

Vienfāzes maiņsprieguma regulators ar IGBT divvirzienu slēdžiem

Vladimirs Cimanis, Riga Technical University, Vladimirs Hramcovs, Riga Technical University,
Ivars Rankis, Riga Technical University

Kopsavilkums. Darbā tiek aplūkots viena no sinusoidālā sprieguma regulēšanas metodēm vidējās jaudas patērētājiem ar aktīvi-induktīvo slodzi. Lai izveidotu maiņsprieguma stabilizatoru ar izejas sprieguma sinusoidālo formu, ir svarīgi lai tās būtu pietiekami ātrdarbīgs un ar noslēgto regulēšanas sistēmu. Ir parādīts, ka šī mērķa realizēšanai var pielietot impulsregulatorus ar paaugstinošo, vai pazeminošo izejas spriegumu. Atšķirībā no līdzīgiem līdzstrāvas regulatoriem, šī gadījumā elektroniskiem slēdžiem regulatorā jābūt ar divvirziena vadītspēju. Šim mērķim, vispiemērotākais būtu pielietot IGBT tipa tranzistorus ar reversās diodi integrētās struktūras sastāvā. Padodot signālu vienlaicīgi uz diviem, virknē slēgtiem ar pretvērsto vadāmību, IGBT tranzistoriem, tad viens no tiem arī vadīs strāvu vajadzīgajā virzienā. Šeit tiek apskatītas pazeminošā un paaugstinošā regulatora uzbūves shēmas uz divvirziena IGBT elektronisko slēdžu bāzes, ka arī datormodelēšanas priekšrezultāti, kur var redzēt LC-filtra ietekmi uz izejas sprieguma formu. Tādus regulatorus var izmantot patērētāju barošanai, apstākļos ar ievērojamām sprieguma izmaiņām, piemēram, elektrotransporta pašpatēriņa tīklā.

Atslēgas vārdi: strāva, slēdzis, tranzistors, divvirziena, slodze, filtrs.

I. IEVADS

Viens no veidiem, kā nepārtraukti regulēt sinusoidālo spriegumu, nemainot tā formu, ir autotransformatora pielietošana. Šeit tiek izskatīta vienfāzes sinusoidāla sprieguma regulēšanas alternatīva metode, kas ir līdzīga līdzsprieguma regulēšanas principiem un ir realizēta, izmantojot impulsregulēšanu ar pusvadītāju slēdžiem.

II. REGULĒŠANAS METODES APRAKSTS

Aplūkosim vienfāzes sinusoidāla sprieguma pazeminošā impulsregulatora būtību, aizstājot pusvadītāju slēdžus ar idealizētu kontaktslēdzi (1.zīm., a). Slēdzis tiek pārslēgts ar samērā augstu frekvenci f un relatīvo ieslēgšanās laiku periodā (aizpildījuma koeficients) [2]

$$\gamma = \frac{t_{ie}}{T}, \quad (1)$$

kur t_{ie} – slēdža S pozīcijas „1” ieslēgtā stāvokļa laiks (1.zīm., b) procesu atkārtošanās periodā $T = 1/f$ un f – frekvence.

Slodzes ķēde tiek šuntēta, pārslēdzot slēdzi S „nulles” stāvoklī (pozīcijā „0”), tas ļauj noslēgties aktīvi inductīvas slodzes strāvai.

Ja slodzes laika konstante ir daudzkārt lielāka par procesu atkārtošanās periodu T , tad slodzes strāva ar 50Hz pamatfrekvenci ir samērā nogludināta un nepārtraukta, t.i.,

impulsregulēšanas pauzē slēdža S „0” pozīcijā nenokrīt līdz nullei.

Vidējā izejas sprieguma vērtība regulēšanas perioda laikā

$$u_{iz(vid)} = \frac{1}{T} \int_0^{t_{ie}} U_m \sin \omega t dt = \gamma U_m \sin \omega t, \quad (2)$$

kur ω ir barošanas sprieguma leņķiskā frekvence.

Atbilstošā efektīva vērtība par tīkla sprieguma periodu:

$$U_{iz} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u_{iz(vid)}^2 d\omega t} = \gamma U, \quad (3)$$

kur $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$.

