



КАТЕДРА ЗА ЕНЕРГЕТСКЕ ПРЕТВАРАЧЕ И ПОГОНЕ
ЛАБОРАТОРИЈА ЗА ЕНЕРГЕТСКЕ ПРЕТВАРАЧЕ
ЕНЕРГЕТСКИ ПРЕТВАРАЧИ 1

Лабораторијска вежба број 1

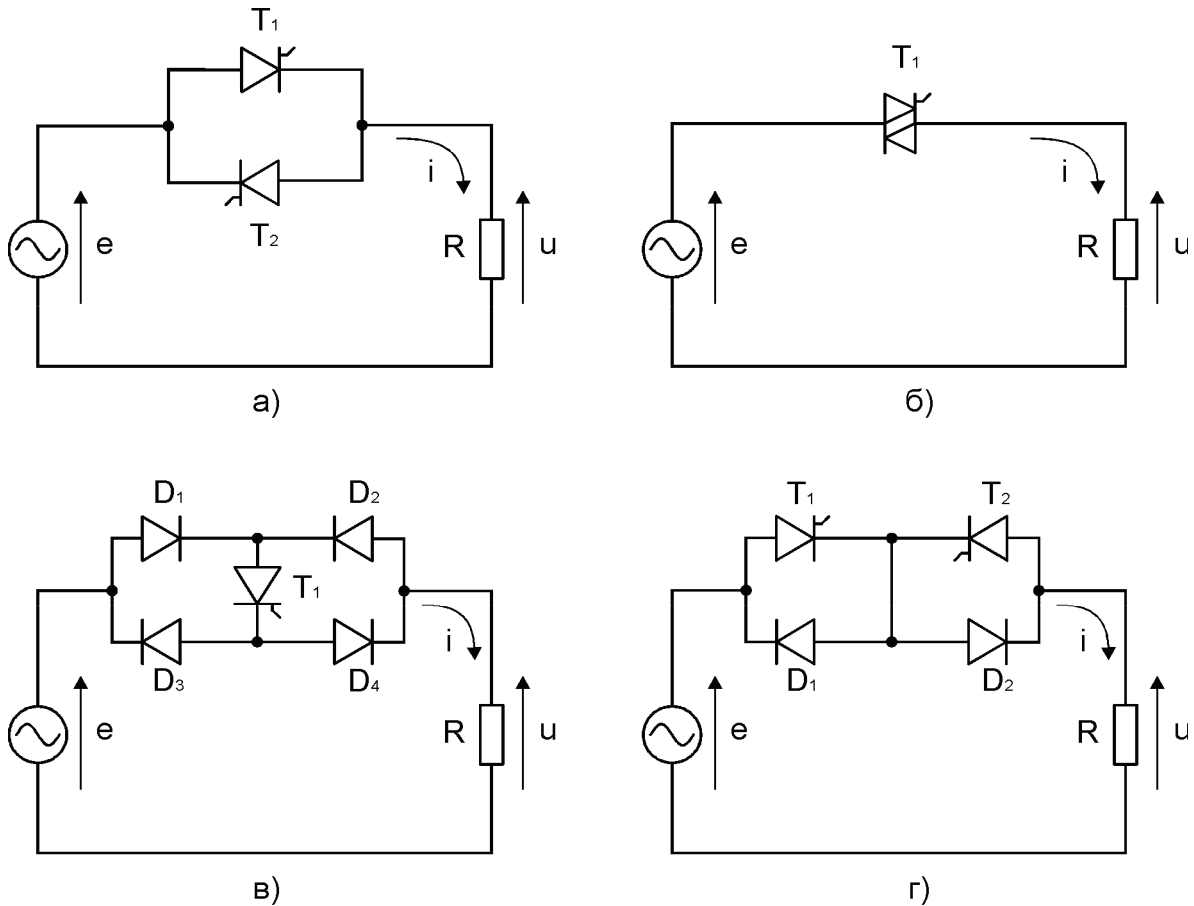
**МОНОФАЗНИ ФАЗНИ РЕГУЛАТОР СА ОТПОРНИМ И ОТПОРНО-
ИНДУКТИВНИМ ОПТЕРЕЋЕЊЕМ**

1. ТЕОРИЈСКИ УВОД

Фазни регулатори су прекидачки регулатори који се користе за подешавање ефективне вредности наизменичног напона на оптерећењу. Подешавање се врши тако што се оптерећење не прикључује директно на извор напајања, већ преко мреже прекидача. Затим се, укључењем и искључењем прекидача, оптерећење прикључује на мрежни напон у погодним временским интервалима. Функцију прекидача најчешће врше тиристорни (у случају мањих снага, користе се и тријаки) тако што се у одабраном тренутку доводи импулс за њихово паљење, док се за гашење тиристора (тријака) користи промена поларитета наизменичног напона напајања. Због тога се фазни регулатори сврставају у категорију мрежом вођених претварача (јер мрежни напон диктира искључење тиристора). Највећи део области примене фазних регулатора представља управљање термичким потрошачима као што су грејачи и инкадесцентно осветљење (светилке са загревним влакном) јер таласни облик напона нема битног утицаја на њихово оптимално функционисање. Осим тога, фазни регулатори се користе и за компензацију реактивне снаге, регулацију броја обртаја асинхронних мотора у вентилаторским и пумпним постројењима итд. Раније су се за ове примене користили аутотрансформатори, трансформатори са више извода или магнетни појачавачи, док се сада углавном користе фазни регулатори. Предност фазних регулатора је већи коефицијент корисног дејства, мањи габарити и посебно могућност једноставнијег и бржег управљања. Њихов главни недостатак је присуство великих хармонијских изобличења струје која се узима из мреже.

