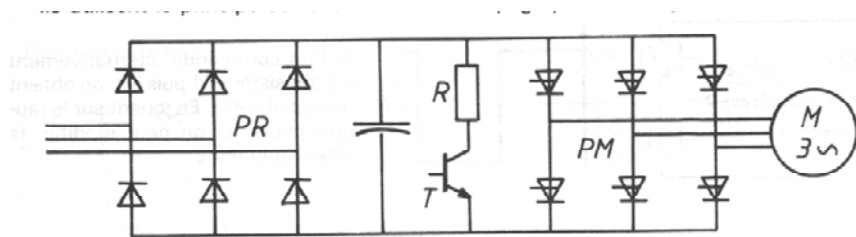


Управуван исправувачки мост со тиристори

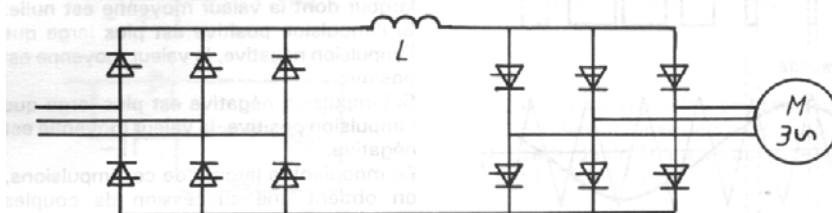


Преобразувач еднонасочна во наизменична. Овој преобразувач е во состојба еднонасочниот напон да го претвори во наизменичен со константна или променлива фреквенција. Добиениот напон и струја не се синусоидални, но со разни режими на работа (управување) може да се приближат до синусоида.

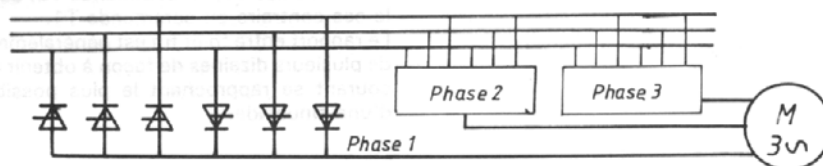
Ширинско импулсна модулација (PWM модулација pulse width mode) Ако транзисторите T1 и T2 проведуваат во исто траење, ќе се добијат два импулси, еден позитивен и еден негативен со исто траење и средната вредност ќе биде нула. Ако позитивниот импулс трае подолго, средната вредност ќе биде позитивна и обратно. Со модулирање на ширината на тие импулси, се добива след од групи на импулси чија средена вредност е синусоида. Ако приемникот е индуктивен, ќе се добие облик на струјата како на сликата. Командата на овој преобразувач се остварува со комбинација на два напони (сигнали): Едниот триаголен (носач) со фреквенција  $f_p$  и другиот синусоидален (модулатор) со фреквенција  $f_m$ . Ако напонот на носачот е поголем одошто на модулаторот, ќе се управува T1, во спротивно се управува T2. Односот на  $f_p$  и  $f_m$  прави да се добијат разни типови на управување.



Претворувач наизменична во наизменична. Со кондензатор во еднонасочната собирница, (напонски тип). Наменет за управување на мотори за наизменична струја - асинхрони. Мрежниот мост е со диоди и произведува еднонасочен напон на средната собирница, а моторскиот мост е со тиристори - управуван. Можно е електрично кочење со враќање на енергијата во мрежата. Колото со T и R служи за заштита од пренапон.



Слично како претходната слика, но со индуктивитет во еднонасочната собирница (струен тип).

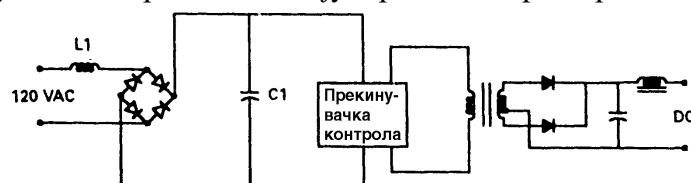


Циклоконвертор. Служи за претворање на енергија со наименичен напон од една фреквенција, во наизменичен напон со друга фреквенција.