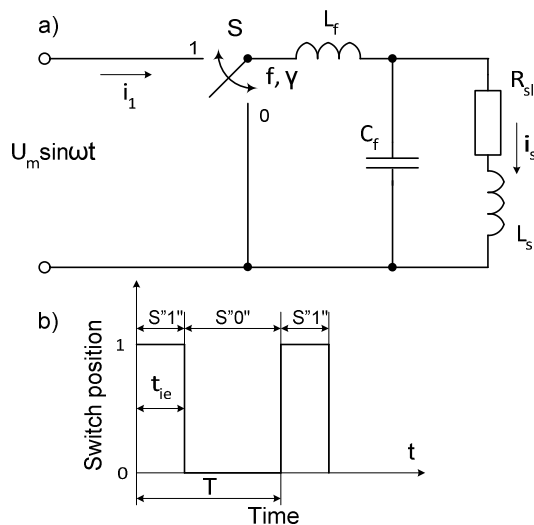
Ja pieņem $\omega L_f \ll \sqrt{R_{sl}^2 + \omega^2 L_{sl}^2}$ un $\frac{1}{\omega C_f} \gg \sqrt{R_{sl}^2 + \omega^2 L_{sl}^2}$,

tad efektīvais spriegums uz slodzes:

$$U_{sl} \cong \gamma U = \frac{\gamma U_m}{\sqrt{2}}. \quad (4)$$

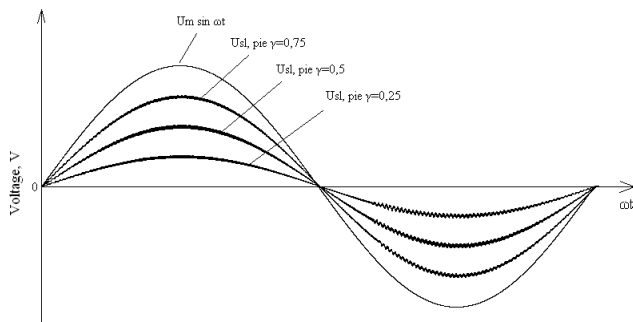
Tātad slodzes strāva:

$$I_{sl} = \frac{\gamma U}{\sqrt{R_{sl}^2 + \omega^2 L_{sl}^2}}. \quad (5)$$



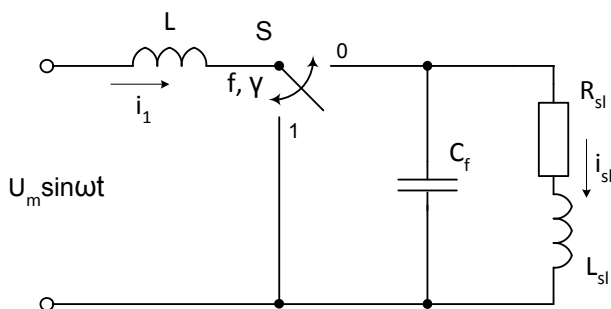
1.zīm. Vienfāzes sinusoidāla sprieguma pazeminošā impulsregulatora aizvietošanas shēma (a), slēdža S darbības diagramma.

Tāpat, kā līdzstrāvas regulatoros[2], iespējami vairāki varianti, kā realizēt γ izmaiņu. Ja slēdža S pārslēgšanās frekvence ir konstanta, tad γ maina, palielinot vai samazinot S slēdža pozīcijas „1” ieslēgtā stāvokļa laiku. Šādu realizāciju sauc par impulsu platuma modulāciju IPM. Tas ir visplašāk pielietotais regulēšanas veids, kas tālāk ir atspoguļots uz 2.zīm. Iknēm pie dažādām aizpildījuma koeficienta vērtībām.



2.zīm. Pazeminošā impulsregulatora spriegumu diagrammas pie dažādām aizpildījuma koeficienta γ vērtībām.

Ja slēdzi pievieno paralēli avotam caur induktivitāti L, izmantojamo kā enerģijas uzkrājēju, iegūst sinusoidāla sprieguma paaugstinošo impulsregulatoru (3.zīm.).



3.zīm. Vienfāzes sinusoidāla sprieguma paaugstinošā impulsregulatora aizvietošanas shēma.