1.1. Монофазни фазни регулатори

На слици 1, на следећој страни, приказано је неколико најчешће коришћених конфигурација монофазних фазних регулатора. Основну конфигурацију чини фазни регулатор са антипаралелном везом тиристора приказан на слици 1.а). Ова конфигурација се најчешће користи зато што садржи најмањи број прекидачких елемената, па су и губици најмањи. Мана ове конфигурације је у томе што су катодне тиристора на различитом потенцијалу па је зато неопходна галванска изолација управљачког кола. Зато се, за мање снаге, користи једноставнији фазни регулатор са тријаком приказан на слици 1.б). Ова конфигурација је ограничена на мање снаге зато што се тријаки не могу произвести за тако велике струје као тиристорни. Проблем галванске изолације управљачког кола се може решити употребом само једног тиристора, како је то приказано на слици 1.в). Код ове конфигурације фазног регулатора, струја оптерећења, без обзира на смер, протиче кроз три полупроводничка елемента (две диоде и тиристор), због чега су губици знатно већи. Још један начин решавања проблема галванске изолације управљачког кола приказан је на слици 1.г), где се користе два тиристора са заједничком катодом и две диоде. За разлику од конфигурације приказане на слици 1.в), код овог фазног регулатора струја протиче кроз два полупроводничка елемента па су губици нешто мањи, али је цена регулатора већа због коришћења два тиристора.

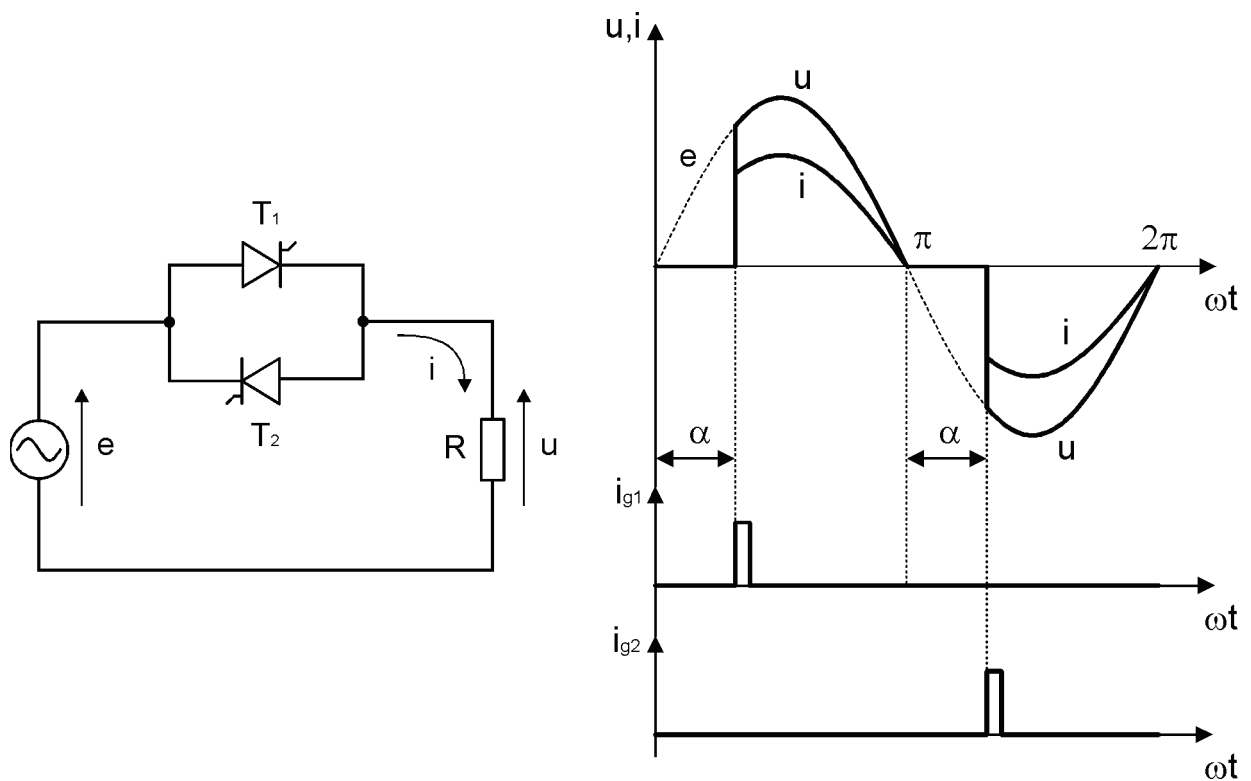


Слика 1: Конфигурације монофазних фазних регулатора: а) конфигурација са антипаралелном везом тиристора, б) конфигурација са тријаком в) конфигурација са једним тиристором, г) конфигурација са серијском везом два тиристора.