### 3.7 Еднофазни напојувања

Електронските преобразувачи (конвертори) на моќност, со нивниот капацитет за производство на хармониски струи, денес се најважната класа на нелинеарни оптоварувања во енергетскиот систем. Електрониката денес е составен дел на енергетските системи. Тука се вклучени регулираните електромоторни погони, електронските енергетски напојувања, еднонасочните погони, полначи на батерии, исправувачи/инвертори, електронските пригушници (за економични флуоресцентни светилки) и многу други.

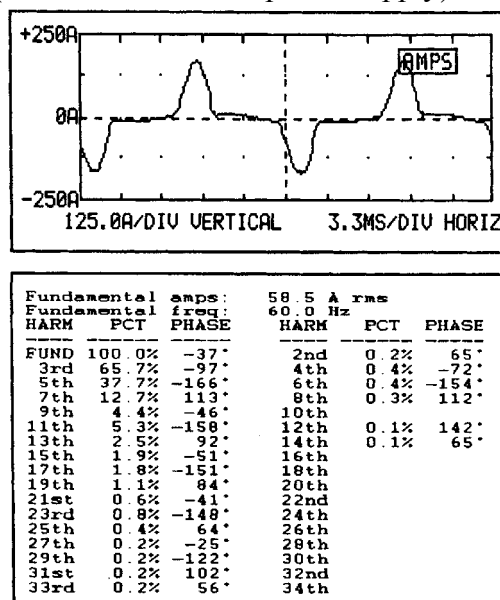
Најголема грижа во комерцијалните објекти е што напојувањата за еднофазната електронска опрема создаваат премногу големо изобличување. Трендот на примена на уреди кои се напојуваат преку вакви уреди е постојано во пораст, а компјутерите, на пример, се секојдневие.



Слика. 3.7. Прекинувачка шема од за енергетско напојување на електронските уреди  
(SMPS Switch mode power supply)

Постарите технологии користат методи за управување на напонот од наизменичната страна, како што се трансформаторите, за редуцирање на напонот, на ниво кое го бара еднонасочниот приклучок. Индуктивитетот на трансформаторот создава добар ефект преку пеглање на брановиот облик на влезната струја, редуцирајќи ја хармониската содржина. Новата технологија, таканаречените switch-mode power supply-SMPS (Слика 3.7), користи dc/dc техники на конверзија, за да се добие гладок напонски еднонасочен излез, со мали и лесни компоненти. Влезниот диоден мост е директно поврзан на наизменичната линија (230 V), со што е елиминиран трансформаторот. Ова резултира во грубо регулиран напон на кондензаторот. Овој еднонасочен напон, понатаму повторно се конвертира во наизменичен со многу висока фреквенција, преку таканаречен switcher, по што повторно се исправува. Компјутерите, печатачите, копир-апаратите и сета друга електронска опрема, сега универзално користат само SMPS напојувања. Главните предности од тоа се малата маса, компактната големина, ефикасното функционирање и немањето потреба од трансформатор. Тие обично толерираат големи варијации во влезниот напон. Бидејќи нема голем индуктивитет од наизменичната страна, влезната струја во напојувањето влегува во многу кратки импулси, така што кондензаторот  $C_1$  повторно го надополнува својот товар при секој полуциклус.

Сликата 3.8. ја илустрира брановата форма на струјата и спектарот за целото коло, кое напојува многу електронски опреми со енергија со прекинувачки мод (SMPS-switch mode power supply).



Слика 3.8. SMPS струја и хармоничен спектар

Особена карактеристика на SMPS напојувањата е големата содржина на третиот хармоник на струјата во вкупната струја. Со оглед на тоа што таквите компоненти се собираат во неутралниот проводник на

трифазниот систем, зголемената употреба на ваквите напојувања внесува загриженост поради можно преоптоварување на неутралните проводници, што посебно важи за постарите згради каде тие се недоволно димензионирани. Опишуваниов случај е доволна причина за загриженост и поради можното прегревање на напојните трансформатори.