Atbilstoši [2], izmantojot maiņspriegumu efektīvas vērtības un neņemot vērā zudumus impulsregulatorā iegūst:

$$U_{sl} = \frac{U}{1-\gamma} \quad (6)$$

Tāpat, kā pazeminošā regulatorā slodzes sprieguma regulēšana notiek mainot aizpildījuma koeficientu γ , tātad, palielinot vai samazinot S slēdža pozīcijas „1” ieslēgtā stāvokļa laiku, kā piemērs, spriegumu līknes pie dažādiem aizpildījuma koeficientiem ir parādītas 4.zīm..

Tā kā katram avotam ir iekšējā aktīvā un induktīvā pretestības, tad spriegums $U_m \sin \omega t$ sāk samazināties un reāli slodzes spriegums nevar pieaugt līdz bezgalīgai vērtībai. Ja ievieš tukšgaitas sprieguma lielumu U_0 , tad:

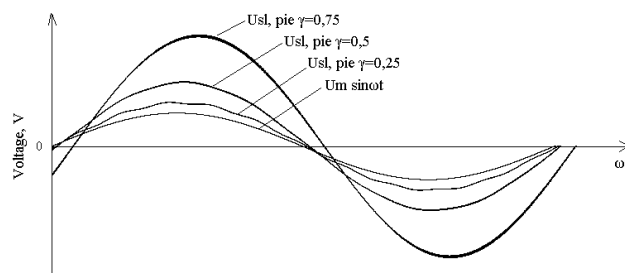
$$\dot{U}_{sl} = \dot{U}_0 - \left(\frac{\dot{I}_{sl} Z_1}{1-\gamma} \right), \quad (7)$$

kur Z_1 ir avota iekšējā kompleksā pretestība.

Apzīmējot $k = \frac{\dot{I}_{sl} Z_1}{\dot{U}_0}$, iegūst:

$$\frac{\dot{U}_{sl}}{\dot{U}_0} = \frac{1-\gamma-k}{(1-\gamma)^2}, \quad (8)$$

pēc kā ir novērtējams maksimāli sasniedzams izejas spriegums.



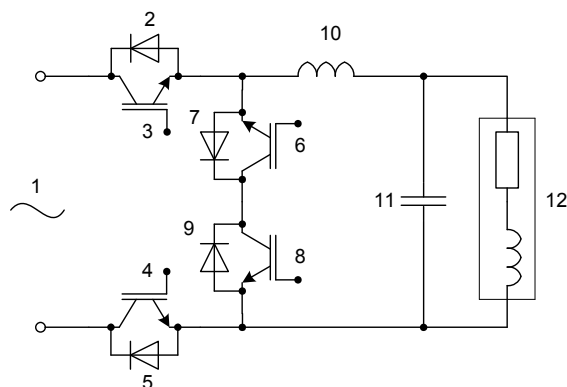
4.zīm. Paaugstinošā impulsregulatora spriegumu diagrammas pie dažādām aizpildījuma koeficienta γ vērtībām.

Vispārīgā gadījumā sinusoidālie lielumi dotajā 4.zīm. ir nobīdīti fāzē savā starpā, kā tas ir atspoguļots augšminētās izteiksmēs (7,8) ar kompleksu skaitļiem.

III. AC IMPULSREGULATORA PRAKTISKĀ REALIZĒŠANA

Tālāk tiek izskatīta vienfāzes sinusoidāla sprieguma impulsregulēšanas praktiskā realizēšana, kuras pamatīpašība ir IGBT tranzistoru ar paralēlām pretvirziena diodēm izmantošana.

Impulsregulēšana tiek sasniegta tādējādi, ka shēmā, kurā maiņsprieguma avota strāvas ķēdē ieslēgti divvirziena vadāmības shēmā saslēgti tranzistori ar paralēlām pretvirziena diodēm, slodzes ķēdi šuntē divvirziena vadāmības shēmā savienoti tranzistori ar pretvirziena paralēlām diodēm. Par cik IGBT tranzistoru vadības jauda ir ļoti maza, nav jēgas veikt vadības impulsu komutāciju starp pretvirzienā slēgtiem tranzistora slēdžiem, padodot vadības signālus uzreiz abiem tranzistoriem regulatora zarā.



5.zīm. Vienfāzes sprieguma pazeminošā regulatora principiāla shēma.