1.2. Монофазни фазни регулатор са отпорним оптерећењем

На слици 2 приказан је монофазни фазни регулатор са антипаралелном везом тиристора и отпорним оптерећењем, као и таласни облици мрежног напона, импулса за паљење тиристора за угао паљења α и напона, односно струје оптерећења. Принцип регулације ефективне вредности напона на оптерећењу је да се оптерећење не држи прикључено на мрежни напон у току целе полупериоде, већ само у току једног њеног дела. Колики ће бити тај део полупериоде зависи од угла паљења α . У позитивној полупериоди мрежног напона директно је поларисан тиристор T_1 . Овај тиристор се укључује импулсом I_{g1} у тренутку $\omega t = \alpha$ и проводиће све до краја полупериоде када струја оптерећења опада на нулу а мрежни напон мења смер и тиристор T_1 постаје инверзно поларисан. Тиристор T_1 ће бити инверзно поларисан у току целе наредне полупериоде, што је знатно дуже од времена потребног да се изврши његово гашење. За време док тиристор T_1 проводи, напон на оптерећењу је једнак мрежном напону. Исто се

догађа и у негативној полупериоди мрежног напона, с том разликом што тада проводи тиристор T_2 , јер је он директно поларисан.



Слика 2: Монофазни фазни регулатор са отпорним оптерећењем.

Угао паљења тиристора се може мењати од $\alpha = \pi$ до $\alpha = 0$, што значи да се ефективна вредност напона на оптерећењу може мењати од нуле до ефективне вредности мрежног напона, респективно. За угао паљења, α , ефективна вредност напона на оптерећењу је:

$$U = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} [\sqrt{2}E \sin(\omega t)]^2 d(\omega t)} \quad (1.1)$$

сменом $\omega t = x$ добија се:

$$U = E \cdot \sqrt{\frac{2}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \frac{1 - \cos(2x)}{2} dx} \quad (1.2)$$

$$U = E \cdot \sqrt{\frac{2}{\pi} \left[\frac{\pi - \alpha}{2} - \frac{1}{4} \cdot \sin(2x) \right]_{\alpha}^{\pi}} \quad (1.3)$$

$$U = E \cdot \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{2\pi}} \quad (1.4)$$

где је Е-ефективна вредност мрежног напона, а U-ефективна вредност напона на оптерећењу.

Од посебног значаја за производњу и дистрибуцију електричне енергије је начин на који потрошачи користе ту енергију, односно какав је таласни облик струје коју потрошачи узимају из мреже. Један од показатеља ефикасности коришћења електричне енергије је фактор снаге, λ , дефинисан као однос активне и привидне снаге (производ ефективне вредности мрежног напона и ефективне вредности струје која се узима из мреже). Ако се претпостави да је мрежни напон простопериодична функција времена, вредност фактора снаге зависи од таласног облика струје оптерећења. Када је струја оптерећења такође простопериодична функција времена и када је у фази са напоном, фактор снаге има највећу вредност ($\lambda=1$), док је његова вредност у свим осталим случајевима (фазни померај струје оптерећења у односу на мрежни напон и сложенопериодични таласни облик струје оптерећења) мања.

Са Сlike 2 се види да, за разлику од мрежног напона, напон на оптерећењу, па самим тим и струја оптерећења, нису простопериодичне величине. За даљу анализу најпогодније је ове величине представити у облику Фурије-овог реда. Ако се има у виду да су полупериоде струје оптерећења симетричне, средња вредност и парни хармоници ће бити једнаки нули, па ће израз за струју оптерећења бити:

$$i(t) = \sum_{k=1}^{\infty} [A_k \sin(k\omega t) + B_k \cos(k\omega t)]; \quad k = 1, 3, 5, \dots \quad (1.5)$$

где су амплитуде појединих компонената A_k и B_k дате изразима:

$$A_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i(\omega t) \cdot \sin(k\omega t) d(\omega t), \quad B_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i(\omega t) \cdot \cos(k\omega t) d(\omega t) \quad (1.6)$$

Струја оптерећења је, у току једне периоде, описана изразом:

$$i(t) = \frac{\sqrt{2}E}{R} \sin(\omega t), \quad (\alpha + k\pi) < \omega t < (\pi + k\pi), \quad (k \in Z) \quad (1.7)$$

Сменом (1.7) у (1.6) и решавањем интеграла, добија се:

$$A_k = \frac{\sqrt{2}E}{R\pi} \left\{ \frac{\sin[(k+1)\alpha]}{k+1} - \frac{\sin[(k-1)\alpha]}{k-1} \right\} \quad (1.8)$$

$$B_k = \frac{\sqrt{2}E}{R\pi} \left\{ \frac{\cos[(k+1)\alpha] - 1}{k+1} - \frac{\cos[(k-1)\alpha] - 1}{k-1} \right\} \quad (1.9)$$

Изрази (1.8) и (1.9) се не могу користити за одређивање основног хармоника зато што у оба случаја други члан израза у загради има неодређену вредност.

