

ŠOLSKI CENTER VELENJE
ELEKTRO IN RAČUNALNIŠKA ŠOLA
Trg mladosti 3, 3320 Velenje

MLADI RAZISKOVALCI ZA RAZVOJ ŠALEŠKE DOLINE

RAZISKOVALNA NALOGA

ASINHRONSKI GENERATOR
ali kako do elektrike, ko ni elektrike

Tematsko področje: ELEKTROTEHNIKA, ELEKTRONIKA IN ROBOTIKA

Avtorja:

Simon Strmšnik, 3. letnik - elektrotehnika
Jaša Vid Meh Peer 3. letnik - elektrotehnika

Mentorja:

Matjaž Žerak, univ. dipl. inž.
dr. Nataša Meh Peer

Velenje, 2018

Raziskovalna naloga je bila opravljena na Šolskem centru Velenje, na Elektro in računalniški šoli.

Mentorja: Matjaž Žerak, univ. dipl. inž.

dr. Nataša Meh Peer

Datum predstavitve: 5. 3. 2018

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD ŠC Velenje, šolsko leto 2017/2018

KG Elektrotehnika

AV STRMŠNIK, SIMON, MEH PEER, JAŠA VID

SA ŽERAK, Matjaž, MEH PEER, Nataša

KZ 3320 Velenje, SLO, Trg mladosti 3

ZA ŠC Velenje, Elektro in računalniška šola, 2017

LI 2018

IN **ASINHRONSKI GENERATOR ALI KAKO DO ELEKTRIKE, KO NI ELEKTRIKE**

TD Raziskovalna naloga

OP VI, 63 str., 3 tab., 16 sl., 7 graf., 4 pril., 12 vir.

IJ SL

JI sl/en

AI Ko ni elektrike, smo izgubljeni. Naloga pomaga izdelati cenejši asinhronski generator iz motorja, ki ga imamo doma.

V raziskovalnem delu smo preizkusili samovzbujanje asinhronskega generatorja s pomočjo kapacitivnosti, obremenitev ter vpliv delovnega toka na napetost in frekvenco. Pri obremenitvi generatorja z delovnim tokom se napetost zmanjša, če kapacitivnosti ne spremenimo. Z večanjem kapacitivnosti lahko stabiliziramo napetost obremenjenega generatorja na željeno vrednost. S spreminjanjem kapacitivnosti na statorskih sponkah generatorja je možno spreminjati napetost generatorja pri konstantnem številu vrtljajev. Določili smo meje regulirane napetosti in stopnjo kapacitivnosti za stabilizacijo napetosti.

V projektne delu smo izdelali regulacijski sistem, ki s spreminjanjem kapacitivnosti regulira napetost generatorja, da je konstantna. Sestavljen je iz merilnika napetosti, mikrokrmilnika Arduino in izhodne enote. Uporabili smo 5 stopenj trifaznih kondenzatorjev vezanih v vezavi trikot. Za vklop posameznih stopenj pa kontaktorje. Merilnik napetosti smo izdelali iz transformatorja, usmerniškega mostička in delilnika napetosti prilagojenega za analogni vhod Arduina. Program za Arduino smo zasnovali tako, da je, glede na izmerjeno napetost generatorja, ustrezno spremenil stanja digitalnih izhodov. Preko kontaktorjev smo vplivali na skupno kapacitivnost kondenzatorjev.

Naš sistem omogoča generiranje elektrike in uspešno napajanje porabnikov z omejenim spreminjanjem napetosti.

KEY WORD DOCUMENTATION

ND Šolski center Velenje, šolsko leto 2015/2016

CX Electrical Engineering

AU STRMŠNIK, Simon, MEH PEER, Jaša Vid

AA ŽERAK, Matjaž, MEH PEER, Nataša

PP 3320 Velenje, SLO, Trg mladosti 3

PB Šolski center Velenje,

PY 2018

TI **ASYNCHRONOUS GENERATOR OR HOW TO POWER WHEN
THERE IS NO ELECTRICITY**

DT Research work

NO VI, 63 p., 3 tab., 16 fig., 7 graf., 4 ann., 12 ref.

LA SL

AL sl / en

AB When something goes wrong and the power goes out, we are lost in darkness. The aim of our research was to create a cheaper induction generator, which would be user friendly and made out of an electric motor we have at our homes.

In the research part of the task the induction generator was stirred with capacitors, some load was added to see how the current will affect the voltage level and the frequency that it generates. Adding more load to the generator causes more current to flow, that affects the voltage to drop, if we don't add any capacitors. By adding capacitors we can regulate the voltage level of the strained generator to our liking. We determined the borders of the regulated voltage level and the stage of capacitors for adjusting it.

To make everything work we used a system that can measure the voltage level and regulate it by adding or subtracting capacitors. It consists of a voltmeter connected to an Arduino board with specified outputs. We prepared 5 stages of capacitors connected in a triangle. For adding and subtracting capacitors we used 5 contactors. We designed the voltmeter from a transformer, AC-DC converter and a voltage divider made specifically for the Arduino analogue input. The programme that ran on the Arduino board functioned on the principle that used the analogue input signal to measure the voltage level of the generator and regulate the number of capacitors added with Arduino's output pins connected to the contactors. Our system lets us successfully generate electrical energy and adding loads that strain the generator, without letting the voltage level drop.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD.....	1
1.1	Hipoteze.....	2
2	PREGLED OBJAV	2
2.1	Električni stroji – generatorji.....	2
2.2	Samostojno (otočno) in omrežno obratovanje generatorjev	3
2.3	Sinhronski generator.....	4
2.4	Asinhronski stroji	5
2.5	ASG.....	6
2.6	Omrežno obratovanje ASG	6
2.7	Samostojno obratovanje ASG.....	8
2.8	Karakteristika napetosti in toka (UI) generatorja.....	8
2.9	Obremenitev ASG pri samostojnem obratovanju	10
2.10	Frekvenca napetosti ASG	12
3	MATERIALI IN METODE DE LA	13
3.1	Raziskovalni del naloge.....	13
3.1.1	Preizkus samovzbujanja generatorja.....	14
3.1.2	Preizkus obremenitve ASG pri samostojnem obratovanju	17
3.1.3	Preizkus obremenitve asinhronskega generatorja z regulirano napetostjo.....	17
3.1.4	Določanje stopnje kapacitivnosti za regulacijo napetosti	18
3.2	Rezultati raziskovalnega dela naloge.....	19
3.2.1	Rezultati meritve preizkusa samovzbujanja generatorja.....	19
3.2.2	Rezultati preizkusa obremenitve ASG v samostojnem obratovanju	21
3.2.3	Rezultati preizkusa obremenitve generatorja pri regulirani napetosti.....	22
3.2.4	Rezultati določanja spremembe kapacitivnosti.....	25
3.3	Projektni del naloge	25
3.3.1	Regulacijski sistem in njegove komponente	26
3.3.2	Meritev napetosti generatorja	27
3.3.3	Krmilnik Arduino	29
3.3.4	Programski del (logika krmiljenja).....	30
3.3.5	Izvršilni členi: uporaba relejev in kontaktorjev (aktuatorji)	33
3.3.6	Samostojnost obratovanja.....	34
3.3.7	Preizkus delovanja agregata	35
3.4	Rezultati projektnega dela naloge.....	36
3.4.1	Delovanje agregata	36
4	RAZPRAVA.....	39
5	ZAKLJUČEK	45
6	POVZETEK.....	47
7	ZAHVALA	48
8	PRILOGE	49

9	VIRI IN LITERATURA.....	56
---	-------------------------	----

KAZALO TABEL

Tabela 1: Samovzbujanje (vir lasten)	19
Tabela 2: Rezultati preizkusa obremenitve ASG (vir lasten)	22
Tabela 3: Največja moč generatorja pri regulirani napetosti (vir lasten).....	24

KAZALO SLIK

Slika 1: Vezava asinhronskega generatorja v otočnem obratovanju (Avčin, Jereb, 1983)	8
Slika 2: Obremenitev ASG v otočnem obratovanju (vir lasten)	10
Slika 3: Preizkus prostega teka asinhronskega generatorja v otočnem obratovanju (vir lasten)	16
Slika 4: Shema preizkusa obremenitve AG (vir lasten).....	17
Slika 5: Električna vezava preizkusa obremenitve pri regulirani napetosti (vir lasten).....	18
Slika 6: Blok shema regulacijskega sistema (vir lasten).....	27
Slika 7: Greatzov spoj, slika in shema (vir lasten)	28
Slika 8: Shema merilnega usmernika (vir lasten)	29
Slika 9: Arduino Uno (https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3).....	30
Slika 10: Vezava kondenzatorjev	33
Slika 11: Slika našega izdelka z vsemi izvršilnimi členi (vir lasten).....	34
Slika 12: Preizkus prostega teka asinhronskega motorja (vir lasten).....	41
Slika 13: Usmernik	54
Slika 14: Krmilnik	54
Slika 15: Izvršilni členi.....	55
Slika 16: Kondenzatorji	55

KAZALO GRAFOV

Graf 1: UI karakteristika generatorja (vir lasten)	8
Graf 2: Samovzbujanje ASG (Avčin, Jereb, 1983)	9
Graf 3: Odvisnost napetosti od moči (Avčin, Jereb, 1983).....	11
Graf 4: Vzbujaalna karakteristika ASG (vir lasten)	19
Graf 5: Odvisnost napetosti od oddane delovne moči (vir lasten).....	22
Graf 6: Odvisnost vzbujaalnega toka I_V od delovne obremenitve I_d pri reguliranih napetostih (vir lasten) 23	
Graf 7: Preizkus delovanja regulatorja (vir lasten)	37

KAZALO PRILOG

Priloga 1: Rezultati preizkusa obremenitve asinhronskega generatorja pri regulirani napetosti	49
Priloga 2: Stopnje kapacitivnosti vzbujaalnih kondenzatorjev:.....	51
Priloga 3: Program za Arduino	52
Priloga 4: Regulacijski sistem	54

SEZNAM SIMBOLOV

U [V]	Linijška napetost trifaznega sistema
U_f [V]	Fazna napetost trifaznega sistema
U_N [V]	Nazivna napetost
I_V [A]	Vzbujalni tok: jalov tok asinhronskega generatorja
I_d [A]	Delovni tok asinhronskega generatorja
I [A]	Skupni izmenični tok
I_{10} [A]	Tok prostega teka
C_Y [F]	Kapacitivnost v vezavi zvezda
C_Δ [F]	Kapacitivnost v vezavi trikot
P [W]	Delovna moč
f [Hz]	Frekvenca
n [vrt/min]	Število vrtljajev
n_S [vrt/min]	Sinhronsko število vrtljajev, število vrtljajev magnetnega polja

1 UVOD

Predstavljajte si svet brez luči, brez sušilnika za lase, brez pralnega stroja, brez računalnika, brez televizije ... brez elektrike!

Da se lotimo raziskovalne naloge smo se odločili, ker imamo radi elektrotehniške izzive in z znanjem elektrotehnike, ki smo si ga pridobili v dveh in pol letih šolanja, smo želeli streti elektrotehniške "trde orehe", kakršen je, izdelava asinhronskega generatorja (ASG).

Ljudje smo navajeni, da imamo električno energijo vsak dan, je v bistvu nepogrešljiva! Ko pa je zaradi različnih vzrokov zmanjka, smo izgubljeni. Še posebej se to občuti ob podnebnih ujmah, kot je bil žledolom, poplave, vetrolom ... In ker so takšne vremenske neugodnosti vedno pogostejše, se nam je zdelo, da bi si marsikdo z malo znanja elektrotehnike lahko pomagal sam. Zato smo se lotili raziskave in izdelovanja naprave, ki bi lahko ljudem pomagala, da si ustvarijo električno energijo. Naša naprava je tudi cenejša od običajnih naprav, ki proizvajajo električno energijo.

Raziskovalna naloga obsega vsebine delovanja ASG, raziskovanje, načrtovanje in izdelavo agregata z uporabo Arduina. V nalogi bi radi predstavili uporabo asinhronskega stroja v otočnem režimu obratovanja in njegov način izdelave iz komponent, ki so enostavno dosegljive, jih imamo pri roki in so poceni. In kot je rekel J. Rohn: »Ne pustite, da vas učenje vodi le v znanje, naj vas vodi v dejanje.« smo se lotili izdelave asinhronskega generatorja.

Želeli smo torej sestaviti ASG, saj je »pravi« generator še vedno sinhronski, vendar je njegova sinhronizacija na omrežje precej bolj zahtevna, saj ga moramo pred priklopom poravnati po frekvenci in amplitudi. Prav tako je med njima cena neprimerljiva, saj so sinhronski generatorji dražji. Prav tako pa ni zanemarljivo, da smo z raziskovanjem in izdelavo generatorja želeli pomagati predvsem ljudem, ki kadar ostanejo brez električne energije to zanje pomeni izpad proizvodnje, če imajo avtomatizirano (ne morejo molsti krav, jih hraniti) in domnevamo, da imajo v bližini traktorski motor.

Cilj naloge je torej domači asinhronski motor uporabiti kot cenovno ugodnejši generator, ki bi ljudem pomagal do elektrike, ko ni elektrike.

1.1 Hipoteze

Hipoteze, ki smo si jih postavili so naslednje:

1. S spreminjanjem kapacitivnosti je možno regulirati napetost obremenjenega asinhronskega generatorja pri samostojnem obratovanju s konstantnim številom vrtljajev.
2. Laboratorijski asinhronski stroj bo pri generatorskem otočnem obratovanju omogočal napajanje porabnikov z nazivno napetostjo omrežja 400 V.
3. S pomočjo krmilnika Arduino bomo uspeli izdelati regulator napetosti asinhronskega generatorja v samostojnem obratovanju.

2 PREGLED OBJAV

2.1 Električni stroji – generatorji

Elektromotor je stroj, ki pretvarja električno energijo v mehansko. Leta 1821 je Michael Faraday demonstriral pretvorbo električne energije v mehansko s pomočjo elektromagnetizma. Razvoj električnih generatorjev je bil v 19. stoletju zaznamovan z velikim številom znanstvenikov in inovatorjev, ki so dodali kamen v mozaiku razvoja električnih strojev. Konstrukcija asinhronskega stroja je bila razvita zadnja v vrsti po razvoju enosmernih in sinhronskih strojev. Asinhronski motor pa je izumil Nikola Tesla leta 1887.