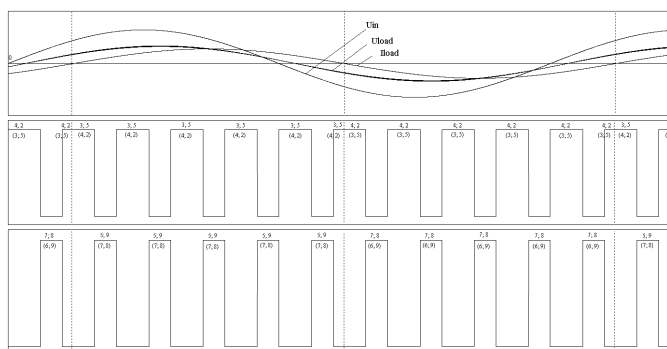
Sprieguma pazeminoša regulatora būtību raksturo shēma 5.zīm. Vienfāzes maiņsprieguma avota 1 ķēdē virknē un pretējā vadāmības virzienā ieslēgti tranzistori 3, 4, kas šuntēti ar reversās vadāmības diodēm, attiecīgi 2 un 5. Tranzistoru, avota un slodzes 12 ķēdē virknē ieslēgta drosele 10, bet slodzei paralēli - kondensators 11, kas kopā ar drosele veido izejas sprieguma filtru. Paralēli filtra droseles un kondensatora ķēdei ieslēgti divi virknē un pretējā vadāmības virzienā savienoti tranzistori 6 un 8 ar reversā vadāmības virziena diodēm attiecīgi 7 un 9.

Regulators (5.zīm.) darbojas šādi. Ja avota sprieguma vērtība ir lielāka par slodzes nominālo, tad vadības signālu ģenerācijas mezgls ģenerē periodiski augstas frekvences vadības signālus pārmaiņus uz maiņsprieguma avota ķēdē virknē slēgtajiem tranzistoriem 3, 4 un slodzes-droseles ķēdei paralēli slēgtajiem tranzistoriem 8, 6. Kad vadības signāli tiek padoti uz tranzistoriem 3, 4, tad neatkarīgi no maiņsprieguma avota sprieguma polaritātes filtra ķēde (attiecīgi arī slodze) tiek pieslēgta barošanas avotam, izraisot šīs ķēdes strāvas momentāno vērtību pieaugumu. Ja šai gadījumā strāvu pie atbilstošas avota sprieguma polaritātes vada tranzistors 3, tad vienlaikus vada arī diode 5; ja otrajā pusperiodā strāvu vada tranzistors 4, tad vada arī diode 2.

Kad vadības signāls no tranzistoriem 3, 4 tiek atslēgts, vienlaikus vadības signāli tiek pievadīti tranzistoriem 6, 8, nodrošinot ceļu filtra droseles elektromagnētiskās enerģijas izlādei neatkarīgi no strāvas virziena drosele 10. Ja strāva drosele 10 plūst virzienā uz kondensatoru, tad šuntējošajā ķēdē strāvu vada tranzistors 6 un diode 9; ja droseles strāva ir pretējā virzienā, tad strāvu vada tranzistors 8 un diode 7.

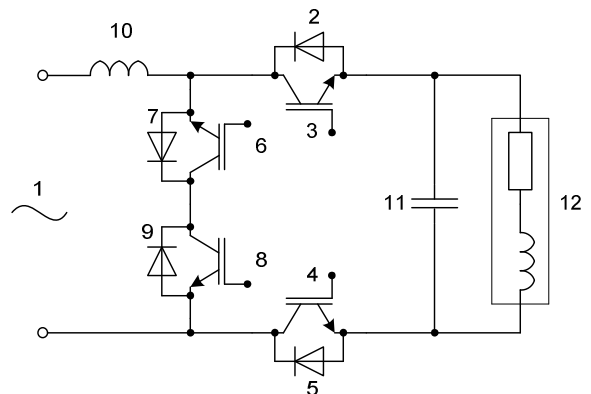
Zīm.6 ir parādīta pazeminoša regulatora slēdžu darbības nosacītā diagramma, kur var redzēt slēdžu pārslēgšanas brīžus, kad strāva slodzē maina savu virzienu, tā kā jau tika minēts iepriekš, vadība tiek padota uz abiem tranzistoriem regulatora zarā vienlaicīgi, kas dod iespēju nesekot strāvas virziena maiņai. Uz diagrammas (6.zīm.) ir apzīmēti slēdži, kas ir aktīvi, kad caur tiem plūst strāva, iekavās ir parādīti neaktīvi slēdži, strāva neplūst, bet uz tiem arī tiek padots signāls.