Компоненте основног хармоника добијају се из (1.6) и имају вредност:

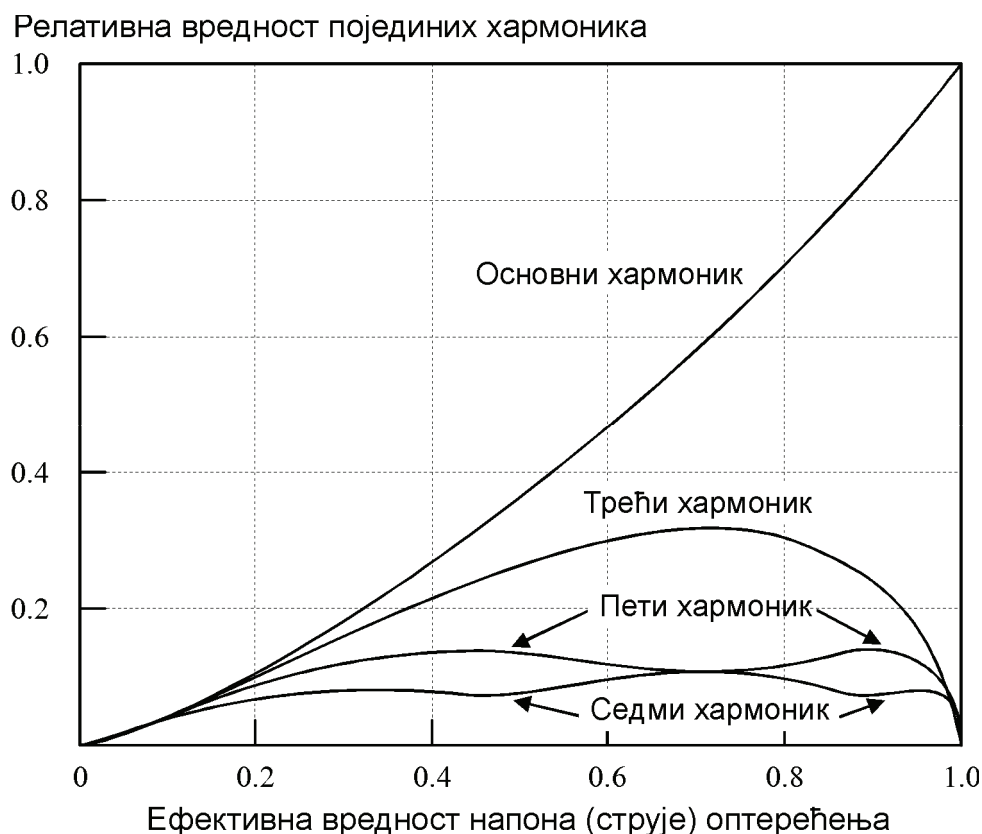
$$A_1 = \frac{\sqrt{2}E}{R} \left[1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{2\pi} \right] \quad (1.10)$$

$$B_1 = \frac{\sqrt{2}E}{R} \left[\frac{\cos(2\alpha) - 1}{2\pi} \right] \quad (1.11)$$

Ефективна вредност и фазни став k-тог хармоника струје су:

$$I_k = \sqrt{\left(\frac{A_k}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{B_k}{\sqrt{2}}\right)^2}; \quad \varphi_k = \text{tg}^{-1}\left(\frac{B_k}{A_k}\right) \quad (1.12)$$

На Слици 3 приказане су нормализоване вредности појединих хармоника у функцији ефективне вредности струје оптерећења:



Слика 3: *Нормализоване вредности хармоника у функцији ефективне вредности напона (струје) оптерећења за монофазни фазни регулатор са отпорним оптерећењем.*

Снага којом се енергија из мреже преноси ка оптерећењу може се одредити на више начина.

По дефиницији ефективних вредности, снага дисипације на отпорном оптерећењу је:

$$P_{\alpha} = \frac{U^2}{R} = R \cdot I^2 = P_0 \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}\right) \quad (1.13)$$

где је P_0 снага дисипације која би се имала када би се оптерећење директно прикључило на мрежу. Осим тога, ако се има у виду да само основни хармоник, односно његова активна компонента, преноси енергију, снага којом се енергија узима из мреже је:

$$P_{\alpha} = E \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 = E \cdot \frac{A_1}{\sqrt{2}} = P_0 \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}\right) \quad (1.14)$$