Viri električne energije so stroji, ki različne oblike prvotne energije (energija vodnega padca, goriva, vetrna energija, geotermalna energija, jedrska energija) pretvorijo v energijo električnega toka. Primarne energije omogočajo posredno ali neposredno vrtenje turbine, ki je podobna mlinskemu kolesu. Turbina vrti gred, na kateri je generator, ki proizvaja električno energijo in jo oddaja v omrežje, na katero so priključeni porabniki.

Električni stroji so torej naprave, ki s pomočjo magnetnega polja pretvarjajo električno energijo iz ene oblike v drugo. Z motorskim obratovanjem električnega stroja dosežemo pretvarjanje električne energije v mehansko, z generatorskim pa pretvarjamo mehansko energijo v električno. Delovanje električnih strojev temelji na dveh zakonih elektromagnetike:

- Časovno spreminjajoče polje povzroči induciranje napetosti v navitjih.
- Pojav sile na vodnik s tokom v magnetnem polju. (Miljavec, Jereb, 2005)

Velik delež celotne porabe energije predstavlja električna energija. V svetovnem merilu gledano veliko večino električne energije proizvedemo z elektrarnami, ki primarno energijo pretvorijo v mehansko in za zadnjo pretvorbo iz mehanske v električno energijo uporabljajo električne generatorje. Mehansko energijo pretvarjamo v električno s tremi vrstami električnih generatorjev: enosmernim ali kolektorskim, sinhronskim in asinhronskim generatorjem.

Enosmerne generatorje uporabljamo redko. Večinoma za napajanje baterij v avtomobilih, malih vetrnih elektrarnah, saj imajo omejeno moč zaradi prehoda toka obremenitve čez komutator, ki služi kot mehanski usmernik. Na komutatorju nastajajo izgube – toplota, ki povzroča segrevanje in obrabo obeh sestavnih delov ščetk in kolektorja. Kolektorskih generatorjev za napajanje električnih omrežij ne uporabljamo. Večinoma napajajo otočne sisteme z enosmerno napetostjo.

Večino pretvorb iz mehanske v električno energijo opravljajo sinhronski generatorji, kar 99 % pretvorb. Vse velike elektrarne uporabljajo za pretvorbo sinhronske generatorje, ki so tudi največji električni stroji, ki jih je zgradil človek. Dosegajo moči do nekaj GVA (GW).

ASG se zaradi malo slabšega izkoristka redko uporabljajo za proizvodnjo električne energije v velikih elektrarnah. Zaradi nižje cene stroja in poenostavljenih regulacijskih in zaščitnih naprav se uporabljajo v malih hidroelektrarnah do moči nekaj deset kilovatov.

2.2 Samostojno¹ (otočno) in omrežno² obratovanje generatorjev

Vsa omrežja delujejo po principu konstantne napetosti, zato priključimo generatorje vzporedno z drugimi generatorji in porabniki. Tako tvorimo električno omrežje.

Enosmernih omrežij ni. Razlog so težave s spreminjanjem velikosti enosmerne napetosti in s tem prevelikih izgub pri prenosu električne energije. Vsi energetske sistemi

¹ V strokovni literaturi se uporabljata oba izraza, mi smo se odločili, da bomo v nalogi uporabljali izraz *samostojno* obratovanje.

² Odločili smo se za uporabo izraza *omrežno* obratovanje, čeprav je v literaturi mogoče zaslediti tudi izraz *mrežno* obratovanje.

uporabljajo trifazni izmenični sistem za prenos električne energije med generatorji in porabniki.

Izmenična električna omrežja so trifazna, sestavlja jih lahko več generatorjev, ki so zaradi konstantne napetosti in frekvence vezani vzporedno. Regulacija frekvence in napetosti je naloga vsakega generatorja v omrežju, hkrati pa en sam generator ne more spremeniti frekvence ali napetosti.

Samostojno obratovanje izmeničnega generatorja pomeni, da le en generator samostojno napaja električne porabnike. Pri otočnem obratovanju mora generator vzdrževati napetost in frekvenco.

Pri regulaciji frekvence in napetosti se sinhronski generator razlikuje od asinhronskega.

2.3 Sinhronski generator

Sinhronski generator je trifazni vrteči se stroj. Ime sinhroni izvira iz same narave delovanja stroja. Značilno je, da je frekvenca induciranih napetosti točno v ritmu, torej sinhrona ali sočasna, s hitrostjo vrtenja magnetnega polja oziroma rotorja.

Frekvenca napetosti se spremeni, če se spremeni hitrost vrtenja rotorja.

Sinhronski generator ima na rotorju enosmerno vzbujalno navitje, ki v rotorju vzbudi enosmerno magnetno polje. Rotor zavrtimo in z njim se zavrti magnetno polje. Nastane vrtilno magnetno polje. V trifaznem statorskem navitju se inducira izmenična napetost. Frekvenca statorske inducirane napetosti je sorazmerna s številom vrtljajev in s številom magnetnih polov, ki jih tvori rotorsko vzbujalno navitje, kar zapišemo z naslednjim izrazom:

$$f = n_s \cdot p \quad (1)$$

f ... frekvenca [Hz]

n_s ... sinhronsko število vrtljajev [$\frac{\text{vrt.}}{\text{s}}$]

p ... število parov polov

Frekvenco induciranih napetosti v statorskih tuljavah lahko natančno določimo s številom vrtljajev rotorja.

Amplituda induciranih napetosti je sorazmerna s frekvenco (št. vrtljajev) in z magnetnim pretokom, kar ponazarja naslednji izraz:

$$E = 4,44 \cdot f \cdot \phi \cdot N \quad (2)$$

E ... inducirana napetost statorskih tuljav [V]

ϕ ... magnetni pretok [Wb]

N ... število ovojev tuljave

Zaradi zahteve po konstantni frekvenci napetosti se morajo sinhronski generatorji vrteti točno s sinhronskim številom vrtljajev. Zato napetosti ne reguliramo s frekvenco, temveč z rotorskim vzbujalnim tokom, tako lahko napetost in frekvenco točno določimo s številom vrtljajev in vzbujalnim tokom.

Sinhronski generatorji obratujejo v otočnem režimu večinoma kot agregati, ko napajajo električne porabnike v primeru izpada električnega omrežja. Sinhronskemu generatorju, ki napaja lastno omrežje v otočnem režimu obratovanja, moramo regulirati frekvenco in napetost. Frekvenco reguliramo s številom vrtljajev pogonskega stroja, napetost pa z enosmernim vzbujalnim tokom (Zagradišnik, Slemnik 2001).

2.4 Asinhronski stroji

Asinhronski stroji si delijo podobne značilnosti s transformatorji in sicer v tem, da imajo primarna in sekundarna navitja, ki so v asinhronskem stroju nameščena v utore in razmaknjena za 120 stopinj (Zagradišnik, Slemnik, 2001). Aktivna dela stroja sta stator in rotor. Stator je sestavljen iz lamel pločevine, s poljubnim številom utorov, v katera so umeščena navitja. Rotorje pa delimo na: rotorje z drsnimi obroči in rotorje s kratkostično kletko.

Asinhronski stroj uporabljamo predvsem kot motor. V motorskem režimu obratovanja se rotor vrti počasneje kot vrtilno magnetno polje. Pravimo, da rotor zaostaja za slip³ za vrtilnim magnetnim poljem, kar ponazorimo z naslednjim izrazom:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (3)$$

³ Slip je zaostajanje hitrosti rotorja za hitrostjo statorskega vrtilnega magnetnega polja.

s ... slip

n ... število vrtljajev rotorja $\left[\frac{\text{vrt.}}{\text{min}}\right]$

2.5 ASG

Generatorsko delovanje asinhronskega motorja dosežemo, če izpolnimo dva pogoja:

- Rotor asinhronskega motorja moramo zavrteti.
- Statorskim tuljavam moramo zagotoviti magnetilni tok.

Pri otočnem obratovanju asinhronskega generatorja zagotovimo magnetilni tok drugače kot pri omrežnem obratovanju.

Ker ASG sam ne more proizvajati magnetilnega toka in induktivne komponente bremenskega toka, mu to priskrbimo na statorski strani. Kar storimo na dva načina:

- Pri omrežnem načinu je stroj priključen na zunanje omrežje, ki ima stalno napetost in frekvenco in mu zagotovi magnetilni tok.
- Pri otočnem načinu delovanja mu zagotovimo magnetilni tok s kondenzatorji priključenimi na statorske sponke (Miljavec, Jereb, 2005).

2.6 Omrežno obratovanje ASG

Pri omrežnem obratovanju ASG moramo statorsko navitje priključiti na trifazno togo⁴ električno omrežje in rotor zavrteti nad sinhronske vrtljaje stroja. Pravimo, da deluje v nadsinhronizmu. Nadsinhronska hitrost je navadno 1 % do 3 % večja od sinhronske (Avčin, Jereb, 1983). S tem dosežemo, da stroj postane generator in oddaja delovno moč v omrežje, od koder jemlje potrebno jalovo moč za magnetenje.

Ker se rotor vrti hitreje od magnetnega polja je slip negativen. Pri generatorskem obratovanju rotor prehiteva magnetno polje, kar je drugače kot pri motorskem, kjer rotor zaostaja za vrtilnim poljem. Zaradi negativnega slipa, oziroma drugačne smeri rotorske inducirane napetosti, se spremeni tudi smer rotorskega toka glede na njegovo smer pri motorskem obratovanju. Vpliv rotorskega toka na statorskega je preko magnetnega polja takšen, da delovna komponenta statorskih tokov zamenja smer. Točka delovanja se premakne v generatorski način obratovanja. Pri omrežnem obratovanju tečejo v

⁴ Togo omrežje razumemo kot omrežje konstantne napetosti in frekvence.

motor:

- Magnetilna komponenta toka, ki zaostaja za napetostjo za 90 stopinj. To je jalova komponenta, ki teče v motor za vzbujanje magnetnega polja in se ne pretvori v drugo obliko.
- Delovna komponenta statorskega toka, ki teče v nasprotni smeri kot pri motorskem obratovanju asinhronskega stroja. Manjši del delovne komponente toka se pretvori v toploto v generatorju, večji del pa generator odda električnim porabnikom v omrežju, kjer se pretvori v koristno obliko dela (toploto, mehansko delo, svetlobo, kemično delo).

Vrtljaji magnetnega polja so pri omrežnem obratovanju določeni s frekvenco omrežja, kar zapišemo z naslednjim izrazom:

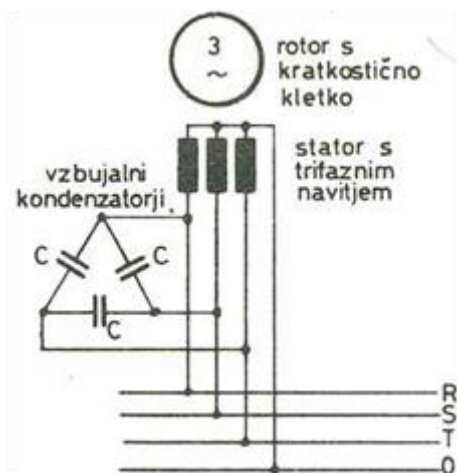
$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (4)$$

Generator obremenjujemo tako, da s pogonskim strojem (turbina) povečamo navor, tako da povišamo vrtljaje oziroma povečamo slip (prehitevanje) rotorja. Posledica je povečanje generatorske delovne komponente statorskega toka in oddajanje delovne moči porabnikom (Uršič, 2011).

V generatorskem obratovanju opazujemo delovanje z nazivnim statorskim tokom I_N . Oddana mehanska moč v nazivnem motorskem obratovanju je manjša kot oddana električna moč v nazivnem generatorskem obratovanju. Kar pomeni, da bo stroj pri enakem statorskem toku močnejši v generatorskem obratovanju (razlika okrog 5 %). V nazivnem obratovanju ASG potrebuje jalovo moč, ki je med 50 % do 80 % nazivne delovne moči.

Če uporabimo trifazni asinhronski motor kot generator na omrežju, kjer je ista napetost in frekvenca, potem se lahko zgodi nasičenje v železnem jedru. Zaradi inducirane napetosti, ki je obratna pri motorju in generatorju (pri motorju je manjša, pri generatorju pa večja od omrežne), se poveča magnetno polje in posledično se povečajo vse gostote v statorju in rotorju, kar pa povzroči izgube v železu in prekomerno segrevanje motorja (Miljavec, Jereb 2005).

2.7 Samostojno obratovanje ASG



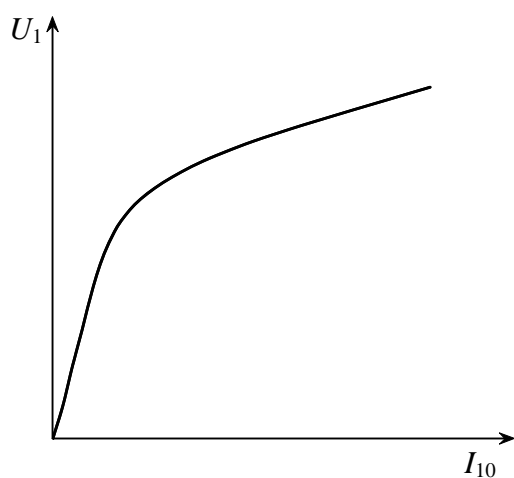
Slika 1: Vezava asinhronskega generatorja v otočnem obratovanju (Avčin, Jereb, 1983)

V primeru, ko je asinhronski stroj ločen od ostalih delov električnega omrežja, in deluje kot samostojni ASG, je potrebno jalovo energijo pridobiti iz kondenzatorskih baterij, ki so vezane na statorske sponke generatorja. Pogonski stroj zagotavlja vrtilni moment na osi generatorja. Za generatorski način obratovanja asinhronskih strojev se v večini uporabljajo stroji s kratkostično kletko ali navitim rotorjem (Uršič, 2011).

Samostojno obratovanje dosežemo tako, da generator zavrtimo, na statorske sponke pa priključimo trifazno kapacitivno breme – vzbujalne kondenzatorje.