Ja spriegums uz slodzes ir nepietiekami liels, tad ilgāks vadības signāls periodā ir uz tranzistoriem 3, 4, bet uz 6, 8 – īsāks. Ja spriegums uz slodzes ir par lielu, tad tranzistoru 3, 4 ieslēgšanas signāla ilgums samazinās, bet tranzistoru 6, 8 – palielinās. Tā tiek veikta slodzes sprieguma impulsveida regulēšana uzdotajā līmenī.



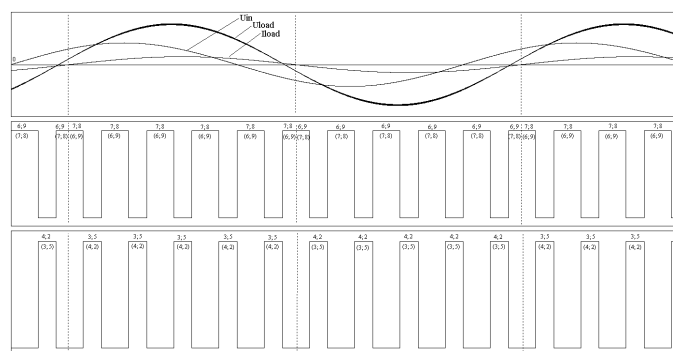
6.zīm. Pazeminoša regulatora slēdžu darbības nosacītā diagramma pie aizpildījuma koeficienta $\gamma=0,6$ (reāli, slēdžu darbības frekvence ir daudz lielāka).

Ja tranzistori tiek pārslēgti ar daudzkārt augstāku frekvenci par barojošā avota sprieguma frekvenci, tad pateicoties filtra darbībai, tā kondensatora 11 spriegums ir praktiski sinusoidāls.



7.zīm. Vienfāzes sprieguma paaugstinošā regulatora principiāla shēma.

Ja barošanas avota sprieguma vērtība ir mazāka par slodzes nominālo sprieguma vērtību, modulācijas vadības signāli tiek pārmaiņus padoti uz tranzistoru pāriem 6, 8 un 3, 4 (7.zīm.). Neatkarīgi no avota sprieguma polaritātes caur tranzistoru 8, diodi 7 vai tranzistoru 6, diodi 9 drosele 10 tiek pieslēgta paralēli barošanas avota spaiļēm un tajā uzkrājas elektromagnētiskā enerģija. Kad deaktivē vadības signālu padevi uz iepriekšminēto tranzistoru pāri (8, 6), aktivē vadības signālu padevi uz tranzistoriem 3, 4 un neatkarīgi no strāvas virziena drosele 10 tai virknē tiek pieslēgts slodzes mezgls. Droseles strāvas iedarbes rezultātā pieaug kondensatora 11 spaiļu spriegums, kā arī spriegums uz slodzes. Jo zemāks ir slodzes sprieguma lielums, jo modulācijas periodā ilgāk tiek aktivēts tranzistoru 6, 8 pāris un īsāku laiku – pāris 3, 4. Ja slodzes spriegums pieaug, tad ilgāk tiek aktivēts tranzistoru pāris 3, 4, bet tranzistori 6, 8 – īslaicīgāk. Tādējādi tiek regulēts slodzes spriegums.

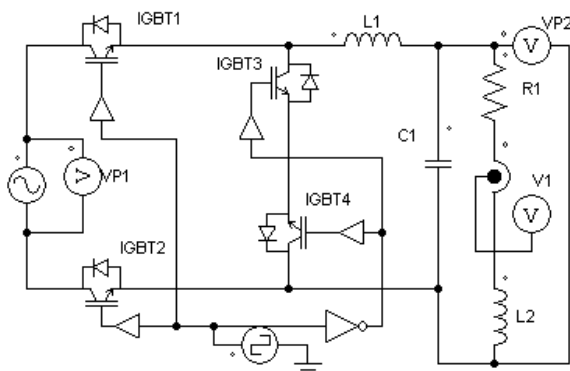


8.zīm. Paaugstinošā regulatora slēdžu darbības nosacītā diagramma pie aizpildījuma koeficienta $\gamma=0,6$ (reāli, slēdžu darbības frekvence ir daudz lielāka).