SMPS напојувањата наоѓаат примена и кај електронските пригушници, во системите за флуоресцентно осветлување. Високата фреквенција, контролираниот излезен напон, што е можно со транзисторски инвертори, ја зголемуваат ефикасноста на флуоресцентната светилка и дозволуваат посоефицицирана контрола, како што е на пример затемнувањето. Хармонискиот состав на струјата, која се инјектира со многуте електронски пригушници, изгледа многу слична на напојувањата кои се користат кај компјутерите и другата електронска опрема. Зголеменото генерирање на хармоници од флуоресцентното осветление, може да биде многу значајно бидејќи делот на осветлувањето во вкупното оптоварување во една зграда е многу голем, меѓу 40 и 60 проценти.

Во последно време се појавуваат и производители со поусовршена конструкција на SMPS што даваат почист облик на струјата

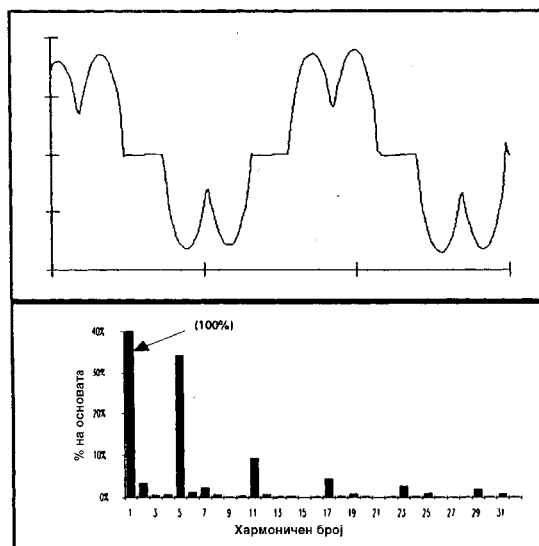
### 3.8 Трифазни конвертори

Трифазните електронски конвертори се разликуваат од еднофазните пред сè по тоа што не генерираат трети хармоници. Ова е голема предност, оти се работи за најголемата компонента. Но, како и да е, тие сепак можат да бидат значајни извори на хармоници, како што се гледа од Слика 3.9. Ова е типичен случај на регулиран електромоторен погон од типот струен извор. Хармонискиот спектар даден на Слика 3.9 е исто така типичен и за влезната струја на еднонасочен мотор. Инверторите<sup>5</sup> за електромоторни погони од типот „напонски извор“ (на пример од типот PWM) можат да имаат многу поголеми нивоа на изобличување односно дисторзија, како што може и да се види од Слика 3.10.

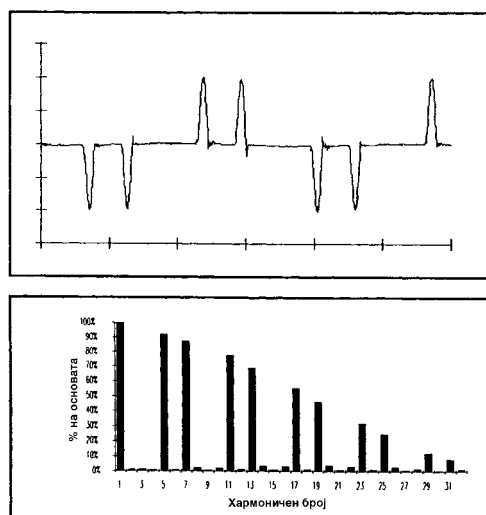
Влезот во PWM погон, генерално е дизајниран како трифазната верзија на SMPS напојувањето кај компјутерите (има трифазен исправувачки мост). Исправувачот се напојува директно од наизменичната собирница и доведува исправен напон кон голем кондензатор на еднонасочната собирница. Со малку намерно додаден индуктивитет, кондензаторот се оптоварува во многу кратки импулси, создавајќи впечатлив, „зајачко уво“ бранов облик на наизменичната струја, со многу големо изобличување. Додека SMPS се со многу мали оптоварувања, PWM погоните се употребуваат за оптеретувања до 500 hp (hp е кратенка од horse power што значи „коњска сила“ и претставува единица за моќност традиционално присутна во англо-саксонско говорно подрачје. 1hp = 0,7457 kW). Ова е оправдана причина за грижа на електроинженерите.