Statorsko trifazno navitje povežemo v vezavo zvezda, saj se tako izognemo močnim tokovom trojne frekvence, ki krožijo v sklenjenem trikotnem navitju, kamor vežemo vzbujalne kondenzatorje. Kondenzatorje ustrezne kapacitivnosti C lahko povežemo v vezavo zvezda ali trikot. Avčin, Jereb priporočata vezavo kondenzatorjev v vezavo trikot. Ta generator prenese tudi nesimetrične obremenitve (Avčin, Jereb, 1983).

2.8 Karakteristika napetosti in toka (UI) generatorja



Graf 1: UI karakteristika generatorja (vir lasten)

UI karakteristika statorskega električnega kroga nam pokaže odvisnost statorskega toka prostega teka od priključene napetosti. Izmerimo jo lahko pri motorskem obratovanju. Vidimo, da je pri mali napetosti tok majhen. Statorski tok se nesorazmerno bolj poveča, če napetost preide koleno UI karakteristike.

Vsi električni stroji delujejo pod kolonom

UI karakteristike, v področju visoke impedance, ko železno jedro ni prešlo v zasičenje. Pri višjih napetostih, ko je železo zasičeno, se pri malem povišanju napetosti magnetilni tok (nesorazmerno) poveča.

Pri višjih napetostih od nazivne, ki je v kolenu, ima UI karakteristika malo impedanco in tok hitro narašča. UI karakteristika statorskega električnega kroga je nelinearna.

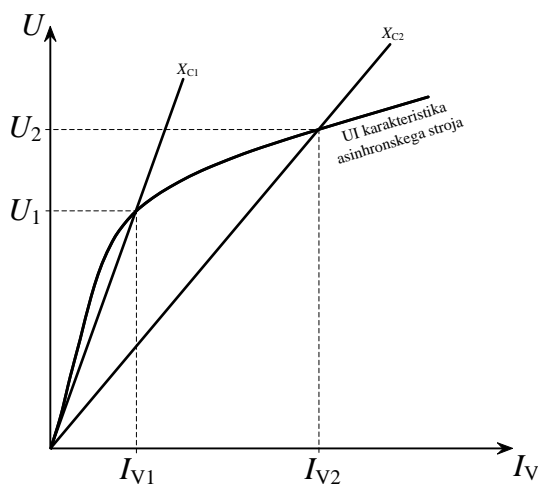
V skupni diagram k UI karakteristiki generatorja vrišemo še UI karakteristiko kondenzatorjev, ki je linearna, saj kapacitivna upornost ni odvisna od napetosti ali toka, temveč od frekvence in kapacitivnosti kondenzatorjev, kar zapišemo z naslednjim izrazom:

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad (5)$$

X_C ... kapacitivna upornost [Ω]

C ... kapacitivnost [F]

Področje, kjer je magnetilna karakteristika višja od kondenzatorjeve, je področje samovzbujanja.



Graf 2: Samovzbujanje ASG (Avčin, Jereb, 1983)

Ko vzporedno na sponke asinhronskega generatorja priključimo kapacitivnosti kondenzatorjev, bo zaradi remanentnega magnetizma prišlo do postopka samovzbujanja. Mala napetost, ki je posledica remanentnega magnetizma, bo čez kondenzatorje in statorsko navitje pognala majhen tok, ki bo povečal skupno magnetno polje, kar vodi k še višji indukciji. Postopek, ki bo pri vrtenju rotorja povzročil višjo inducirano napetost in višji statorski tok, imenujemo proces samovzbujanja asinhronskega generatorja. Končal se bo, ko se bosta karakteristika kondenzatorjev in magnetilna karakteristika sekali.

Generator bo, pri konstantnem številu vrtljajev in konstantni kapacitivnosti, obratoval v

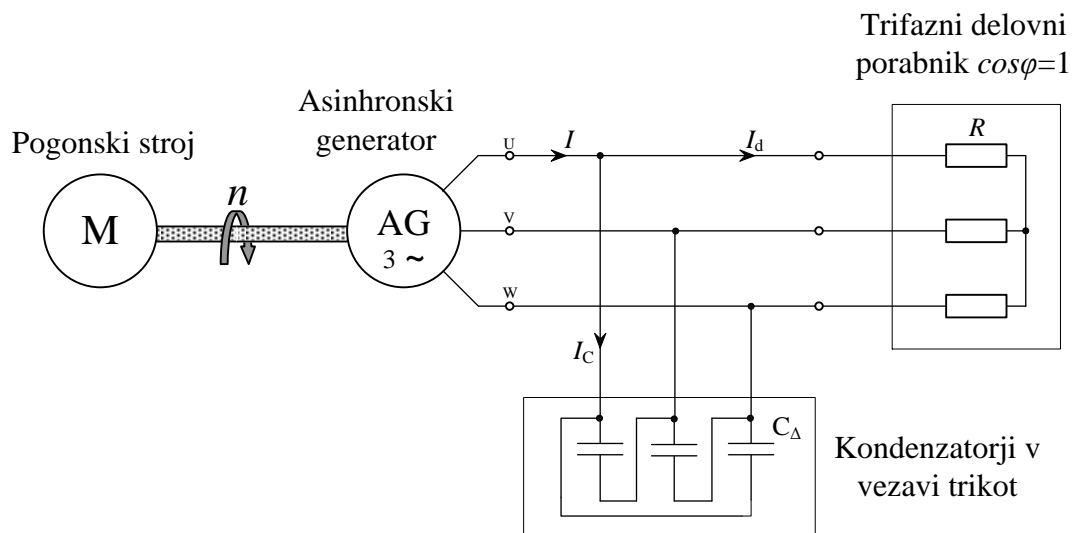
Generator bo, pri konstantnem številu vrtljajev in konstantni kapacitivnosti, obratoval v

točki presečišča magnetilne karakteristike in UI karakteristike kondenzatorjev s konstantno napetostjo, frekvenco in tokom.

S spremembo kapacitivnosti kondenzatorjev se spremeni naklon UI karakteristike kondenzatorja in s tem točka presečišča z magnetilno karakteristiko motorja. Tako lahko s spreminjanjem kapacitivnosti spreminjamo napetost in kapacitivni vzbujačni tok I_V čez stator in kondenzatorje. Pri napetostih višjih od kolenske bo tekla nesorazmerno večji vzbujačni tok. Pri konstantnem številu vrtljajev lahko napetost asinhronskega generatorja reguliramo s spreminjanjem kapacitivnosti kondenzatorjev. Pri večji kapacitivnosti bo stekel večji vzbujačni tok in inducirana napetost se bo povišala po UI karakteristiki motorja. Zmanjšanje kapacitivnosti kondenzatorjev ima obraten učinek. Učinek zmanjšanja vzbujačnega toka in zmanjšanje inducirane napetosti in s tem napetosti na sponkah generatorja (Avčin, Jereb, 1983).

2.9 Obremenitev ASG pri samostojnem obratovanju

Asinhronski motor obremenimo tako, da na statorske priključne sponke s kondenzatorji vzbujenega generatorja, vzporedno k vzbujačnim kondenzatorjem, priključimo električni porabnik – breme.



Slika 2: Obremenitev ASG v otočnem obratovanju (vir lasten)

Po statorskem navitju stečeta poleg kapacitivne komponente izmeničnega toka še tok

porabnika, ki se vektorsko prišteje k vzbujaalnemu toku kondenzatorjev. V primeru delovne obremenitve je statorski tok vsota kapacitivne in delovne komponente, kar ponazarja naslednji izraz:

$$I = \sqrt{I_d^2 + I_c^2} \quad (6)$$

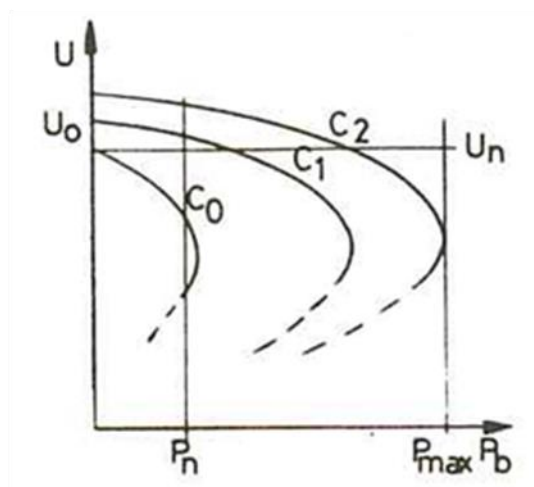
I ... skupni tok [A]

I_d ... delovni tok [A]

I_c ... kapacitivni tok [A]

Povečanje statorskega toka zaradi obremenitve generatorja povzroči zmanjšanje generatorjeve napetosti. Pri konstantni vzbujaalni kapacitivnosti in toku se pri višanju obremenitve napetost generatorja manjša. Manjšanje napetosti pa ni odvisno samo od velikosti bremenskega toka temveč tudi od faktorja delavnosti porabnikov $\cos\varphi$, če navedemo: »To padanje napetosti je tem izdatnejše, čim bolj je breme induktivno.«

(Avčin, Jereb, 1983).



Graf 3: Odvisnost napetosti od moči (Avčin, Jereb, 1983)

Karakteristika (graf 3) pa kaže tudi na to, da generatorja ne moremo obremeniti preko maksimalne moči, pri kateri izgubi sposobnost samovzbujanja in se razmagnet. Kratek stik na sponkah asinhronskega generatorja pri samostojnem obratovanju ni nevaren, saj se napetost zmanjša na malo vrednost (Avčin, Jereb, 1983).

Napetost je odvisna tudi od števila vrtljajev.

Z zmanjšanjem hitrosti vrtenja rotorja se manjša inducirana napetost. Zaradi delovne

obremenitve in posledice zavornega navora generatorja se zmanjša število vrtljajev pogonskega stroja (turbine), kar vodi v zmanjšanje inducirane napetosti generatorja.

Napetost na sponkah samostojno obratujočega asinhronskega generatorja se pri obremenitvi zmanjša zaradi dveh razlogov:

- Zmanjšanja števila vrtljajev in posledično manjše inducirane napetosti pri delovni obremenitvi generatorja.

- Padcev napetosti v statorskem navitju, ki povzročijo, da je napetost na sponkah generatorja manjša od inducirane napetosti v statorskem navitju stroja.

2.10 Frekvenca napetosti ASG

V prostem teku je slip skoraj nič in frekvenca napetosti je določena z naslednjim izrazom:

$$f_0 = p \cdot n \text{ [Hz]} \quad (7)$$

f_0 ... frekvenca v prostem teku [Hz]

Pri obremenitvi generatorja se slip poveča in frekvenca napetosti zmanjša, kar prikazuje naslednji izraz:

$$f = \frac{f_0}{(1-s)} \text{ [Hz]} \quad (8)$$

Rotor prehiteva magnetno polje. Število vrtljajev rotorja je večje kot sinhronsko število vrtljajev magnetnega polja in frekvenca v statorskem navitju inducirane napetosti (napetost generatorja) se zmanjša. Če se vrtljaji pri delovni obremenitvi generatorja zmanjšajo, se frekvenca dodatno zmanjša.

3 MATERIALI IN METODE DELA

Nalogo, ki smo jo v prejšnjem poglavju predstavili skozi teoretične objave, smo razdelili na raziskovalni in projektni del.

V raziskovalnem delu smo preizkusili samostojno obratovanje asinhronskega generatorja v prostem teku in v obremenjenem stanju. Iz rezultatov raziskovalnega dela naloge smo načrtovali regulacijski sistem napetosti generatorja, ki bi zagotavljal napajanje enostavnih porabnikov pri konstantnem številu vrtljajev. In zato smo tudi rezultate navajali ločeno, saj smo iz rezultatov raziskovalnega dela začeli projektni del, kjer smo izdelali regulator napetosti s stopenjskim spreminjanjem kapacitivnosti.

3.1 Raziskovalni del naloge

V tem delu naloge smo raziskali generatorsko delovanje priročnega laboratorijskega asinhronskega stroja. Za raziskavo smo uporabili asinhronski motor iz šolskega laboratorija, ki je bil izdelan za motorsko obratovanje in ima naslednje nazivne podatke:

$$P_N = 1,1 \text{ kW}$$

$$U_N = 380 \text{ V zvezda}$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$I_N = 3,7 \text{ A}$$

$$\cos\varphi = 0,67$$

$$n_N = 1360 \frac{\text{vrt}}{\text{min}}$$

Stroj ima dva para polov in sinhronsko število vrtljajev magnetnega polja (1500 vrt/min). Poganjali ga bomo s sinhronskim motorjem, ki bo zagotovil konstantno število vrtljajev, neodvisno od obremenitve. Tudi sinhronski motor je štiripolni in se pri priklopu na omrežno napetost frekvence 50 Hz vrti s sinhronskim številom vrtljajev (1500 vrt/min).

Kljub priporočilu (Avčin, Jereb, 1983), da je kondenzatorje bolje vezati v vezavo trikot kot v zvezdo, smo zaradi bolj enostavne izvedbe meritev in spreminjanja kapacitivnosti, kondenzatorje v raziskovalnem delu naloge vezali v vezavo zvezda.

Merilna oprema in materiali, ki smo jih uporabili v raziskovalnem delu naloge:

Merilna oprema in material:	Nazivni podatki:
Pogonski stroj:	$U_N = 400 \text{ V Y}$
Sinhronski motor:	$I_N = 2,4 \text{ A}$ $P_N = 1 \text{ kW}$ $\cos\varphi = 0,8$ $n = 1500 \frac{\text{vrt}}{\text{min}}$
Dve ohmski bremen:	$3 \times 1000 \ \Omega, 0,57 \text{ A}$ $3 \times 3300 \ \Omega, 0,31 \text{ A}$
Merilni instrumenti:	Finest 707 TRUE RMS Multimeter VOLTcraft VC 830 Victor VC890C+
Kondenzatorji:	$40 \ \mu\text{F}, 20 \ \mu\text{F}, 10 \ \mu\text{F}, 5 \ \mu\text{F}, 2,5 \ \mu\text{F} (400 \text{ V})$

Pri izvajanju meritev, merilnih pogreškov nismo ovrednotili. Ocenjujemo, da so uporabljeni šolski digitalni merilni instrumenti dovolj točni za namen naše raziskave. Raziskavo generatorja smo začeli s preizkusom kondenzatorskega vzbujanja v neobremenjenem stanju. Najprej smo preizkusili samovzbujanje in izmerili, kako je napetost generatorja odvisna od kapacitivnosti kondenzatorjev.