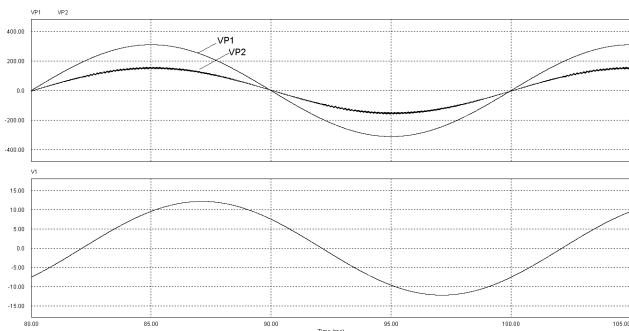
Zīm.8 ir parādīta paaugstinošā regulatora slēdžu darbības nosacītā diagramma, uz tās (6.zīm.) ir apzīmēti slēdži, kas ir aktīvi uz brīdi, kad caur tiem plūst strāva, iekavās ir parādīti neaktīvi slēdži, strāva neplūst, bet uz arī tiem tiek padots signāls.

IV. DATORMODELĒŠANAS REZULTĀTI

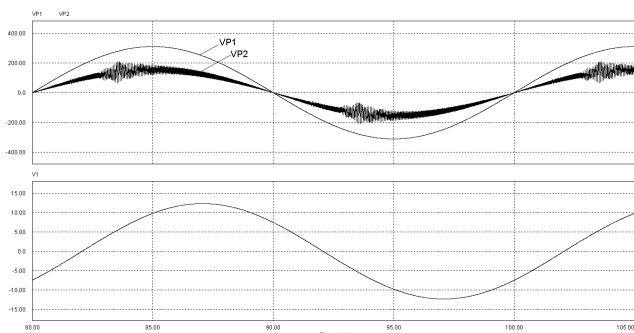
Datormodelēšana tika realizēta ar PSIM programmas palīdzību, kas ļauj nosimulēt elektrisko shēmu darbību. Zemāk tiek attēlotas regulatoru darbības datormodelēšanas (PSIM) pētījumu rezultāti.



9.zīm. Pazeminošā regulatora datormodelēšanas shēma, pie $\cos \varphi = 0,8$ un slodzes aktīvas jaudas $P= 1,5$ kW, aizpildījuma koeficienta $\gamma=0,5$, $U_{\text{baros}}=220\text{V}$

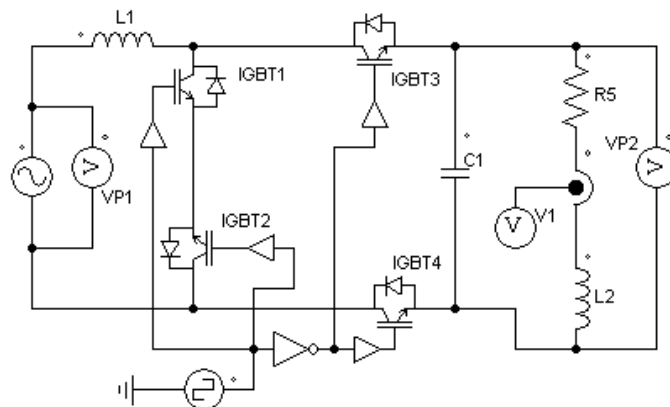


10.zīm. Pazeminošā regulatora modelēšanas rezultāti pie $L1=0,001\text{H}$ un $C1=0,0000005\text{F}$

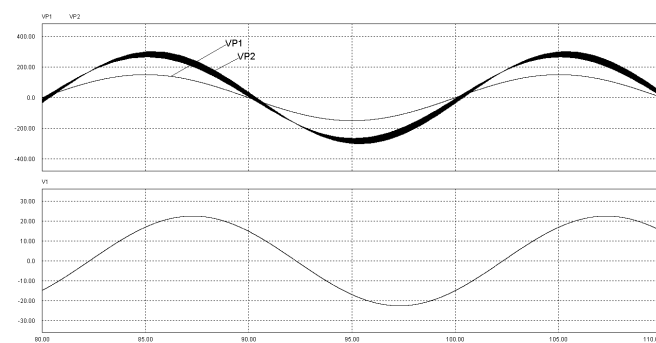


11.zīm. Pazeminošā regulatora modelēšanas rezultāti pie $L1=0,0002\text{H}$ un $C1=0,0000005\text{F}$