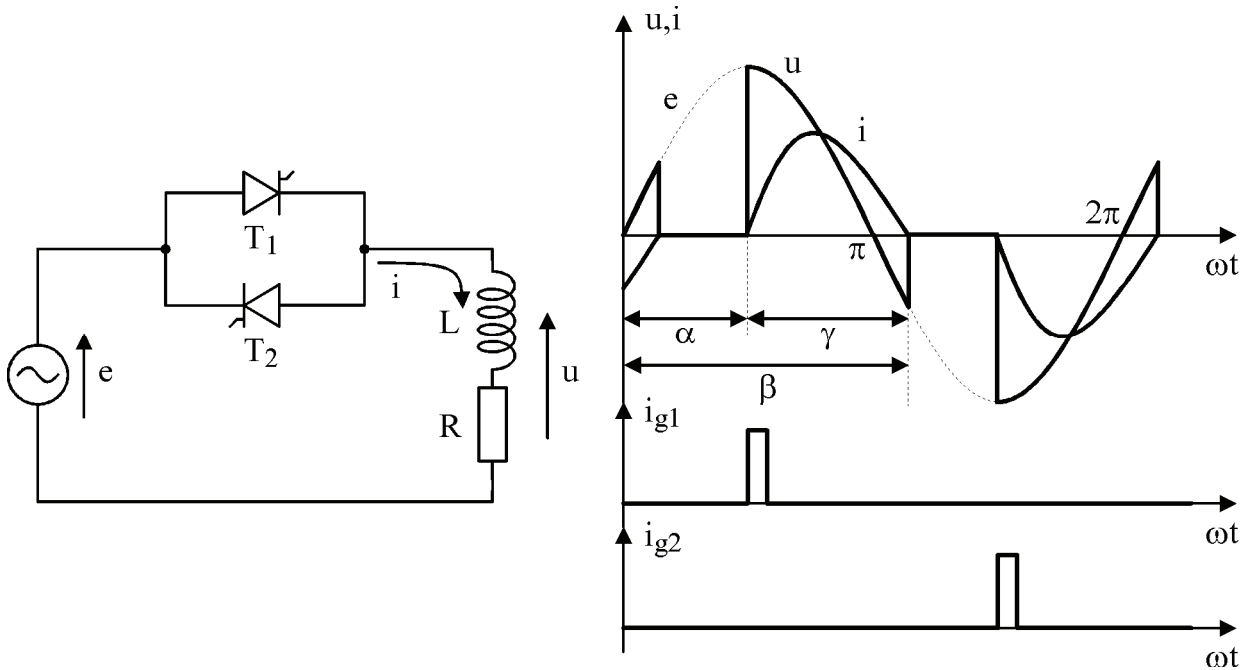
Фактор снаге, дефинисан као однос активне и привидне снаге, је:

$$\lambda = \frac{P}{E \cdot I} = \frac{R \cdot I^2}{E \cdot I} = \frac{R \cdot \frac{E^2}{R^2} \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}\right)}{E \cdot \frac{E}{R} \cdot \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}} = \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}} \quad (1.15)$$

Из претходне анализе се виде и основни недостаци оваквог начина регулације напона на оптерећењу. Струја која се узима из мреже је сложенопериодична величина са релативно високим учешћем хармоника ниских учестаности, а осим тога и основни хармоник струје је фазно померен у односу на мрежни напон. Ове особине су непожељне зато што се енергија преноси само активном компонентом основног хармоника, а то је компонента која је у фази са напоном ($A_1 \sin(\omega t)$), јер виши хармоници у односу на мрежни напон представљају ортогоналне функције, а компонента основног хармоника ($B_1 \cos(\omega t)$) је у односу на мрежни напон померена за угао 90° . Све компоненте струје, осим активне, доводе до непотребног повећања ефективне вредности струје која се узима из мреже. Осим тога, постојање струја виших хармоника доводи до изобличења мрежног напона што може представљати сметњу у раду осталих потрошача прикључених на исту мрежу.

1.3. Монофазни фазни регулатори са отпорно-индуктивним оптерећењем

На Слици 4 приказан је монофазни фазни регулатор са оптерећењем које се може представити редном везом отпорника и пригушнице, као и таласни облици мрежног напона, импулса за паљење тиристора за угао паљења α и напона, односно струје оптерећења.



Слика 4: Монофазни фазни регулатор са отпорно-индуктивним оптерећењем.

Када се у тренутку $\omega t = \alpha$ доведе импулс за паљење тиристор у T_1 , тиристор проведе, а напон на оптерећењу постаје једнак мрежном напону:

$$L \frac{di}{dt} + Ri = \sqrt{2} E \sin(\omega t) \quad (1.16)$$

односно:

$$i' + \frac{R}{L}i = \frac{\sqrt{2}E}{L} \sin(\omega t) \Rightarrow i' + ai = b \sin(\omega t) \quad (1.17)$$

Ова једначина се може решити методом варијације произвољно изабране константе. Ако се има у виду да се одзив отпорно-индуктивног оптерећења на одскачну функцију може описати експоненцијалном функцијом и да је побуда описана простопериодичном функцијом, струја оптерећења се може описати комбинацијом експоненцијалних и простопериодичних функција. Претпоставимо решење у облику:

$$i = C(t) \cdot e^{-at} \Rightarrow i' = C' \cdot e^{-at} - a \cdot C \cdot e^{-at} \quad (1.18)$$

Заменом ових израза у једначину (1.17) и решавањем по функцији $C(t)$, добија се:

$$C' = be^{at} \sin(\omega t) \Rightarrow C = b \int e^{at} \sin(\omega t) dt + K \quad (1.19)$$

односно:

$$C = \frac{be^{at}}{a^2 + \omega^2} [a \sin(\omega t) - \omega \cos(\omega t)] + K \quad (1.20)$$