---

<sup>5</sup> Инвертор претвора од еднонасочен напон во наизменичен со регулирана фреквенција



Слика 3.9. Струја и хармоничен спектар за CSI - вид ASD (CSI доаѓа од: “current source inverter или “регулиран погон со струен извор”)



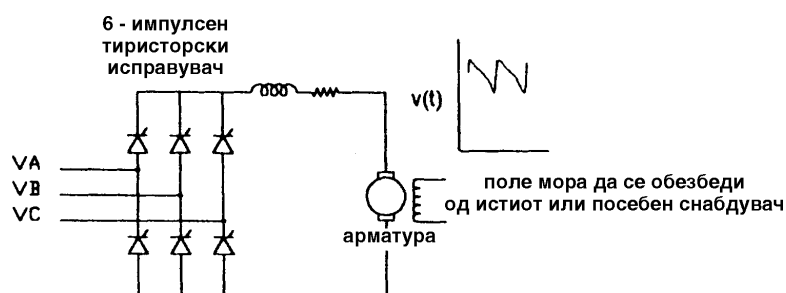
Слика 3.10. Струја и хармоничен спектар за PWM тип ASD. (PWM доаѓа од Pulse Width Modulation или ширинско - импулсна модулација). ASD е adjustable speed drive или електромоторен погон со управувана брзина.

### 3.8.1 Еднонасочни погони

Исправувањето е единствениот чекор кој се бара кај еднонасочните погони. Поради тоа, тие ја имаат предноста поради релативно едноставните управувачки системи. Споредени со наизменичните погони, еднонасочните нудат поширок брзински опсег на регулација и поголем почетен момент. Трошоците за купување и одржување на еднонасочните мотори се големи, додека цената на електронските уреди паѓа секоја година. Според тоа, економските причини ја определуваат и ограничуваат примената на еднонасочните мотори.

Повеќето еднонасочни погони користат шестпулсен исправувач, прикажан на Слика 3.11. Мостот е три фазен 6 пулсен и управуван (со тиристори).

Поголемите можат да користат и 12-пулсен исправувач. Тој ги редуцира некои од поголемите хармоници на наизменичната струја. Двата најголеми хармоници на струите за шестпулсен погон се петтиот и седмиот. Тие се многу проблематични, што се однесува до одговорот на системот (на пониските хармоници е голема веројатноста за настанување на паралелна резонанса, бидејќи резонантната фреквенција на енергетскиот систем се наоѓа обично во ова подрачје). Од 12-пулсниот исправувач во ваква примена, се очекува да елиминира околу 90% од петтиот и седмиот хармоник, во зависност од нерамнотежата на системот. Недостаток на овој исправувач е што цената се зголемува поради додатната електроника и потребата од уште еден трансформатор. Всушност, 12 пулсниот насочувач се состои од два 6 пулсни, кои се напојуваат или од два трансформатори или од еден трансформатор со две секундарни намотки кои обезбедуваат потребен фазен помак за 2 - та 6 пулсните насочувачи).



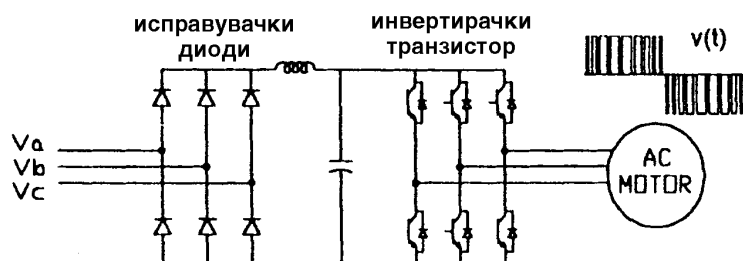
Слика 3.11. Шест - пулсен ASD (adjustable speed drive = регулиран електро моторен погон) со еднонасочна струја