3.1.1 Preizkus samovzbujanja generatorja

Najprej smo določili potrebno kapacitivnost za vzbujanje generatorja iz nazivnih podatkov za motorsko obratovanje stroja. Iz nazivnega toka in napetosti smo izračunali navidezno moč stroja pri nazivni obremenitvi:

$$S_N = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_N = 2435 \text{ VA} \quad (9)$$

S_N ... navidezna moč pri nazivni obremenitvi motorja [VA]

U_N ... nazivna napetost motorja [V]

I_N ... nazivni tok motorja [A]

Jalovo moč pri nazivni obremenitvi določimo s pomočjo nazivnega faktorja delavnosti,

kar izračunamo z naslednjim izrazom

$$Q_N = S_N \cdot \sin\varphi = 1808 \text{ var} \quad (10)$$

Q_N ... jalova moč pri nazivni obremenitvi motorja [var]

Izračunana jalova moč Q je le malo odvisna od obremenitve motorja, torej je približno enaka v vseh obratovalnih stanjih motorja.

Z izrazom (11) smo izračunali jalovo moč enega kondenzatorja, ki je enaka tretjini skupne jalove moči:

$$Q_C = \frac{Q_N}{3} = 603 \text{ var} \quad (11)$$

Q_C ... jalova moč enega kondenzatorja [var]

Potrebno kapacitivnost izračunamo iz znane jalove moči, napetosti in frekvence. Zaradi malega slipa v prostem teku generatorja in konstantnega števila vrtljajev pogonskega stroja smo predpostavili frekvenco 50 Hz. Pri trikotni vezavi kondenzatorjev je na kondenzatorju linijska napetost, zato kapacitivnost kondenzatorjev v trikotu izračunamo z naslednjim izrazom:

$$C_\Delta = \frac{Q_C}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot U_N^2} = 13,3 \text{ }\mu\text{F} \quad (12)$$

C_Δ ... kapacitivnost v vezavi trikot [F]

Kapacitivnost pri vezavi kondenzatorjev v zvezdni vezavi izračunamo s pomočjo fazne napetosti z naslednjim izrazom:

$$C_Y = \frac{Q_C}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot U_f^2} = 40 \text{ }\mu\text{F} \quad (13)$$

C_Y ... kapacitivnost v zvezdi [F]

Fazno napetost na kondenzatorju v vezavi zvezda izračunamo z izrazom:

$$U_f = \frac{U_N}{\sqrt{3}} = 220 \text{ V} \quad (14)$$

U_f ... fazna napetost trifaznega sistema [V]

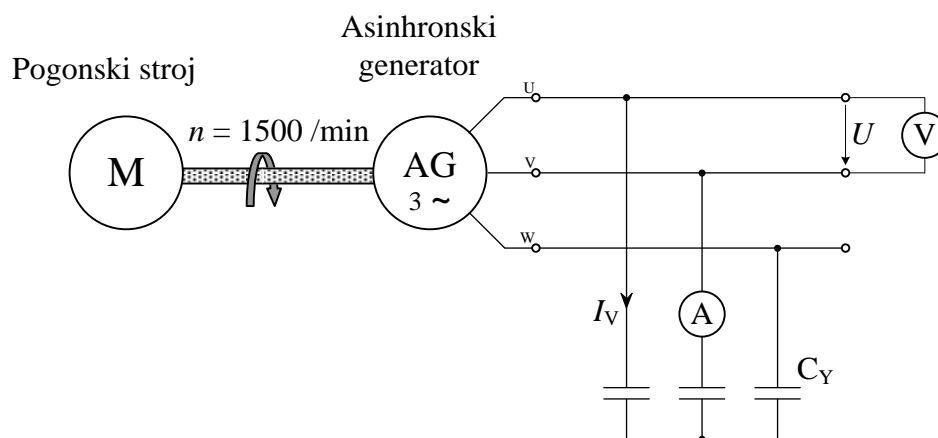
Pri enaki jalovi moči je kapacitivnost kondenzatorjev v vezavi zvezda trikrat večja kot v vezavi trikot. Na kondenzatorjih v vezavi trikot je $\sqrt{3}$ – krat večja napetost kot v vezavi zvezda.

Izvedba meritve:

ASG smo mehansko povezali s pogonskim motorjem in ga zavrteli s sinhronskim številom vrtljajev $n_s = 1500 \text{ vrt/min}$. Lastnost sinhronskega motorja, da se vrti sočasno s frekvenco priključene napetosti, nam zagotavlja konstantno število vrtljajev, ne glede na obremenitev ASG.

Statorske tuljave ASG smo povezali v vezavo zvezda. Na statorske priključne sponke smo priključili trifazno kapacitivnost, določeno po metodi za določanje kapacitivnosti kondenzatorjev za kompenzacijo jalove energije asinhronskega motorja (izraz 13).

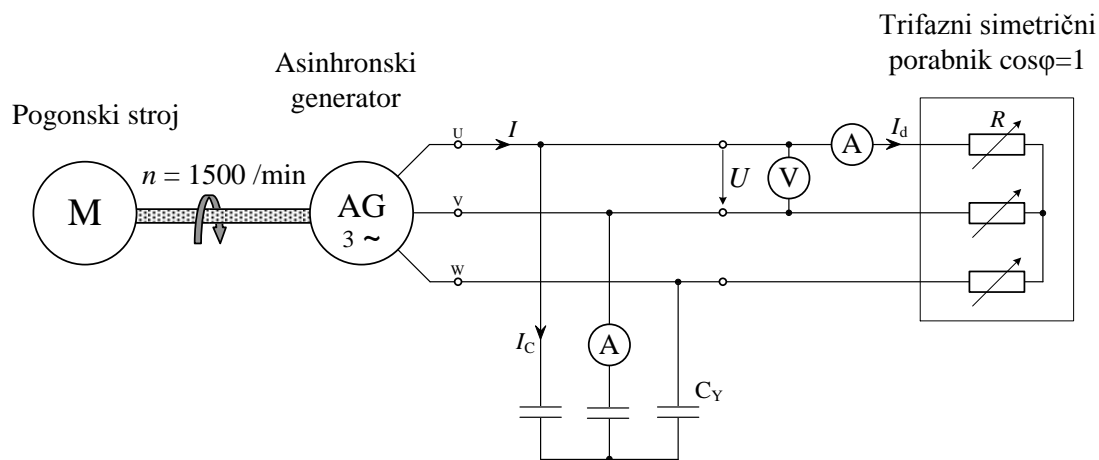
Izračunano kapacitivnost smo sestavili z vzporedno vezavo različnih kapacitivnosti. Skupno kapacitivnost vzporedno vezanih kondenzatorjev smo preverili z merilnikom kapacitivnosti. Vse električne povezave smo izvedli z laboratorijskimi priključnimi vodniki. Kondenzatorje smo povezali v vezavo zvezda in trifazno kapacitivno breme priključili na statorske sponke asinhronskega generatorja po vezavi (slika 3). Pri različnih kapacitivnostih kondenzatorjev smo izmerili napetost generatorja in vzbujalni tok.



Slika 3: Preizkus prostega teka asinhronskega generatorja v otočnem obratovanju (vir lasten)

3.1.2 Preizkus obremenitve ASG pri samostojnem obratovanju

Vzbujen ASG smo obremenili z delovnim tokom. To smo naredili tako, da smo vzporedno, na statorske sponke priključenim kondenzatorjem, priključili trifazni simetrični porabnik delovne moči ($\cos\varphi = 1$). Upornost bremena smo manjšali in generator obremenjevali z vedno večjim delovnim tokom. Merili smo vzbujalni tok skozi kondenzatorje, delovni tok bremena in napetost na sponkah generatorja. Vse meritve smo opravili pri sinhronskem številu vrtljajev $n_s = 1500 \text{ vrt/min}$.



Slika 4: Shema preizkusa obremenitve AG (vir lasten)

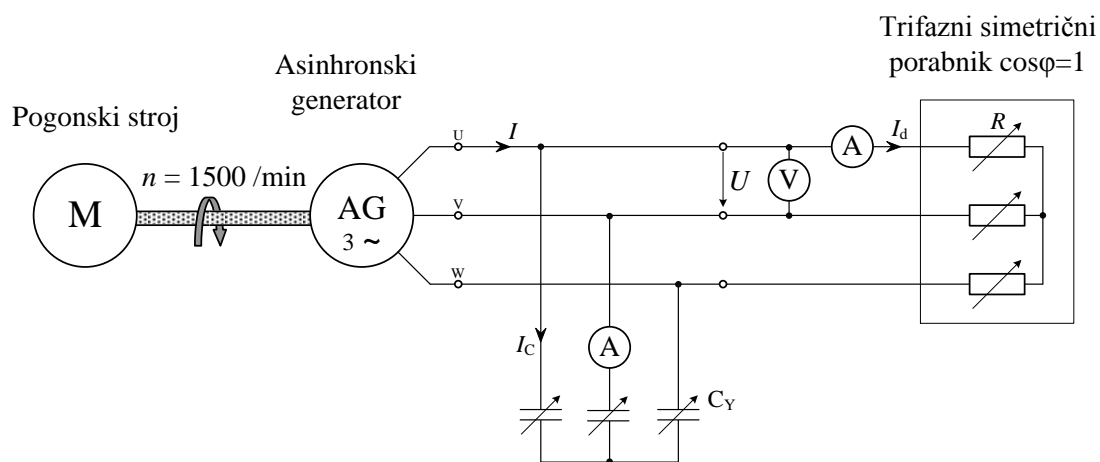
3.1.3 Preizkus obremenitve asinhronskega generatorja z regulirano napetostjo

Generator smo zavrteli, vzbudili s kondenzatorji in obremenili z delovnim tokom. Delovno obremenitev smo višali in regulirali napetost na sponkah generatorja tako, da je ostala konstantna. V preizkusu, ki smo ga predstavili v poglavju 3.1.2, smo videli, da se napetost manjša pri večanju delovne obremenitve generatorja. Pri preizkusu obremenitve z regulirano napetostjo smo konstantno napetost dosegli s spreminjanjem kapacitivnosti kondenzatorjev za vsako nastavljeno vrednost delovnega toka.

Pri delovni obremenitvi se padci napetosti v statorskih tuljavah povečajo tako, da se poveča razlika med indukcijo E in napetostjo U na sponkah stroja. S povečanjem kapacitivnosti kondenzatorjev dosežemo tolikšno povišanje inducirane napetosti, kljub

večjim padcem napetosti, da ostane napetost na sponkah generatorja konstantna. S spreminjanjem kapacitivnosti smo pri spreminjanju delovne obremenitve generatorja na njegovih sponkah vzdrževali konstantno napetost. Vsaki nastavljeni vrednosti delovnega toka bremena smo prilagodili kapacitivni vzbujačni tok tako, da je ostala napetost na sponkah generatorja konstantna.

Delovni tok I_d smo spreminjali od 0 A do vrednosti, pri kateri je skupni statorski tok dosegel nazivni tok navitja in je stroj postal preobremenjen.



Slika 5: Električna vezava preizkusa obremenitve pri regulirani napetosti (vir lasten)

3.1.4 Določanje stopnje kapacitivnosti za regulacijo napetosti

Velikost spremembe kapacitivnosti vzbujačnih kondenzatorjev smo določili po eksperimentalni poti. Generator smo zavrteli in vzbudili z ustrešno kapacitivnostjo ter ga obremenili. Ko je napetost padla izven tolerančnega področja ± 10 V smo določili kapacitivnost, ki jo moramo dodati, da napetost povišamo na začetno vrednost.

Pri meritvah napetosti in delovnega toka pri obremenitvi smo opazili, da se ob povečanju obremenitve, I_d pojavi padec napetosti. V tem poskusu smo pri dveh napetostih poskušali dodajati kapacitivno stopnjo, da smo napetost vrnili na začetno vrednost.

Generator smo vzbudili pri dveh napetostih: 315 V in 360 V. V obeh primerih smo

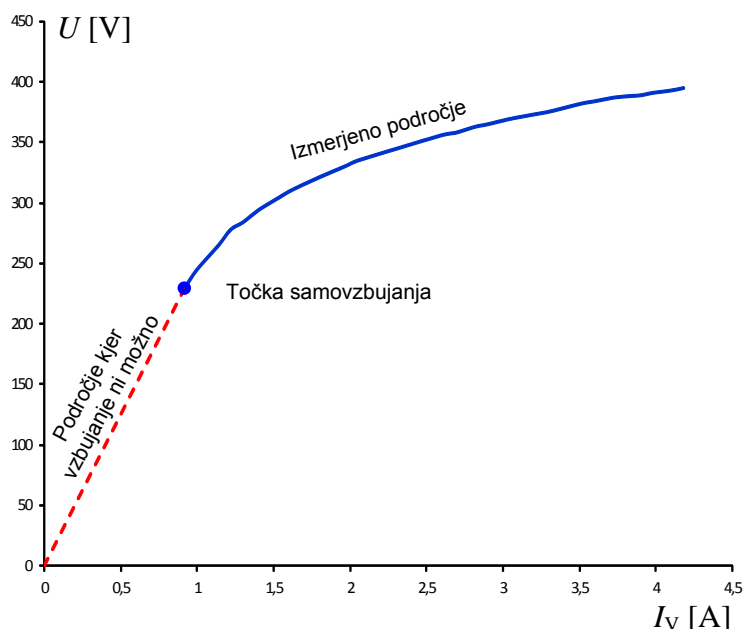
izhod obremenili toliko, da je napetost padla za 10 V. S kapacitivnostmi, ki smo jih imeli na voljo, smo poskušali povišati napetost na začetno vrednost, torej za 10 V navzgor.