Заменом овог израза у претпостављено решење за струју (1.18), добија се:

$$i = Ce^{-at} = \frac{b}{a^2 + \omega^2} [a \sin(\omega t) - \omega \cos(\omega t)] + Ke^{-at} \quad (1.21)$$

Заменом константи a и b , израз за струју постаје:

$$i = \frac{\sqrt{2} E}{L \left(\frac{R^2}{L^2} + \omega^2 \right)} \left[\frac{R}{L} \sin(\omega t) - \omega \cos(\omega t) \right] + Ke^{-at} \quad (1.22)$$

Заменом $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$ и сређивањем израза за струју, добија се:

$$i = \frac{\sqrt{2} E}{Z} \left[\frac{R}{Z} \sin(\omega t) - \frac{\omega L}{Z} \cos(\omega t) \right] + Ke^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1.23)$$

где је:

$$\frac{R}{Z} = \cos(\varphi) \quad \frac{\omega L}{Z} = \sin(\varphi) \Rightarrow i = \frac{\sqrt{2} E}{Z} \sin(\omega t - \varphi) + Ke^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1.24)$$

Почетни услов је $i(\alpha)=0$. Из овог услова се одређује константа K :

$$K = -e^{\frac{\alpha}{\omega\tau}} \frac{\sqrt{2} E}{Z} \sin(\alpha - \varphi) \quad (1.25)$$

Заменом у израз за струју добија се:

$$i = \frac{\sqrt{2} E}{Z} \left[\sin(\omega t - \varphi) - e^{\frac{\alpha}{\omega\tau}} e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\alpha - \varphi) \right] \quad (1.26)$$

Тренутак гашења тиристора, односно тренутак проласка струје кроз нулу, добија се решавањем трансцедентне једначине $i(\beta) = 0$. За време провођења тиристора T_1 , тиристор T_2 је инверзно поларисан падом напона на тиристор T_1 . Када тиристор T_1 престане да проводи, у тренутку $\omega t = \beta$ тиристор T_2 постаје директно поларисан мрежним напонам који у том тренутку има вредност $\sqrt{2}E \sin(\beta)$. Овај нагли пораст напона директне поларизације тиристора може довести до његовог паљења па се због тога паралелно са тиристорима мора поставити одговарајућа RC заштита. Угао провођења тиристора, γ , је дефинисан са:

$$\gamma = \beta - \alpha \quad (1.27)$$

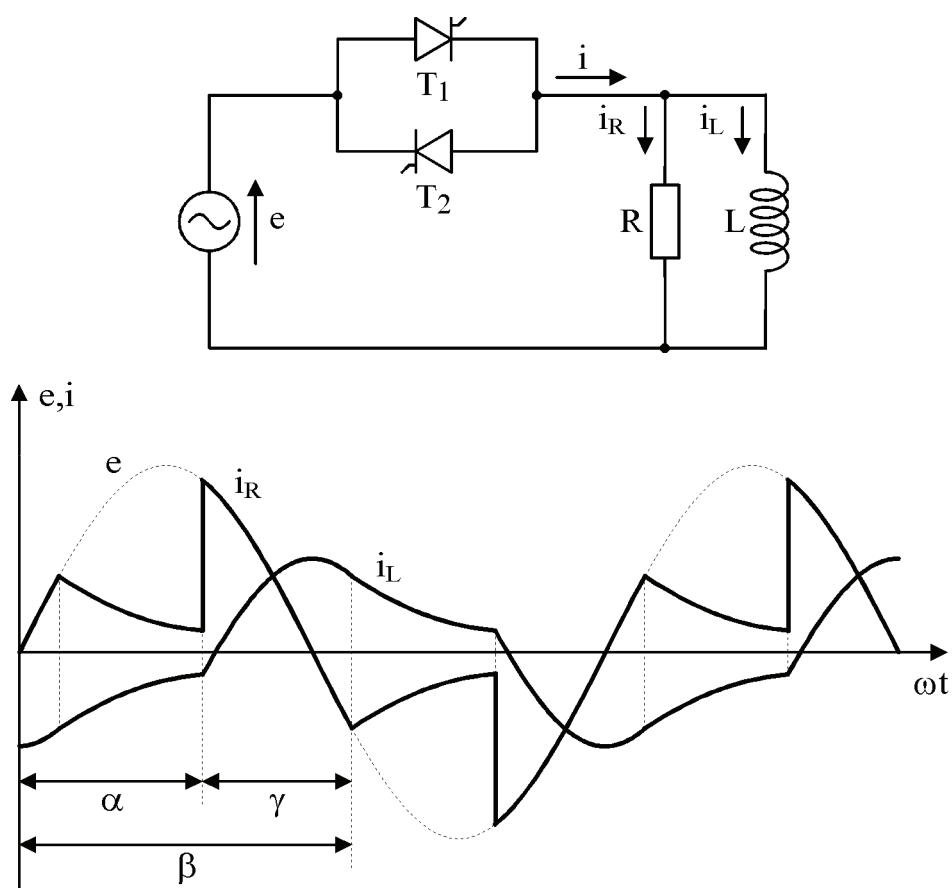
У току провођења тиристора могу се разликовати два периода. У првом периоду, који траје од $\omega t = \alpha$ до $\omega t = \pi$, мрежни напон и струја оптерећења имају исти смер што значи да се енергија узима из мреже и преноси ка оптерећењу. Део те енергије се троши на отпорном делу оптерећења а део се акумулише у пригушници у облику магнетне енергије. Овде треба нагласити да ће се енергија акумулисати у пригушници у интервалу од $\omega t = \alpha$ до тренутка у којем струја оптерећења (пригушнице) постане максимална. Након тога акумулисана енергија се смањује (јер струја кроз пригушницу опада) и дисипира се на отпорнику. У другом периоду, који траје од $\omega t = \pi$ до $\omega t = \beta$, мрежни напон и струја оптерећења имају супротан смер што значи да се сада магнетна енергија из пригушнице делом враћа у мрежу а делом се троши на отпорном делу оптерећења. Када се потроши сва магнетна енергија из пригушнице струја пада на нулу и тиристор престаје да проводи. Дакле, што је мањи угао паљења тиристора то ће се више енергије акумулисати у пригушници па ће бити потребно више времена да се та енергија потроши, односно повећаће се угао β . Када угао β постане једнак $\pi + \alpha$, угао провођења тиристора постаје једнак π , односно више нема прекида у струји оптерећења, што је исто као да је оптерећење директно прикључено на мрежни напон. Угао провођења тиристора постаје једнак π када је угао паљења α једнак углу φ колико би струја фазно каснила за напонам када би се оптерећење директно прикључило на мрежни напон:

$$\varphi = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{\omega L}{R} \right) \quad (1.28)$$

Ако би се даље смањивао угао паљења ($\alpha < \varphi$) и ако би импулси за паљење били краткотрајни, као што је то приказано на Слици 4, то би значило да се импулс за паљење следећем тиристор доводи када је он инверзно поларисан падом напона на претходном тиристор који још увек проводи, због чега се следећи тиристор не може укључити. Да би се спречила ова неправилност у раду фазног регулатора, импулси за паљење тиристора морају трајати нешто дуже од угла φ како би и при $\alpha = 0$ импулс за паљење трајао довољно дуго да се кроз тиристор који треба укључити успостави струја која је довољно велика да, по престанку импулса за паљење, тиристор остане у проводном стању. Како је највећа вредност угла φ једнака 90° (чисто индуктивно оптерећење), довољно би било да импулси за паљење трају нешто дуже од 90° , али је уобичајено да за фазне регулаторе са отпорно-индуктивним оптерећењем импулси за паљење тиристора трају од $\omega t = \alpha$ до $\omega t = \pi$, јер се тиме поједностављује конструкција управљачког кола.

Хармонијска изобличења струје која се узима из мреже су код отпорно-индуктивног оптерећења нешто мања него код чисто отпорног оптерећења, јер пригушница везана на ред са оптерећењем представља нископропусни филтер, односно, њена импеданса расте са учестаношћу хармоника, због чега се смањују струје које потичу од виших хармоника напона на оптерећењу.

Еквивалентна шема неких оптерећења не може се представити редном, већ се представља паралелном везом отпорника и пригушнице (Слика 5).



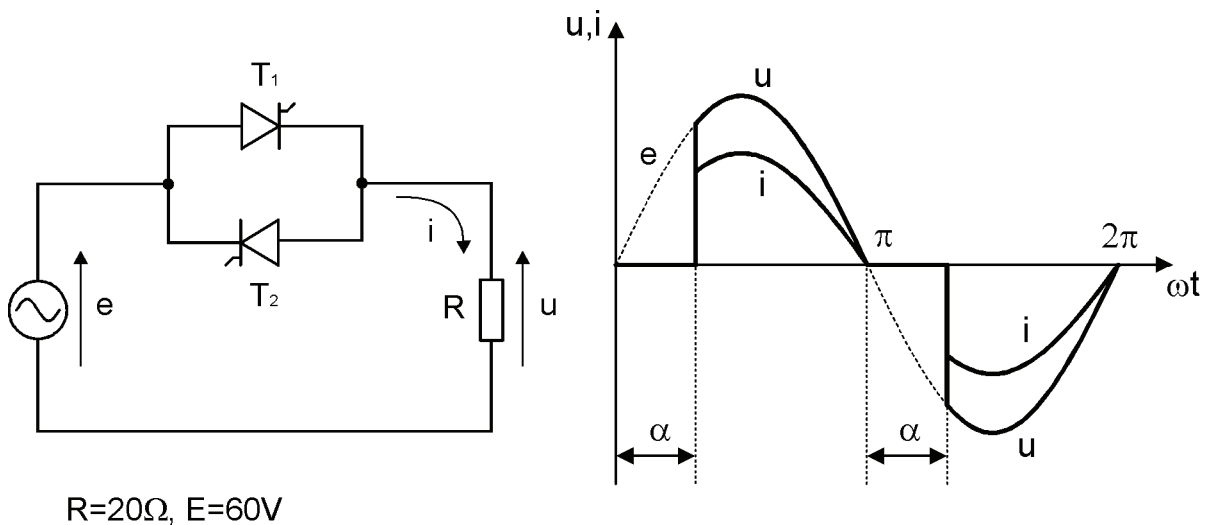
Слика 5: Монофазни фазни регулатор са отпорно-индуктивним оптерећењем које је моделовано паралелном везом отпорника и пригушнице.