### 3.8.2 Наизменични погони

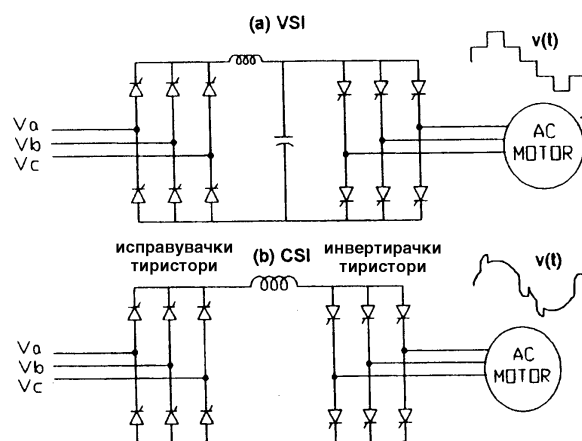
Во наизменичните погони, излезот на исправувачот е инвертиран да создава наизменичен напон со променлива фреквенција за моторот. (Овде се работи за мотор за наизменична струја, обично асинхронен). Инверторите се класифицирани како инвертори со напонски извор (VSI, доаѓа од “Voltage Source Inverter”) или инвертори со струен извор (CSI доаѓа од “Current Source Inverter”). VSI бараат константен еднонасочен напонски влез на инверторскиот степен. Ова е постигнато со кондензатор или LC филтер во еднонасочната собирница (еднонасочна собирница е врска меѓу левиот и десниот трифазен мост, сл. 3.13). CSI пак, бараат константен струен влез. Тука се става сериски калем (индуктивитет) во еднонасочното коло. Наизменичните погони, генерално користат стандардни асинхронни мотори со кафезен ротор. Таквите мотори се едноставни по конструкција и издржливи, со релативно ниска цена и бараат малку одржување. Синхроните мотори се користат таму каде се бара прецизна контрола на брзината.

Конфигурацијата на вообичаен наизменичен погон се состои од VSI, со примена на техники на база на импулсно-широчинска модулација (PWM), за синтетизирање на наизменичен бранов облик во вид на низа од еднонасочни импулси со променлива ширина (Слика 3.12).





Слика 3.12. PWM ASD



Слика 3.13. Голем ASD за наизменична струја

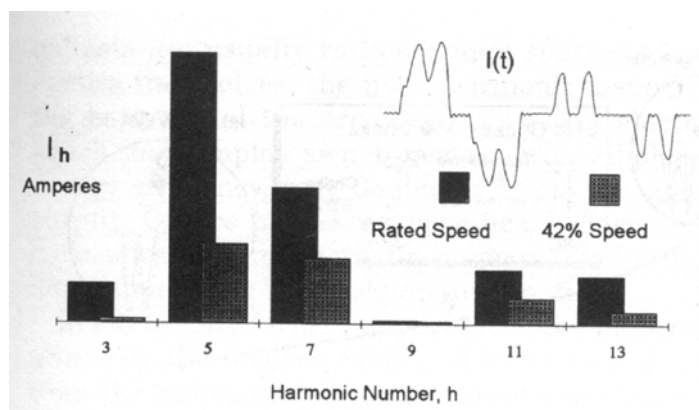
Инверторот користи или gate turnoff (GTO) тиристори или енергетски транзистори за оваа цел. Моментно, VSI PWM погоните нудат најголема ефикасност за широк опсег на брзини за погони со моќност од околу 500 коњски сили. Друга нивна предност е што сега нема потреба да се менува излезниот напон на исправувачот за да се контролира брзината на моторот. Ова дозволува исправувачките тиристори да бидат заменети со диоди и тиристорското управувачко коло да биде елиминирано.