3.2 Rezultati raziskovalnega dela naloge

3.2.1 Rezultati meritve preizkusa samovzbujanja generatorja

Tabela 1: Samovzbujanje (vir lasten)

C [μF]	U [V]	I_V [A]
60	395	4,18
59	393	4,1
57,5	391	3,98
56,5	389	3,9
55	388	3,8
54	387	3,72
62,5	384	3,6
61,5	382	3,51
50	376	3,32
49	374	3,24
47,5	371	3,11
46,5	369	3,03
45	365	2,9
44	363	2,82
42,5	358	2,69
41,5	356	2,6
35	335	2,05
34	331	1,98
32,5	324	1,85
31,5	319	1,76
30	310	1,61
29	304	1,53
27,5	294	1,4
26,5	284	1,3
25	278	1,22



Graf 4: Vzbujačna karakteristika ASG (vir lasten)

UI karakteristiko asinhronskega generatorja smo v otočnem obratovanju lahko izmerili samo od točke samovzbujanja dalje. Pri manjših napetostih, kjer samovzbujanje ni možno, smo predpostavili linearni potek UI karakteristike.

Generator se vzbudi pri dovolj veliki kapacitivnosti kondenzatorjev. Najnižja izmerjena napetost generatorja je bila 278 V pri kapacitivnem toku 1,22 A.

Z višanjem kapacitivnosti kondenzatorjev se je napetost generatorja višala po nelinearni UI karakteristiki statorskega navitja. Rezultati meritve kažejo, da je pri enakem vzbujalnem toku I_V , napetost na sponkah generatorja manjša kot na sponkah motorja. Pri generatorskem obratovanju je inducirana napetost E v statorskem navitju večja od napetosti U na sponkah generatorja. Pri motorskem obratovanju je inducirana napetost E manjša od priključene napetosti U . Razlika med inducirano E in napetostjo U na sponkah generatorja nastane zaradi padcev napetosti na upornosti statorskih tuljav. Padci napetosti so sorazmerni s statorskim vzbujalnim tokom I_V . Za enako napetost na sponkah pri generatorskem obratovanju mora teči v statorsko navitje večji vzbujalni tok kot pri motorskem obratovanju, kar lahko ponazorimo z naslednjim izrazom:

$$U_{\text{gen}} = U_{\text{mot}} \qquad I_{V\text{gen}} > I_{V\text{mot}}$$

Generator bo za enako napetost kot pri motorskem obratovanju obratoval višje na karakteristiki prostega teka oziroma bolj v zasičenju železnega jedra z magnetnim poljem.

Pri spreminjanju kapacitivnosti smo ugotovili, da lahko vzbujenemu generatorju zmanjšamo vzbujalni tok in napetost na nižjo vrednost od vzbujalnega toka in napetosti v točki samovzbujanja. Točka razmagnetenja vzbujenega generatorja je na UI karakteristiki nižja od točke samovzbujanja generatorja. Vzbujeni generator lahko obratuje tudi pri napetosti, ki je nekoliko manjša od napetosti samovzbujanja.

Zaradi nelinearnosti UI karakteristike generatorja in zaradi večjega vzbujalnega toka pri nazivni napetosti glede na motorsko obratovanje, se zmanjša obremenljivost⁵ generatorja. Generator je lahko trajno obremenjen z nazivno vrednostjo statorskega toka pri motorskem obratovanju. Vzbujalni tok generatorja pri nazivni napetosti 380 V je presegel 3,5 A, kar je le malo manj od nazivnega toka statorskega navitja v vezavi zvezda (3,7 A). Če bo ostal vzbujalni tok pri obremenitvi enak, bi lahko tekkel tolikšen delovni tok bremena, da bi bila vektorska vsota obeh tokov enaka nazivnemu toku generatorja.

⁵ V teoriji, ki smo jo pregledali, smo zasledili tudi izraz *obremenilnost*, vendar smo se odločili, da uporabljamo prvega.

Dopustno delovno obremenitev določimo s pomočjo izraza:

$$I_d = \sqrt{I_N^2 - I_C^2} = \sqrt{3,7^2 - 3,5^2} = 1,2 \text{ A} \quad (15)$$

Kar je relativno mali delovni tok bremena generatorja in pomeni malo delovno moč bremena, s katerim lahko obremenimo generator, ne da bi bil preobremenjen pri napetosti 380 V.

Vendar bo naslednji preizkus pokazal, da je naše sklepanje napačno, saj vzbujaški tok pri obremenitvi generatorja ne ostane enak temveč se poveča in je obremenljivost generatorja z delovnim tokom še manjša.

Rezultati meritev so nakazali, da bo uporabljeni asinhronski stroj lahko napajal samostojne porabnike samo pri manjši napetosti od nazivne napetosti pri motorskem obratovanju.

3.2.2 Rezultati preizkusa obremenitve ASG v samostojnem obratovanju

Z večanjem obremenitve oziroma delovne komponente toka je napetost generatorja padala. S padanjem napetosti se je manjšal tudi vzbujaški tok I_V in sicer bolj, kot smo višali delovni tok, zato se je manjšal tudi skupni tok, torej kljub vedno večji delovni moči, se je skupni tok generatorja manjšal. Pri večanju delovne moči se je ASG razbremenjeval. Rezultati meritve kažejo, da je pri delovni obremenitvi za enako napetost kot v prostem teku, potreben višji vzbujaški tok.

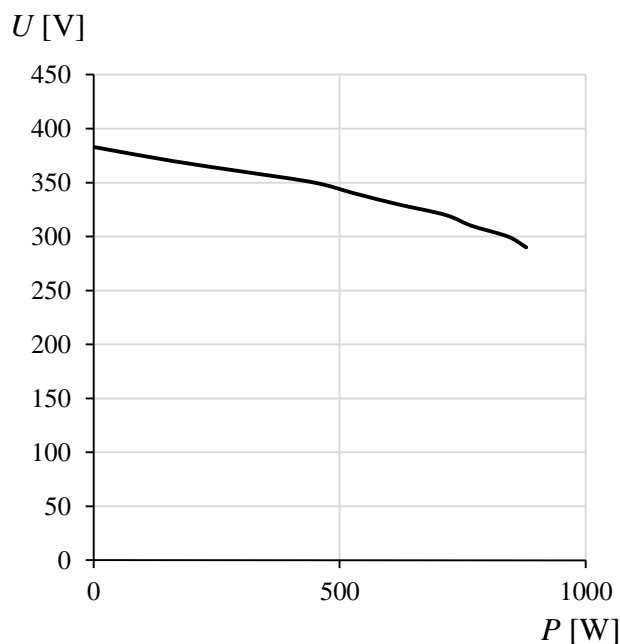
Delovno moč oddano porabnikom smo izračunali z izrazom za moč trifaznega porabnika:

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_d \quad (16)$$

P ... delovna moč [W]

Tabela 2: Rezultati preizkusa obremenitve
 ASG (vir lasten)

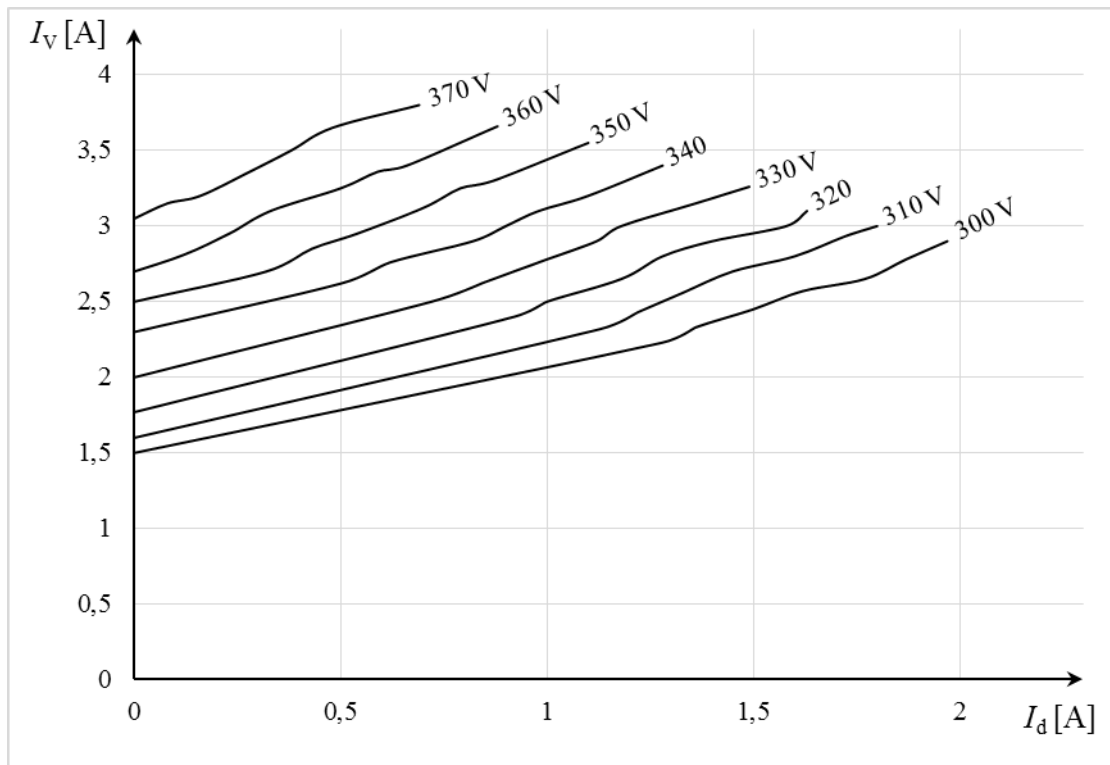
U [V]	I_d [A]	I_C [A]	I [A]	P [W]
383	0,00	3,50	3,50	0
370	0,25	3,35	3,43	160,2
360	0,49	3,23	3,35	305,5
350	0,74	3,10	3,24	448,6
340	0,90	3,00	3,18	530,0
330	1,08	2,87	3,12	617,3
320	1,29	2,75	3,10	715,0
310	1,43	2,65	3,08	767,8
300	1,62	2,55	3,08	841,8
290	1,75	2,42	3,07	879,0



Graf 5: Odvisnost napetosti od oddane delovne moči
 (vir lasten)

3.2.3 Rezultati preizkusa obremenitve generatorja pri regulirani napetosti

Naredili smo več obremenilnih preizkusov asinhronskega generatorja za različne vrednosti linijske trifazne napetosti. Meritve smo izvedli za napetosti od 300 V do 370 V, v koraku po 10 V. Rezultati meritev so podani v Prilogi 1. Grafična odvisnost vzbujalnega toka kondenzatorjev I_V od delovnega bremenskega toka I_d pri različnih vrednostih regulirane napetosti pa je predstavljena v grafu 6.



Graf 6: Odvisnost vzbujačnega toka I_V od delovne obremenitve I_d pri reguliranih napetostih (vir lasten)

Rezultati meritev kažejo, da z našim laboratorijskim strojem ne moremo napajati delovnih porabnikov z nazivno napetostjo pri motorskem obratovanju 380 V, saj pri tej napetosti že v neobremenjenem stanju teče tok le malo manjši od nazivnega. Ko generator obremenimo, se hkrati začneta višati obe komponenti: delovna in jalova. Rezultat je hitro naraščanje skupnega toka statorskega navitja in preobremenitev, ko je skupni tok večji od nazivnega toka generatorja. Na nazivno napetost vzbujen generator pri regulirani (krmiljeni) napetosti ima slabo obremenljivost. To pomeni, da zaradi temperaturne omejitve delovanja ne omogoča dovolj velike delovne obremenitve.

Odločili smo se, da raziskavo nadaljujemo z zahtevano nižjo napetostjo od nazivne. Z izrazom (16) smo izračunali delovno moč pri različnih vrednostih regulirane napetosti, da bi ugotovili, kako vpliva višina regulirane napetosti na obremenljivost generatorja. V tabeli 3 so navedene maksimalne delovne moči asinhronskega generatorja pri različnih reguliranih napetostih. Maksimalna moč je določena pri največji trajno dopustni obremenitvi oziroma nazivni obremenitvi statorskega navitja generatorja.

Tabela 3: Največja moč generatorja pri regulirani napetosti (vir lasten)

U [V]	P [W]
300	1050
310	980
320	910
330	850
340	755
350	665
360	540
370	320

Če napetost reguliramo na nižjo vrednost lahko ASG trajno obremenimo z večjo močjo. Delovna moč, s katero lahko generator trajno napaja nanj priključene porabnike, je večja pri manjši napetosti. Obravnavan laboratorijski ASG ne omogoča napajanja porabnikov pri nazivni napetosti z nazivno močjo motorja. Lahko pa napaja porabnike nazivne moči motorja pri napetostih manjših od 300 V. Naš stroj ni primeren za generatorsko obratovanje pri nazivni napetosti niskonapetostnih porabnikov (400 V).

Zaradi omejenega števila asinhronskih strojev primernih za pogon z laboratorijskim pogonskim sinhronskim motorjem smo se odločili, da bomo raziskali možnost izdelave regulatorja napetosti samostojno obratujočega ASG pri znižani napetosti. Izdelati želimo regulator z možnostjo nastavljanja napetosti generatorja. Ugotovitve tega poglavja kažejo, da bo imel generator pri višje nastavljeni napetosti manjšo moč.

Odločili smo se za stopenjsko spreminjanje kapacitivnosti trifaznih kondenzatorjev. Kapacitivnost za samovzbujanje obravnavanega generatorja na ustrezno napetost med 300 V in 380 V smo določili s preizkusom, ki je predstavljen v poglavju 3.1.1

Za izdelavo regulatorja potrebujemo podatek, kolikšna mora biti sprememba kapacitivnosti, da napetost stabiliziramo znotraj tolerančnih mej. Meje nihanja napetosti smo si sami določili na vrednost ± 10 V.

3.2.4 Rezultati določanja spremembe kapacitivnosti

Izmerjene vrednosti neobremenjenega generatorja po samovzbujanju:

$U = 315 \text{ V}$	$C_Y = 30 \text{ } \mu\text{F}$	$I_d = 0 \text{ A}$
---------------------	---------------------------------	---------------------

Generator smo obremenili s trifaznim delovnim porabnikom toliko, da je napetost padla za 10 V.

Izmerjene vrednosti:

$U = 305 \text{ V}$	$C = 30 \text{ } \mu\text{F}$	$I_d = 0,17 \text{ A}$
---------------------	-------------------------------	------------------------

Povišali smo kapacitivnost za 2,5 μF .