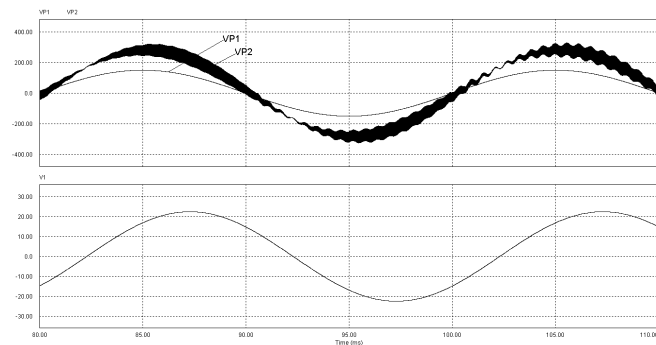
Salīdzinot modelēšanas rezultātus no 10.zīm. un 11.zīm., ir redzams, ka samazinot filtra elementa parametrus, palielinājās izejas sprieguma pulsācijas.



12.zīm. Paaugstinošā regulatora datormodelēšanas shēma, pie $\cos \varphi = 0,8$ un slodzes aktīvas jaudas $P= 2,5$ kW, aizpildījuma koeficienta $\gamma=0,5$, $U_{\text{baros}}=110\text{V}$



13.zīm. Paaugstinošā regulatora modelēšanas rezultāti pie $C1=0,0000005\text{F}$



14.zīm. Paaugstinošā regulatora modelēšanas rezultāti pie $C1=0,00000025\text{F}$

V. SECINĀJUMI

1. Izstrādātas sinusoidālā sprieguma pazeminošā un paaugstinošā impulsregulatoru shēmas, izmantojot ar vienkāršoto vadības algoritmu divvirzienu elektroniskos slēdžus uz IGBT struktūras pamata.
2. Pazeminošā un paaugstinošā augstfrekvences impulsregulatoru datormodelēšanas priekšrezultāti liecina par to, kā ir reāli uzbūvēt uz to regulatoru pamata sinusoidālā sprieguma stabilizatoru dažādā rakstura vidējās jaudas patērētāju barošanai.

3. Sintezējot sinusoidālā sprieguma stabilizatora shēmu, nekomutējams izejas filtrs jāizvēlas, vadojoties pēc izejas sprieguma maksimāli pieļaujamām relatīvām pulsācijām abos regulēšanas režīmos atbilstoši piņemtām ieejas sprieguma izmaiņām visiem uzdotajiem slodzes variantiem.

LITERATŪRAS SARAKSTS

- [1] Muhammad. H. Rashid. (Editor in Chief), Academic Press). Power electronics handbook. 2007.-1172lpp.
[2] Raņķis I. Energoelektronika.- RTU Izdevniecība, 2004.-160 lpp.
[3] Latvijas patents Nr 13835 Sinusoidāla vienfāzes maīnsprieguma stabilizators/ V.Hramcovs, V.Cīmanis, I.Raņķis, 2009



Vladimirs Cīmanis, doctoral student, M.Sc. Started study in Riga Technical university (RTU) in 2001 and has got a bachelor's (B.Sc.) degree and engineer's qualification in mechatronics in 2004. In 2006 has got a master's (M.Sc.) degree and electrical engineer qualification. Since 2006 works as a design engineer at JSC "Riga Electric Machine Building Works" and as a research assistant at RTU. Currently he is a doctoral student of RTU at "Computer control of electrical technologies" study program.

Riga Technical University, Faculty of Power and

electrical Engineering

Address: Kronvalda boulevard 1, LV1050, Riga, Latvia

Phone: +371 29679741, e-mail: vladimirs.cimanis@rtu.lv



Vladimirs Hramcovs, professor, Dr.Sc.Eng. He has graduated from Leningrad Institute of Engineers of Railway Transportation (now The Petersburg State University of Means of Communication) as electromechanical engineer in 1973. After defending the dissertation in Moscow in 1983 got a Dr.Sc. academic degree. In 1992 at scientific advisory committee of Riga Technical university has been assigned. Dr.Sc.Eng. degree. Until 1986 worked as workshop chief, engineering group head and research engineer at railway transport structural institutions

and research organizations. Since 1986 works as professor at Faculty of Power and Electrical Engineering (FPPE) of Riga Technical university (RTU).