Погоните со многу голема моќност користат SCR (silicium controlled rectifiers) исправувачи и инвертори. Овие можат да бидат шестпулсни (Слика 3.13) или како кај големите еднонасочни погони, 12-пулсни. VSI погоните (Слика 3.13а), се ограничени во примената само за погони кои немаат потреба од нагли промени на брзината. CSI погоните пак, (Слика 3.13б), имаат добри карактеристики за забрзување/успорување, но бараат мотор со капацитивен фактор на моќност (синхрон или асинхрон со кондензатори) или додатно управувачко коло за комутација на инверторските тиристори. Во обата случаи, CSI погонот мора да е конструиран за употреба за специфичен мотор. Тиристорите во инверторите со струен извор мора да бидат заштитени од напонски шилци, што ја зголемува цената на ваквиот тип на погон.

### 3.8.3 Влијание на работните услови

Изобличувањето на напојната струја во регулираните електромоторни погони не е константно. Брановиот облик се менува значително, за различни брзини и вредности на моментот.

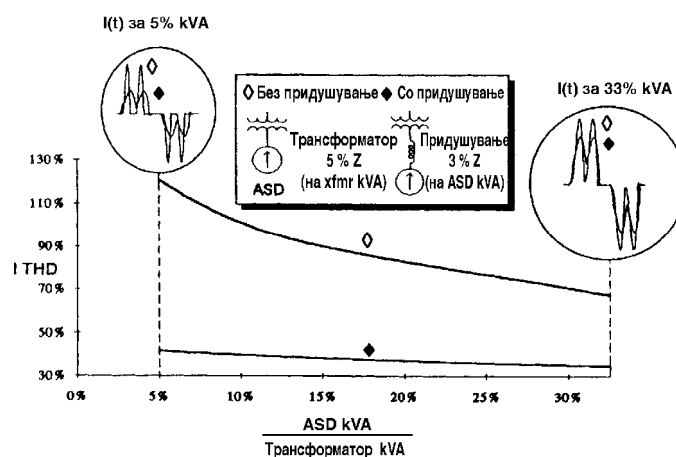
Сликата 3.14. покажува две работни состојби за PWM регулиран електромагнетен погон. Додека брановата форма на 42% брзина пропорционално е многу поизобличена, погонот инјектира значително повисоки хармонични струи при номинална брзина. Ова ќе биде ограничувачки фактор за уредот, а не највисокиот THD. Инженерите би требало да ги имаат во предвид податоците и мерењата на овие погони пред да ги прават одлуките во проектите.



Слика 3.14. Ефект на PWM ASD брзината врз струјните хармоници на наизменичната страна (На сликата, за секој хармоник, првиот столб одговара на номиналната брзина)

### 3.8.4. Ефектите на пригушувачки индуктивитет во наизменичното коло врз хармониците

Вклучување на додатна реактанса помеѓу ASD и напојната мрежа ја редуцира хармоничната содржина во струјата на напојниот довод. Ова е посебно ефективно за PWM погоните. Сликата 3.15. покажува шема на струјно изобличување во зависност од односот на моќноста на погонот во киловолт ампери и моќноста на трансформаторот во киловолт ампери за два различни случаи: со и без три процентна придушница. Импедансата на придушницата е дадена во однос на моќноста на ASD. Прикажани се брановите форми за секоја крајност на подрачјето на ASD. Бранова форма со поголема амплитуда се однесува на случајот без придушување.



Слика 3.15. Ефекти од придушувањето во водот на наизменичната струја за ASD струјните хармоници.

Возможно е многу битно подобрување со додавање на придушувач, намалувајќи ја THD на струјата од 90% до 100% па се до 30% до 40%. Индуктивитетот на придушницата ја намалува брзината со кој кондензаторот на еднонасочната струјна собирница може да биде наполнет и го принудува погонот да повлече струја за подолг период. Крајниот ефектот е струја со пониска величина со помала хармонична содржина додека сеуште ја пренесува истата енергија.

Придушувањата помагаат да се елиминираат пречките во погонот (принудни исклучувања) кои доаѓаат од преодните појави на вклучувањето и исклучувањето на кондензатори.