Izmerjene vrednosti:

$U = 319 \text{ V}$	$C = 32,5 \text{ } \mu\text{F}$	$I_d = 0,17 \text{ A}$
---------------------	---------------------------------	------------------------

Povečali smo obremenitev tako, da je napetost generatorja padla za 10 V.

Izmerjene vrednosti:

$U = 309 \text{ V}$	$C = 32,5 \text{ } \mu\text{F}$	$I_d = 0,3 \text{ A}$
---------------------	---------------------------------	-----------------------

Povišali smo kapacitivnost za 2,5 μF .

Izmerjene vrednosti:

$U = 314 \text{ V}$	$C = 35 \text{ } \mu\text{F}$	$I_d = 0,3 \text{ A}$
---------------------	-------------------------------	-----------------------

Enak postopek določanja stopnje kapacitivnosti smo ponovili pri napetosti generatorja 360 V. Z meritvami smo potrdili, da je kapacitivnost 2,5 μF kondenzatorjev vezanih v vezavi zvezda ustrezna sprememba kapacitivnosti (stopnja) za regulacijo napetosti našega generatorja. Sprememba napetosti ob dodatku kapacitivnosti 2,5 μF ni vedno enaka, vendar je v obsegu od 5 V do 10 V ter odvisna od obremenitve I_d .

3.3 Projektni del naloge

Na podlagi rezultatov pridobljenih iz raziskovalnega dela naloge smo se lotili izdelave regulatorja napetosti asinhronskega generatorja pri samostojnem obratovanju. Pri obratovanju generatorja smo predvideli konstantno število vrtljajev in pogon ASG, kakršen omogočajo regulirani pogonski stroji. V praksi bi lahko poganjali generator s konstantnimi vrtljaji, tako da bi ga mehansko povezali s traktorskim kardanom (k čemur cilja naša raziskava), saj ima večina sodobnih traktorskih kardanov regulirano število vrtljajev na delovni gredi. Za delovanje generatorja pri frekvenci 50 Hz ga moramo

zavrteti s sinhronskim številom vrtljajev, vendar število vrtljajev delovne gredi traktorja ni usklajeno s sinhronskim številom vrtljajev ASG. Vrtljaje pogonske gredi tako lahko spremenimo z reduktorjem oziroma z jermenskim prenosom preko jermenic ustreznih premerov in tako se generator vrti s sinhronskim številom vrtljajev.

Mi želimo izdelati regulator, ki ga lahko uporabnik priključi na statorske sponke vrtečega generatorja in obremeni s svojimi električnimi porabniki. Naš regulator bo torej reguliral napetost. Pri konstantnem številu vrtljajev je odstopanje frekvence napetosti generatorja v samostojnem obratovanju le nekaj odstotkov. Ker gre za mala odstopanja od frekvence 50 Hz, je v našem projektu ne želimo regulirati. Predpostavljamo, da delovanje večine enostavnih električnih porabnikov ni odvisno od zelo natančne frekvence napajalne napetosti.

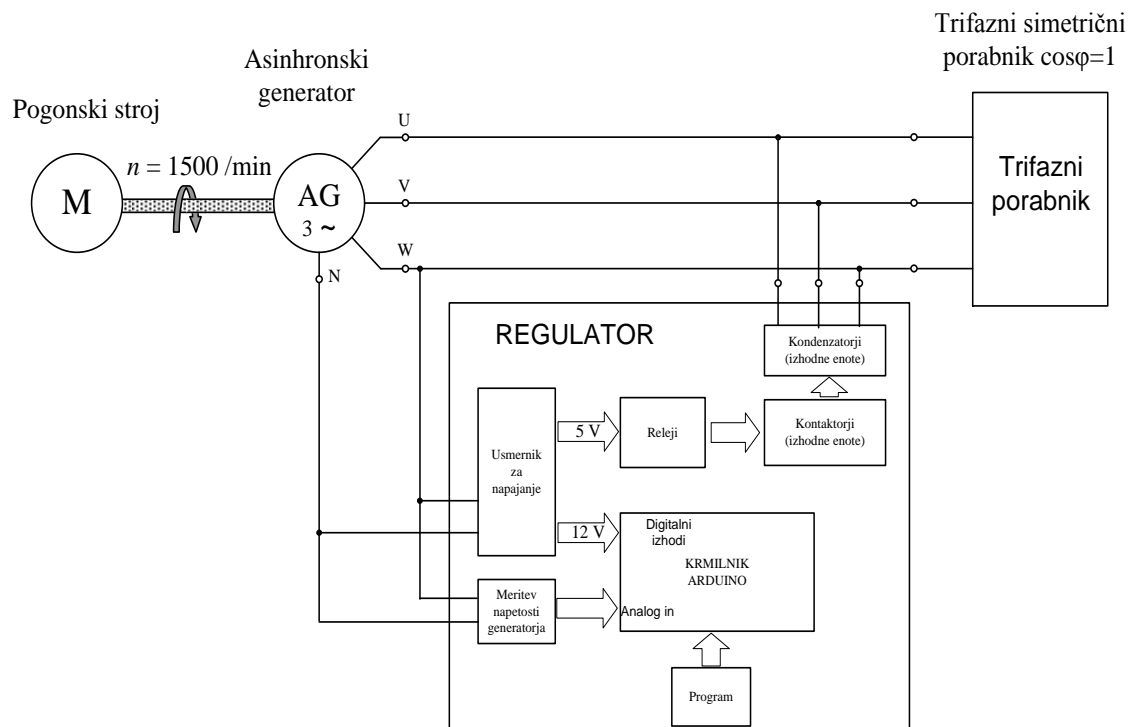
Za generator smo uporabili laboratorijski asinhronski motor, na katerem smo opravljali večino raziskovalnega dela naloge.

Kapacitivnosti smo povezali v vezavo trikot. V trikotni vezavi je za enak vzbujalni tok potrebna trikrat manjša kapacitivnost kondenzatorjev kot v vezavi zvezda.

3.3.1 Regulacijski sistem in njegove komponente

Kot smo že zapisali, je potrebno, glede na izmerjeno izhodno napetost generatorja, prilagajati kapacitivnost. To bi bilo prepočasi početi ročno, zato je bilo potrebno spreminjanje kapacitivnosti avtomatizirati. Možnosti regulacije so lahko različne. Izvedli smo avtomatsko meritev napetosti, to informacijo obdelali in nato vplivali na vklop oz. izklop kapacitivnosti. Odločili smo se, da bomo uporabili mikrokrmilniško ploščico Arduino, saj je cenovno ugodna in je enostavna za uporabo in programiranje. Regulacijski sistem, ki smo ga razvili je prikazan na sliki 6 in vsebuje naslednje komponente:

- Senzorji: Meritve napetosti generatorja (transformator, usmerniško vezje)
- Krmilnik: Obdelave vhodnih podatkov
- Izvršilni členi (aktuatorja): Releji in kontaktorji za spreminjanje kapacitivnosti
- Kondenzatorji
- Napajalne enote



Slika 6: Blok shema regulacijskega sistema (vir lasten)

3.3.2 Meritev napetosti generatorja

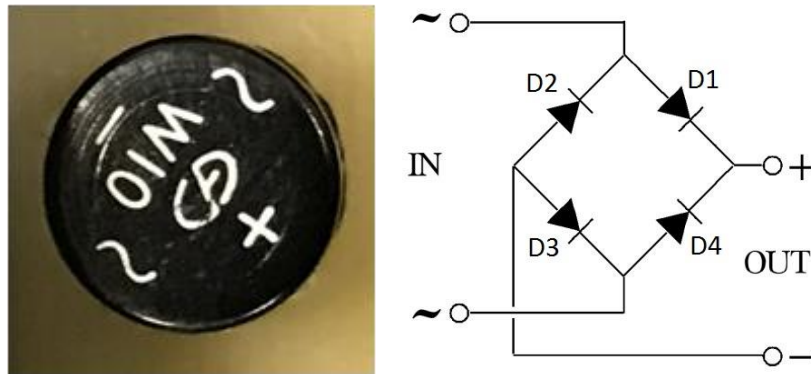
Napetost generatorja bomo transformirali in preko usmerniškega vezja preoblikovali na ustrezno enosmerno napetost primerno za analogni vhod Arduina, saj generator proizvaja izmenično sinusno napetost, Arduino pa deluje na osnovi petih voltov enosmerne napetosti in ga napajamo z enosmerno napetostjo med 6 in 20 V. Na analogne ali digitalne vhode lahko priključimo napetost največ 5 V.

Najprej smo izmenično napetost generatorja zmanjšali s transformatorjem, ki je električni stroj, ki lahko na podlagi elektromagnetne indukcije zmanjša ali pa poveča napetost. Običajno je sestavljen iz dveh tuljav; primarne in sekundarne. Primarna je tista, ki jo priključimo na izvor izmenične napetosti (naš generator), sekundarna pa tista, na katero priključimo analogni vhod Arduina.

Uporabili smo transformator s podatki:

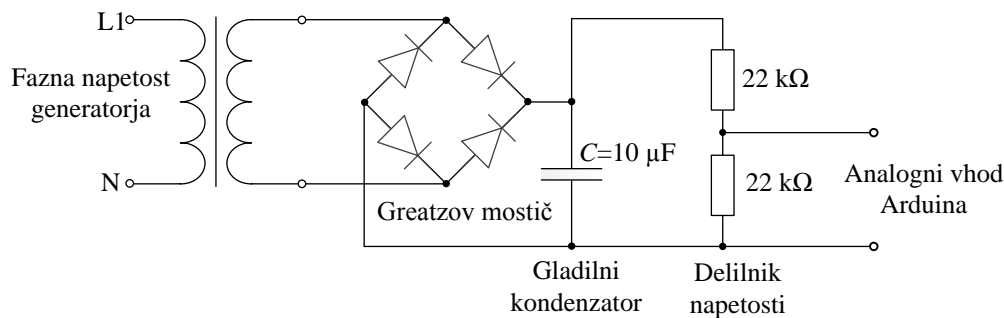
- $U_{1N} = 230 \text{ V}$
- $U_{2N} = 4 \text{ V}$
- $I_{2N} = 750 \text{ mA}$

Transformator nam bo napetost generatorja, ki bo najpogosteje manjša od 230 V, zmanjšal na območje od 0 do 4 V. Sedaj je potrebno izmenično sinusno napetost spremeniti oz. preoblikovati v enosmerno. To preprosto naredimo z mostičnim vezjem štirih diod, ki ga imenujemo Greatzov spoj (slika 7), ki ima 4 priključke (AC, AC, +, -). Priključka, kjer se stikata anodi diod predstavljata sponko za minus, kjer pa se stikata katodi, je sponka za plus.



Slika 7: Greatzov spoj, slika in shema (vir lasten)

Na ostala dva priključka priključimo izmenično napetost. Greatzov spoj deluje tako, da v času pozitivne polperiode prevajata diodi 1 in 3, v času negativne polperiode pa diodi 2 in 4. To pomeni, da dejansko “obrne” oz. prenese negativne polperiode izmeničnega signala čez časovno premico v grafu in tako dobimo med sponkama + in - enosmerno napetost, ki pa še ni tista, ki jo želimo. To napetost je potrebno samo še zgladiti, to pa naredimo tako, da vzporedno na izhod povežemo kondenzator. Z delilnikom napetosti smo napetost prilagodili na analogni vhod Arduina. Izhodna enosmerna napetost je sorazmerna z merjeno izmenično napetostjo generatorja in je primerna za priklop na enega od analognih vhodov Arduina. Tako mikrokrmilnik Arduino dobi pravo informacijo o velikosti izmenične napetosti generatorja.



Slika 8: Shema merilnega usmernika (vir lasten)

3.3.3 Krmilnik Arduino

Arduino je mikrokrmilnik, zasnovan tako, da bi bil postopek z uporabo elektronike v multidisciplinarnih projektih, čimbolj dostopen. Strojno opremo krmilnika sestavljajo: odprtokodna oblika plošče in 8-bitni mikrokontroler Atmel AVR ali 32-bitni Atmel ARM. Programska oprema je sestavljena iz standardnega programskega jezika, prevajalnika in zagonnega nalagalnika, ki se izvaja na mikrokrmilniku. Krmilnik predstavlja računalnik v malem, saj ko nanj naložimo program, deluje povsem samostojno in ni nujno povezan z računalnikom. Preko USB lahko nalagamo lastno programsko opremo, poleg tega pa se preko USB vrat tudi napaja, tako da ne potrebujemo dodatnih kablov.

Na njega lahko priklopimo različne senzorje za temperaturo, vlago, merjenje razdalj, releje za krmiljenje naprav ... (<https://zmaga.com/content.php?id=4394>, 17. 1. 2018)

Arduino Uno, ki smo ga uporabili v našem primeru, je mikrokrmilniška plošča z osnovo na ATmega328P. Ima 14 digitalnih vhodno/izhodnih priključkov (6 jih lahko uporabimo kot PWM izhode), 6 analognih vhodov, 16 MHz kvarčnih kristalov, USB priključek, priključek za napajanje, glavo ICSP in gumb za ponastavitev. Vsebuje vse, kar potrebuje mikrokrmilnik in se priključi preko USB kabla na računalnik ali pa dobiva moč od AC-DC adapterja ali baterije. ((<https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>, 18. 1. 2018)



Slika 9: Arduino Uno (<https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>)

3.3.4 Programski del (logika krmiljenja)

Na analogni vhod (A5) imamo priključeno napetost iz merilnega vezja. Vedeti moramo, da gre za analognu vrednost in to vrsto informacije vsak mikroprocesor digitalizira z analogno/digitalno (A/D) pretvorbo. Arduino ima 10 bitno A/D pretvorbo in frekvenco vzorčenja (sampling rate) 10 kS/s. Frekvenca vzorčenja torej pomeni, da v eni sekundi Arduino vzame 10.000 vzorcev analogne vrednosti, ki jim mora določiti vrednost.

Ker je pretvorba 10 bitna pomeni, da ($n = 10$) lahko vhodni signal zajema vrednosti med 0 in 1023 ($2^n = 1024$ ← število kombinacij). Eno število oz. kvant znaša torej $5\text{ V}/1023 = 4,8876\text{ mV}$. V praksi to pomeni, da bo pri petih voltih digitalna vrednost 1032, pri 0 V bo njena vrednost 0, pri ostalih napetostih pa bo vrednost odvisna od velikosti napetosti (vrednost = $U/4,8876\text{ mV}$). Tako poteka obdelava informacije o naši napetosti.