1986 – 2004 – assistant professor of Department of Electronics and Electrical Engineering. 2004 – 2009 – associate professor of Department of Electronics and Electrical Engineering. Currently is a professor of RTU FPPE Department of Electronics and Electrical Engineering.

Research field is associated with application of power electronics in electrical transport and technical diagnosis of its equipment.

Riga Technical University, Faculty of Power and electrical Engineering, Institute of Industrial Electronics and Electrical Drives.

Address: Meza str.1, LV1048, Riga, Latvia

Phone: +371 7089503, e-mail: vladimirs.hramcovs@rtu.lv



Ivars Rankis, professor, Hab.Dr.sc.eng. He graduated from Riga Polytechnic institute in 1960 as engineer-electro-mechanic. Defended his first degree of Dr.sc. (candidate of technical sciences) in 1970. Defended his second degree Hab.Dr.sc.eng. in 1992 at Riga Technical university. From 1958-1966 he worked as engineer at Riga Electrical machine building company. From 1966 he started studies as doctoral student, but from 1970 – as teacher of different subjects of electrical engineering at Riga Technical university. Research interests are connected with Power electronics and Industrial automation. Now is professor at department of Industrial electronics and electrical technologies of Riga Technical university. Riga Technical university, Institute of Industrial Electronics and Electrical Engineering.

Address: Kronvalda 1, LV1048,Riga.

Phone +371 67 089 917, rankis@eef.rtu.lv

Vladimirs Cīmanis, Vladimirs Hramcovs , Ivars Rankis. The single-phase AC regulator on base of bidirectional IGBT switches.

In the work one of the methods for regulation of sinus shape AC voltage is considered for middle-power loads with an active-inductive character. Such a regulator keeping output voltage of sinus shape with stable RMS voltage must be fast-reacting and worked in closed-loop system. It's shown that for providing such features Buck and Boost pulse regulators can be applied in AC circuit too. Only in difference from DC pulse converters an electronic switches in the AC system must be with bidirectional conductivity. For this reason an IGBT transistors can be applied with implemented in structure reverse diodes and if such two transistors are connected in series and with contrary conductivity then at simultaneously activating the both one of them will be in on-state and current should pass in both directions. At application of IGBT transistors power of control system is quiet small and therefore it's possible realize fast reacting and efficient operation of the system. In the paper is described realization of AC regulators with such switches as also are given results of computer modeling. Output voltage ripples are investigated on matter of their admissible range and also efficiency of filtering equipment on LC base is investigated. Proper quality of output voltage can be obtained using the proper high frequency of switching and also good parameters of LC filter. Investigations are provided as for case when supply voltage is smaller as the rated output voltage and BOOST operation is realized and also for case when supply voltage is above rated value of output voltage and the stabilizer is working in BUCK mode. Such regulators can be applied for instance in electrical transport self supply systems.

Владимир Циманис, Владимир Храмцов, Иварс Ранкис. Регулятор однофазного переменного напряжения с использованием двунаправленных IGBT транзисторов.

Работа посвящена одному из методов регулирования синусоидального напряжения для потребителей средней мощности с активно-индуктивным характером нагрузки. Особое значение при регулировании имеет быстродействие и возможность использования замкнутой системы регулирования, что требуется для создания стабилизатора переменного напряжения с сохранением его синусоидальной формы. Показано, что для данной цели применимы импульсные регуляторы с пониженным и повышенным выходным напряжением. В отличие от подобных регуляторов постоянного тока, в данном случае все электронные ключи в цепях регуляторов должны быть двунаправленными, т.е. при воздействии сигнала управления пропускать ток любого направления. Наиболее подходящими являются транзисторы IGBT-типа с реверсивным диодом в составе интегральной структуры. Малое потребление мощности в цепях управления таких транзисторов позволяет подавать сигналы управления сразу на два IGBT транзистора, один из которых обеспечит протекание силового тока в нужном направлении. В работе рассмотрены схемы построения понижающего и повышающего импульсных регуляторов на основе двунаправленных IGBT-электронных ключей, а также предварительные результаты их исследований с помощью компьютерного моделирования. В процессе регулирования возникают пульсации выходного напряжения, минимизация которых достигается высокой частотой регулирования, в сочетании с выходным LC-фильтром. При синтезе рассмотренных схем регуляторов, соответствующее устройство может использоваться для питания электропотребителей в условиях электроснабжения с резкими колебаниями напряжения, например, на электротранспорте.