### 3.9 Лачни уреди

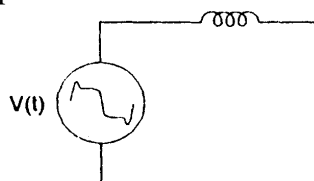
Оваа категорија на уреди ги вклучува лачните печки, апаратите за заварување како и светлосните системи на база на празнење во гасови (флуоресцентни, натриумова пара, живина пара), со магнетни пригушници (не со електронски). Лакот претставува напонски извор во серија со реактанса која ја ограничува струјата на разумна вредност.

Карактеристиките напон-струја на електричните лакови се нелинеарни. После палењето на лакот, напонот опаѓа како што расте лачната струја, ограничена само од импедансата на енергетскиот систем. Ова му дава на лакот т.н. “негативна” отпорност за дел од неговиот работен циклус.

Во флуоресцентните уреди, додатната “пригушна” импеданса е неопходна за да ја ограничи струјата во рамките на можностите на флуоресцентната светилка и да го стабилизира лакот. Според тоа, овој тип на осветление има елемент кој е надворешна импеданса и се нарекува пригушница. Магнетните пригушници и не се некои битни извори на додатни хармоници. Главното хармониско изобличување доаѓа од однесувањето на лакот. Некои електронски пригушници, кои користат SMPS напојување за подобрена ефикасност, можат да го дуплираат или триплираат нормалниот хармониски излез. Некои пак, специјално се дизајнирани да ги минимизираат хармониците.

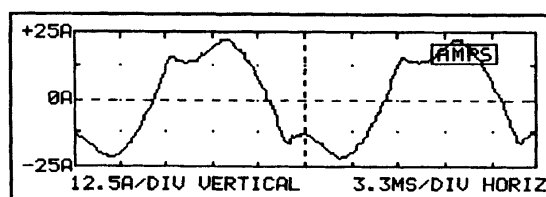
Кај електролачните печки, ограничувачката импеданса е пред се кабелот на печката, заедно со дел од енергетскиот систем и трансформаторот на печката. Нормално за овие уреди е користењето на струи и до 60.000 ампери.

Електричниот лак најдобро се претставува како извор на напонски хармоници. Ако се стави мерна сонда директно паралелно на лакот, може да се набљудува неговиот трапезоиден бранов облик. Величината на истиот е во најголем дел функција од должината на лакот. Импедансите на пригушниците или водовите на печката се однесуваат како бафер, така што напонот на напојување е само умерено изобличен. Лачниот товар, според тоа, излегува дека е релативно стабилен извор на струјни хармоници, што е карактеристика за повеќето анализи.



## Сл.3.16 Еквивалентно коло на електролачен уред

На сликата 3.17 дадена е измерената струја низ флуоресцентна лампа и нејзиниот хармониски спектар. Лампата има магнетна пригушница. Хармониската содржина на овој бранов облик е слична на таа и кај останатите лачни уреди. Трифазните лачни уреди (на пример, електролачни печки за топење железо) можат да се приспособат да ги прекинуват тројните хармоници со користење на соодветна трансформаторската врска. Сепак, не може да се зависи само од ова прекинување, поради честото неурамнотежено работење во текот на фазата на топење на металот.



Harmonic	Percent	Phase (deg)
Fund	100.0	124
2	0.2	136
3	19.9	-144
5	7.4	62
7	3.2	-39
9	2.4	-171
11	1.8	111
13	0.8	17
15	0.4	-93
17	0.1	-164
19	0.2	-99
21	0.1	160

## Сл.3.17. Ефект на флуоресцентно светло на струјата и хармоничен спектар

Во текот на фазата на прочистување(рафинирање) на металот, лакот е постабилен, таквото поништување е подобро. Треба да се има на ум дека вообичаените напојни трансформатори поврзани во врска свезда-свезда нема да го спречат текот на тројните хармоници, без оглед на тоа колку се урамнотежени фазите.<sup>6</sup>

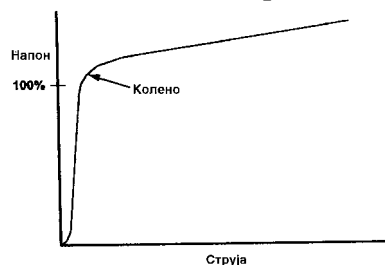
### 3.10 Уреди кои се заситуваат

Опремата која спаѓа во оваа категорија вклучува во својот состав трансформатори и други електромагнетни уреди со челично јадро, вклучително и мотори. Хармониците се генерираат поради нелинеарните карактеристики на магнетизирање на челикот.