Zamisliti smo si morali koncept oz. algoritem, po katerem bomo regulirali kapacitivnost. Prišli smo do ideje, da bi to počeli po enakem zaporedju kot je sestavljen dvojiški številski sistem. Ta sistem je v elektrotehnik in v računalništvu zelo uporaben, saj ima samo dve stanji (0 ali 1), kar je zelo uporabno, saj ima tudi električna napetost najpogosteje 2 stanji (napetost je/napetosti ni) in tudi kontaktorji, ki jih bomo uporabili

za vklop kondenzatorjev, imajo dve stanji (je vklopljen/ni vklopljen).

Določili smo, da bomo za regulacijo imeli 5 skupin trifazne kapacitivnosti. 5 skupin pomeni v dvojiškem sistemu 5 bitov in najvišje število, ki ga lahko s temi petimi biti zapišemo, je 31. Torej bomo imeli 32 stopenj. Stopnje kapacitivnosti so takšne, da se kapacitivnost med vsako stopnjo enako spremeni. Kapacitivnost vsake naslednje skupine je torej dvakrat večja od prejšnje. Tako bo imela, pri višanju kapacitivnosti, vsaka stopnja za kapacitivnost najmanjše skupine, večjo kapacitivnost. V poglavju 3.1.4 določena sprememba kapacitivnosti znaša za kondenzatorje v vezavi zvezda $2,5 \mu\text{F}$. Ker bomo zaradi priporočila (Avčin, Jereb, 1983) vezali kondenzatorje v vezavo trikot, bo kapacitivnost najmanjše stopnje trikrat manjša. Kapacitivnosti kondenzatorjev bodo znašale:

1. skupina: $C_1 = 1 \mu\text{F}$
2. skupina: $C_2 = 2,5 \mu\text{F}$
3. skupina: $C_3 = 5 \mu\text{F}$
4. skupina: $C_4 = 10 \mu\text{F}$
5. skupina: $C_5 = 20 \mu\text{F}$

Skladno z dvojiškim sistemom bodo vezane skupine kondenzatorjev tvorile 32 stopenj kapacitivnosti, ki so podane v tabeli v Prilogi 2 .

Zaradi ugotovitev v raziskovalnem delu naloge (Poglavje 3.1.3) smo se odločili, da bomo napetost generatorja regulirali na manjšo vrednost od nazivne napetosti generatorja, na željeno vrednost 320 V. Merilni sistem je priključen med fazno in nevtralnno sponko generatorja, torej meri fazno napetost, ki je $\sqrt{3}$ krat manjša od linijske in znaša po enačbi 13:

$$U_f = \frac{U}{\sqrt{3}} = 185 \text{ V}$$

Željeno vrednost napetosti smo določili na 185 V fazne napetosti.

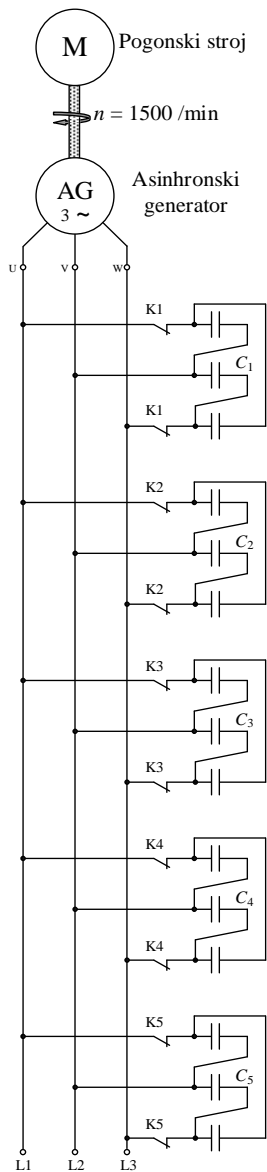
Arduino nam meri napetost generatorja in če zazna, da napetost pade za več ko 10 V, torej znaša manj kot 170 V ($U = 295 \text{ V}$), mora program reagirati tako, da vklopi dodatne stopnje kapacitivnosti, da napetost spet pride v normalno območje, ki znaša od 170 V do 190 V. Če napetost preseže 190 V ($U = 330 \text{ V}$), mora Arduino izklopiti odvečne stopnje, da napetost pade v željeno območje.

Povečevanje obremenitve generatorja pomeni, da bo padec napetosti v generatorju vedno večji, procesor pa bo večal skupno kapacitivnost tako, da bo spreminjal kombinacijo stanj na digitalnih izhodih in bo napetost ostala znotraj naših meja. Isto velja, če obremenitev manjšamo, le krmilnik pri tem kapacitivnost manjša tako, da manjša številko stopnje.

V programu (programski koda je v Prilogi 3) je bilo potrebno najti nekaj rešitev in tako smo si zamislili, da bi preklapljanje po dvojiškem sistemu delovalo kot neke vrste števec. To je ena izmed enostavnejših možnosti. Števec lahko šteje od 0 do 31, kolikor je stopenj. Če bo izmerjena napetost nad našim območjem, bo števec štel od trenutne stopnje navzdol (to pomeni, da bo na izhodu manjšal kapacitivnost) in ko bo napetost spet v tolerančnem področju, se bo števec na novi stopnji zaustavil. Če bo izmerjena napetost pod območjem, bo štel navzgor (večja kapacitivnost) in bo, pri neki vrednosti, ko bo napetost ustrezna, ustavil štetje.

Števec se ustavi vedno, kadar je napetost ustrezna, ustavi pa se tudi pri številih 0 in 31, saj je 31 maksimalno število stopenj. Za prej opisan sistem služita if stavka številka 1 in 2 v programu. Znotraj teh dveh stavkov je še eden if stavek, da se meritev napetosti še enkrat izvede, preden se izvede štetje. Program nato dekodira števila z if stavki tako, da jih pretvori v binarni zapis. Temu služijo spremenljivke a, b, c, d in e v programu, ki ponazarjajo naših 5 skupin kapacitivnosti. Spremenljivka je v stanju `high` takrat, ko je v binarnem zapisu tega števila bit te stopnje 1. Na koncu programa se izvede zapis na izhode. Tista spremenljivka (od prej razloženih), ki je v stanju `high`, zapiše na svoj izhod stanje `low`, drugače pa `high`. Izhodi so spremenljivke A, B, C, D in E. Na začetku programa se izvede tudi izračun povprečne vrednosti napetosti, saj se zaradi motenj lahko zgodi, da napetost usmernika zaniha in s tem sistem ne dobi pravilne informacije o velikosti napetosti. S spremenljivko `stevilo` lahko izberemo, koliko meritev se izvede, s spremenljivko `cas` pa kolikšna je časovna razdalja med dvema meritvama.

3.3.5 Izvršilni členi: uporaba relejev in kontaktorjev (aktuatorji)



Slika 10: Vezava kondenzatorjev v trikotu s kontaktorji (vir lasten)

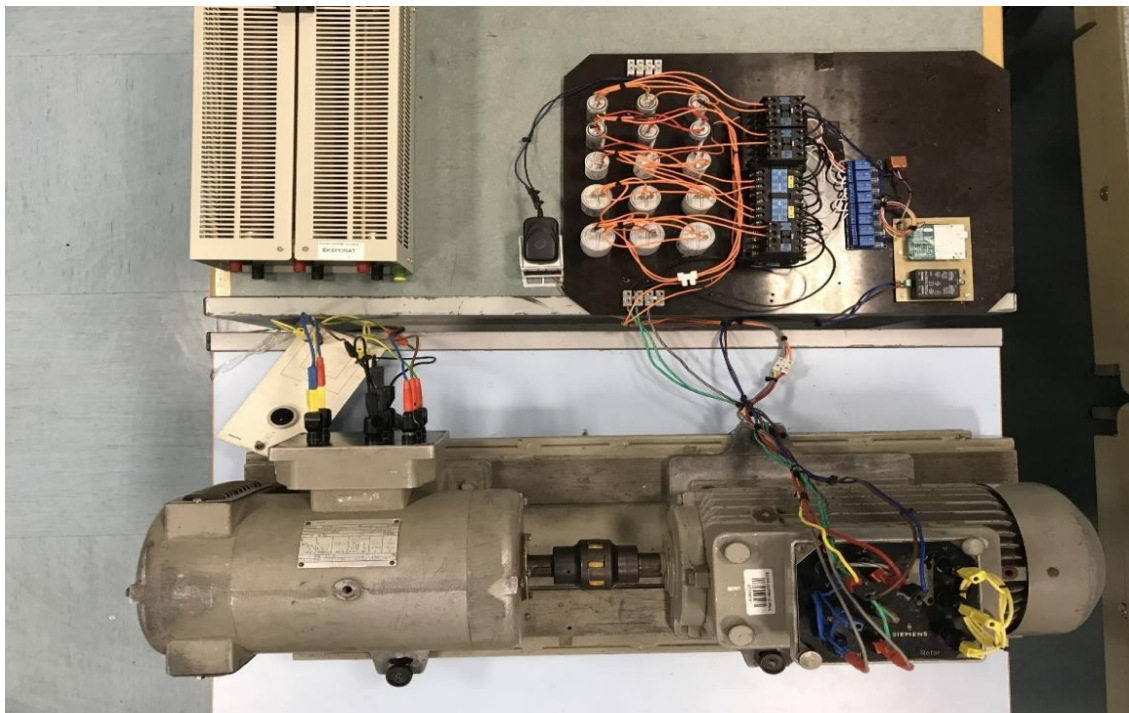
Zgoraj je opisano merilno vezje naše regulacije, najpomembneje je, s čim vklopljamo in izklopljamo kondenzatorje. Pini oz. nogice na Arduinu, ki jih uporabimo kot digitalne izhode, nam lahko zagotovijo stanje 5 V (HIGH) ali 0 V (LOW) in so tokovno omejeni nekje na 40 mA. Zato je potrebno dodati še izhodno stopnjo večje moči, ki bo posredno krmilila kondenzatorje. Večinoma se v takšnih primerih lahko uporabijo releji, tranzistorji, triaki. Mi smo se odločili za releje. Rele deluje tako, da ob prisotnosti napetosti tuljavica zagotovi magnetno polje, ki pritegne kotvo releja in s tem sklene ali pa razklene kontakt releja. Imajo dve vrsti kontaktov; delovne ali pa mirovne. Delovni so sklenjeni, ko je na tuljavici napetost, mirovni pa ko napetosti ni. Uporabili smo relejni modul z osmimi releji, ki je že izdelan tako, da je kompatibilen z Arduinom. Potrebuje napajanje (V_{CC} in GND), za vklop relejev pa ima 8 vhodov, ki jih povežemo na digitalne pine Arduina. Ko je na vhodu, za katerikoli rele, logična ničla (stanje low), se rele vklopi. Kondenzatorji morajo biti zvezani na mirovne kontakte, da so pri zagonu generatorja kapacitivnosti vklopljene in se generator lahko vzbudi.

V prvem preizkusu smo imeli na izhodu samo relejni modul. Zgodilo se je, da smo relejni modul uničili zaradi prevelikega toka, čeprav bi modul moral ta tok zdržati. Zato smo morali poleg relejev na izhod dodati še kontaktorje, ki delujejo po enakem principu kot releji, vendar so primernejši za večje tokove in moči.

Kontaktorji, ki smo jih uporabili, potrebujejo napajanje 230 V_{AC} . Zvezali smo jih na mirovne kontakte relejev. Tako smo dobili neke vrste verigo za vklop oz. izklop kondenzatorjev.

Ta veriga deluje tako, da ko bo na vhod releja prišlo stanje low, se bo mirovni kontakt releja razklenil in posledično se bo izklopil tudi kontaktor in skupina kondenzatorjev bo vklopljena.

Če pa bo na vhod prišlo stanje high, bo rele izklopljen, zaradi sklenjenih mirovnih kontaktov bo kontaktor vklopljen in skupina kapacitivnosti bo izklopljena. Kondenzatorji so sedaj povezani na mirovne kontakte kontaktorja, kar omogoča samovzbujanje pri zagonu.



Slika 11: Slika našega izdelka z vsemi izvršilnimi členi (vir lasten)

3.3.6 Samostojnost obratovanja

Samostojno obratovanje razumemo kot zagon brez pomoči zunanjih virov napetosti.

Samostojnost (avtonomnost) obratovanja generatorja smo zagotovili:

- Z mirovnimi kontakti kontaktorjev, ki zagotovijo najvišjo, 31. stopnjo kapacitivnosti kondenzatorjev v breznapetostnem stanju. V trenutku zagona z

višanjem števila vrtljajev s pogonskim strojem je na statorske sponke priključena največja kapacitivnost, saj so zaradi mirovnih kontaktov kontaktorjev vzporedno priključene vse trifazne kapacitivne baterije. V takšnem stanju se generator vzbudi na napetost, ki je mnogo višja od nazivne.

- S priklopom krmilnih sponk kontaktorjev na napetost generatorja. Potem ko se generator samovzbudi, lahko krmilnik Arduino preko relejev vzbudi kontaktorje in začne manjšati stopnje kapacitivnosti ter zmanjša napetost generatorja.
- Z napajanjem krmilnika in relejev z enosmerno napetostjo preko usmernika priključenega na generator.

V pravem samostojnem obratovanju brez zunanjih virov napetosti lahko napajanje krmilnika z enosmerno napetostjo zagotovi samo ASG. Zato smo celoten regulator napetosti napajali z napetostjo samega generatorja. Za napajanje kontaktorjev in usmernika smo uporabili fazno napetost ASG. Generator sam napaja in omogoča delovanje svojega regulatorja.

Krmilnik Arduino, releji in kontaktorji so tako začeli delovati šele, ko se je generator samovzbudil in jih začel oskrbovati z napetostjo.

Tako smo dosegli popolnoma avtonomen zagon in samovzbujanje celotnega sistema asinhronskega agregata.

3.3.7 Preizkus delovanja agregata

Delovanje samostojno obratujočega asinhronskega generatorja z regulatorjem napetosti smo poizkušali izboljšati z večkratnim preizkušanjem delovanja in izboljševanjem sestave regulacijskega sistema in spreminjanjem krmilnega programa.