У том случају, када се у тренутку $\omega t = \alpha$ доведе импулс за паљење тиристора, тиристор проведе и напон на оптерећењу постаје једнак мрежном напону. Струја тиристора је једнака збиру струја отпорног и индуктивног дела оптерећења. У тренутку $\omega t = \pi$ мрежни напон, односно струја отпорног дела оптерећења, мења смер а струја пригушнице задржава исти смер и почиње да опада. У тренутку $\omega t = \beta$ изједначавају се струја отпорника и пригушнице па струја тиристора постаје једнака нули, због чега он престаје да проводи. Од тог тренутка на даље магнетна енергија затечена у пригушници се троши на отпорнику и струја експоненцијално опада све док се не укључи следећи тиристор. Таласни облици струја отпорног и индуктивног дела оптерећења приказани су на Слици 5.

2. ЗАДАТАК

2.1. Монофазни фазни регулатор са отпорним оптерећењем

За монофазни фазни регулатор са отпорним оптерећењем (Слика 6) потребно је најпре израчунати, а затим и измерити ефективну вредност напона на оптерећењу, као и ефективну вредност струје кроз оптерећење за одређене вредности угла паљења α . На основу ових вредности, треба затим израчунати и активну снагу на оптерећењу. Ове вредности треба унети у табеле 1 и 2.



Слика 6: Монофазни фазни регулатор са отпорним оптерећењем.

Ефективна вредност напона на оптерећењу је:

$$U = E \cdot \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{2\pi}} \quad (2.1)$$

Ефективна вредност струје кроз оптерећење је:

$$I = \frac{E}{R} \cdot \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{2\pi}} \quad (2.2)$$

Активна снага на оптерећењу је:

$$P = \frac{E^2}{R} \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{2\pi}\right) \quad (2.3)$$

Табела 1: Израчунате вредности за напон, струју и активну снагу

α	0°	18°	36°	54°	72°	90°	108°	126°	144°	162°	180°
U											
I											
P											

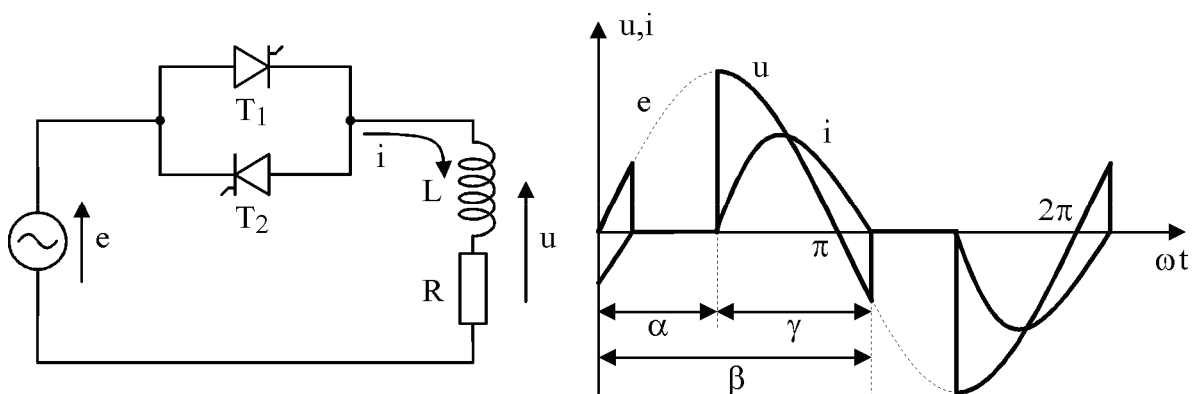
Табела 2: Измерене вредности за напон, струју и активну снагу

α	0°	18°	36°	54°	72°	90°	108°	126°	144°	162°	180°
U											
I											
P											

Потребно је, такође, нацртати (може и помоћу рачунара) зависности измерених вредности напона, струје и активне снаге од угла паљења.

2.2. Монофазни фазни регулатор са отпорно-индуктивним оптерећењем

За монофазни фазни регулатор са отпорно-индуктивним оптерећењем (Слика 7) потребно је најпре одредити фазни став импедансе оптерећења. Потребно је затим измерити ефективну вредност напона на оптерећењу, ефективну вредност струје кроз оптерећење, као и активну снагу на оптерећењу за одређене вредности угла паљења α . Ове вредности треба унети у табелу 3.



Слика 7: Монофазни фазни регулатор са отпорно-индуктивним оптерећењем.

Табела 3: Измерене вредности за напон струју и активну снагу

α	φ	54°	72°	90°	108°	126°	144°	162°	180°
U									
I									
P									

Фазни став импедансе оптерећења је:

$$\varphi = \arccos\left(\frac{P}{U \cdot I}\right) \text{ у тренутку када је } \alpha = \varphi = \text{_____} \quad (2.4)$$

Потребно је, такође, нацртати (може и помоћу рачунара) зависности измерених вредности напона, струје и активне снаге од угла паљења.