Енергетските трансформатори се проектирани да работат нормално точно под коленичната точка на карактеристиката на магнетизирање. Работната густина на флуksот во трансформаторот се одбира преку комплицирана оптимизација на цената на железните делови,

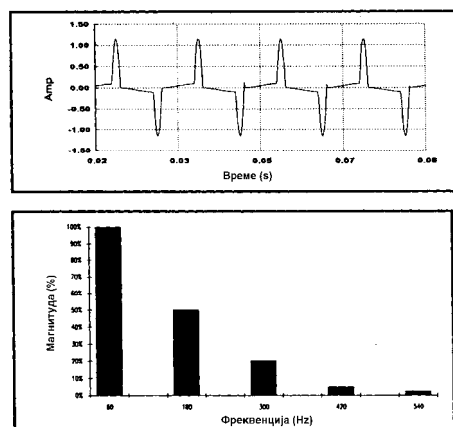
<sup>6</sup> При проектирањето на флуоресцентното осветление во комерцијалните згради, се настојува да се постигне урамнотежен товар на секоја од фазите, со цел да се сведе на најмала можна мерка износот на тројните хармоници кои би течеле кон мрежата

загубите во празен од, шумот и бројни други фактори. Многу електростопански компании како критеријум за набавка од добавувачите на трансформатори бараат минимизирање на загуби и во празен од и под товар, така што последниве се обидуваат да ги направат трансформаторите оптимални со најмали вкупни евалуирани трошоци. Ова резултира во зголемена количина на железо во јадрото и повисока крива на заситување, што дава пониски хармониски струи.



Сл.3.18 Магнетна карактеристика на трансформатор

Иако струјата на возбудата на трансформаторот е богата со хармоници на нормален работен напон (Слика 3.19), таа типично изнесува помалку од еден процент од номиналната струја. Затоа, трансформаторите и не се така предмет на загриженост, како што е случајот со електронските конвертори и лачните уреди, кои создаваат хармониски струи кои достигнуваат големини и до 20% од номиналната, па и повеќе. Сепак, нивниот ефект е забележлив пред се во електродистрибутивниот систем, во кој се присутни стотици трансформатори. Забележлив е значајниот пораст на тројни струјни хармоници во раните утрински часови, кога оптоварувањето е ниско и напонот се подига. Возбудната струја на трансформаторот е повидлива тогаш бидејќи недоволната потрошувачка не е во состојба да ја потисне, така што зголемениот напон предизвикува создавање на поголема возбудна струја. Напонското хармониско изобличување од превозбудувањето на трансформаторот е генерално очигледно само при овие услови на слаб товар.



Сл.3.19 Хармоничен спектар на побудната струја на трансформаторот

Некои трансформатори намерно работат во регионот на заситување. Еден таков пример е тројниот трансформатор кој се користи за генерирање на 180 херци за индукционите печки.

Моторите исто така покажуваат некоја дисторзија во струјата кога се превозбудени, иако генерално, тоа и нема некои последици. Сепак, постојат некои мали еднофазни мотори со моќност во ниво на коњска сила или помала,

кои имаат скоро триаголен бранов облик, со значаен удел на струи со трет хармоник.

Брановиот облик прикажан на Слика 3.19 е за еднофазни или за трифазни трансформатори со заземјено свездиште. Струјата очигледно содржи голема количина на трет хармоник. Врските во триаголник и незаземјено свездиште заштитуваат од тек на хармоници од нулта компонента, какви што и се по природа тројните хармоници. Со тоа, линиската струја ќе биде ослободена од овие хармоници, барем додека некаде не се појави нерамнотежа.