Delovanje agregata smo ocenjevali z rezultati naslednjih preizkusov:

- Samovzbujanje

Preizkus samovzbujanja smo opravili pri vsakem zagonu agregata. Izvedli smo ga s priklopom pogonskega stroja na napetost tako, da je zagnal naš generator na sinhronsko število vrtljajev. Pri tem smo opazovali spreminjanje napetosti in preklapljanje števila stopenj.

- Obremenitev z višanjem delovne obremenitve

Vzbujeni generator smo obremenili z delovnim porabnikom in opazovali spreminjanje napetosti na njegovih sponkah ter preklapljanje stopenj kapacitivnosti, ko se je napetost toliko spremenila, da je bila njena vrednost izven tolerančnega področja. Merili smo tudi velikost delovnega toka.

- Stopnična obremenitev z delovnim tokom

Stopnično obremenitev smo izvedli tako, da smo s stikalom priključili trifazno breme na sponke vzbujenega generatorja. Upornost bremena smo nastavili na vrednost, da je po vklopu stekel delovni tok 1,5A.

- Stopnična razbremenitev z delovnim tokom

Stopnično razbremenitev smo izvedli tako, da smo s stikalom izklopili bremenske upore, ki so generator obremenjevali z delovnim tokom 1,5 A. Pri tem smo merili napetost generatorja in številko vključene stopnje kapacitivnosti.

- Stopnična obremenitev z ohmsko induktivnim porabnikom

Preizkus smo opravili tako, da smo s tripolnim stikalom na sponke asinhronskega generatorja priključili trifazni asinhronski motor. Pri regulirani napetosti 310 V je, po končanem zagonu, motor obremenil ASG s tokom $I = 1,2$ A pri faktorju delavnosti $\cos\varphi = 0,16$.

- Enofazna obremenitev

Opravili smo tudi preizkus pri enofazni obremenitvi, kjer smo hoteli ugotoviti, kako povečanje obremenitve ene faze vpliva na fazni napetosti neobremenjenih faz generatorja. Z delovnim tokom 1,5 A smo obremenili samo eno fazo ASG in merili vse tri fazne napetosti med priključnimi sponkami in nevtralno točko statorskih navitij.

3.4 Rezultati projektne delo naloge

3.4.1 Delovanje agregata

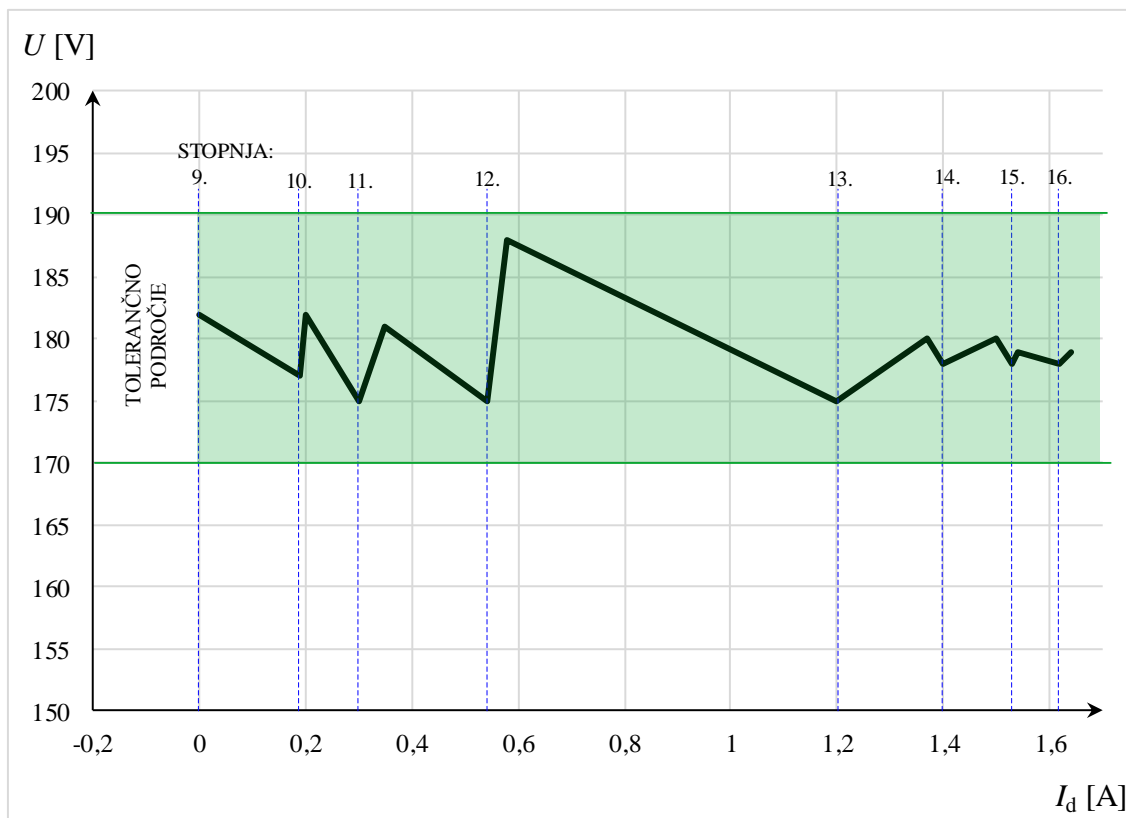
Z večkratnim preizkušanjem delovanja in izboljševanjem sestave regulacijskega sistema in spreminjanjem krmilnega programa, smo poizkušali izboljšati delovanje obratujočega asinhronskega generatorja z regulatorjem napetosti, ki smo ga izdelali. Delovanje agregata smo ocenjevali z rezultati naslednjih preizkusov:

- Samovzbujanje agregata

Preizkus samovzbujanja agregata smo opravili pri vsakem zagonu oziroma višanju števila vrtljajev. Agregat se je pri vseh poskusih uspešno vzbudil. Razlog je dovolj visoka skupna kapacitivnost kondenzatorjev 31. stopnje v trenutku zagona.

- Obremenitev z višanjem delovne obremenitve

Vzbujeni generator smo obremenili z delovnim porabnikom in opazovali spreminjanje napetosti na njegovih sponkah ter preklapljanje stopenj kapacitivnosti.



Graf 7: Preizkus delovanja regulatorja (vir lasten)

Rezultati meritve (Graf 7) kažejo, da napetost ostane znotraj tolerančnega področja, kljub večanju delovnega toka. Pri vsakem vklopu naslednje stopnje kapacitivnosti se napetost poveča, z višanjem obremenitve pa spet pada do naslednjega vklopa.

- Stopnična obremenitev z delovnim tokom

Preizkus stopnične obremenitve samovzbudnega asinhronskega generatorja je pokazal dobro odzivnost regulatorja. Napetost generatorja se je pri stopnični obremenitvi za kratek čas znižala pod napetost tolerančnega območja, vendar se je zaradi odziva regulatorja v kratkem času vrnila v tolerančno območje.

- Stopnična razbremenitev z delovnim tokom

Napetost generatorja se je pri stopnični razbremenitvi za kratek čas povišala preko napetosti tolerančnega območja in se zaradi odziva regulatorja v kratkem času znižala v tolerančno območje.

- Stopnična obremenitev z ohmsko induktivnim porabnikom

Velik zagonski tok je po priklopu asinhronskega motorja na sponke ASG povzročil velik padec napetosti generatorja. Vendar je naš regulator pravočasno povečal kapacitivnost in stabiliziral napetost generatorja na regulirano vrednost. Neobremenjen asinhronski motor je kot RL porabnik obremenil ASG z delovno močjo 107 W in jalovo močjo 635 var. Ker je skupna kapacitivnost regulacijskih kondenzatorjev dovolj velika je pri obremenitvi generatorja z asinhronskim motorjem regulator napajal s kapacitivno močjo kondenzatorjev ASG in breme – asinhronski motor. ASG pa je zagotovil bremenu delovno moč.

- Enofazna obremenitev

Opravili smo tudi preizkus pri enofazni obremenitvi, kjer smo hoteli ugotoviti, kako povečanje obremenitve ene faze vpliva na fazne napetosti generatorja. Obremenili smo samo eno fazo ASG z ohmskim porabnikom in merili vse tri fazne napetosti med priključnimi sponkami in nevtralno točko statorskih navitij. Napetost obremenjene faze se je znižala glede na fazni napetosti neobremenjenih faz.

Pričakovali smo večje razlike med faznimi napetostmi obremenjene faze in neobremenjenih faz, vendar se je izkazalo, da so spremembe še vedno v območju tolerance (± 10 V).

4 RAZPRAVA

Izdelali smo regulator za regulacijo napetosti ASG.

Uvodoma izražena želja je bila možnost uporabe regulatorja na domačih asinhronskih motorjih gnanih z domačimi pogoni (traktorji), ki bi omogočili enostavno predelavo motorjev v ASG in bi bili sposobni napajati električne porabnike pri stabilnih napetostnih pogojih (omejeno nihanje napetosti).

Izdelan regulator napetosti asinhronskega generatorja je podrejen kompromisom, ki smo jih sprejeli zaradi specifičnih lastnosti laboratorijskega stroja, ki smo ga uporabili.

Raziskovalno delo smo začeli z električnimi meritvami delovanja ASG. Meritve smo opravljali z merilnimi instrumenti slabših razredov točnosti. Ker je v nizkonapetostnem omrežju dopuščeno relativno veliko nihanje električne napetosti (± 10 V), smo tudi pri izvedbi električnih meritev dopustili merilne pogoške. Menimo, da merilna točnost izvedenih meritev ni bistveno vplivala na rezultate raziskave.

Določili smo napetostne meje samostojnega generatorskega obratovanja obravnavanega stroja:

- Spodnja napetostna meja obratovanja je določena s sposobnostjo samovzbujanja. V poglavju 3.1.1 smo ugotovili, da se ASG ni sposoben vzbuditi pod mejno napetost v točki samovzbujanja na *UI* karakteristiki (Graf 4). Pod to napetostjo generator ni sposoben generirati napetosti v samostojnem obratovanju.

V naši raziskavi smo preizkusili še drug asinhronski stroj, ki je imel nazivno napetost $\Delta 380$ V. Že pri preizkusu samovzbujanja smo ugotovili, da ima ta stroj v vezavi zvezda previsoko napetost v točki samovzbujanja, saj je večja od 550 V. To pomeni, da ta stroj ne more obratovati generatorsko pri napetostih manjših od 550 V, kar odstopa od standardne napetosti NN omrežja 400 V. Zato tega stroja nismo podrobneje raziskali.

- Zgornja napetostna meja je določena z obremenljivostjo stroja oziroma njegovim nazivnim tokom. Pri napetostih, ko teče vzbujalni tok enake ali večje vrednosti od nazivnega toka navitja stroja, generator ne more več napajati porabnikov z delovnim tokom, kajti skupni tok bi bil večji od nazivnega.

Obravnavan asinhronski stroj ne more oddajati delovne moči porabnikom pri nazivni napetosti električnega omrežja 400 V. Razlogi so naslednji:

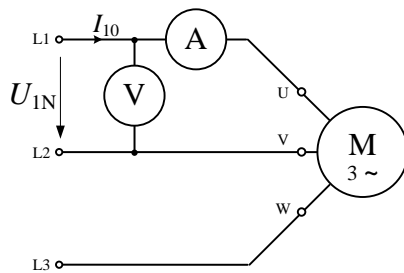
- Nazivna napetost statorskih tuljav povezanih v vezavi zvezda je 380 V, kar je manj od zahtevanih 400 V.
- Zaradi padcev napetosti v statorskih tuljavah stroja je pri motorskem obratovanju napetost večja od inducirane napetosti. Pri generatorskem obratovanju se smer padcev spremeni in je napetost na sponkah manjša od inducirane napetosti. Zaradi tega je za doseganje enake napetosti na sponkah pri generatorskem obratovanju potrebna večja indukcija kot pri motorskem obratovanju.
- Zaradi večje indukcije potrebne pri generatorskem obratovanju stroja je njegovo železno jedro zasičeno z magnetnim pretokom in delovna točka na nelinearni UI karakteristiki leži visoko nad kolenom. Zato je vzbujaški tok generatorja pri 400 V mnogo večji kot pri 380 V in še večji od toka prostega teka pri motorskem obratovanju. Pri napetosti 400 V je vzbujaški tok našega generatorja že večji od nazivnega toka stroja. Pri napetosti 400 V obravnavani generator ne sme trajno obratovati zaradi prevelikih izgub in pregrevanja stroja.

S tem smo zavrnili 2. hipotezo:

Laboratorijski asinhronski stroj bo pri generatorskem otočnem obratovanju omogočal napajanje porabnikov z nazivno napetostjo omrežja 400 V.

Podobne težave lahko pričakujemo pri »domaćih« motorjih z nazivno napetostjo 400 V (380 V) v vezavi zvezda, ki bi jih želeli uporabiti za generatorsko obratovanje.

Asinhronski motorji, ki jih najdemo v domači rabi so zelo različni glede UI karakteristike in delovne točke na UI karakteristiki, kjer delujejo. Nekateri novejši bolj optimizirani motorji delajo bolj v zasičenju nad kolenom UI karakteristike. Za takšne motorje je značilen velik tok prostega teka. Drugi, običajno starejši motorji, pa imajo delovno točko pod kolenom UI karakteristike in imajo manjši tok prostega teka. Pri takšnih motorjih pri generatorskem obratovanju teče manjši vzbujaški tok in jih je možno delovno obremeniti pri nazivnih ali malo manjših napetostih od nazivne. Kako torej ugotoviti ali je asinhronski motor primeren za generatorsko obratovanje pri napetosti blizu nazivni?



Slika 12: Preizkus prostega teka asinhronskega motorja (vir lasten)

Predlagamo preizkus prostega teka pri katerem priključimo asinhronski motor na nazivno trifazno napetost in izmerimo tok prostega teka I_{10} .

Če je tok prostega teka I_{10} majhen, to pomeni do 50 % nazivnega toka, je dobra možnost, da bo stroj omogočal generatorsko obratovanje pri nazivni napetosti (ali malo manjši).

Motorji, ki imajo velik tok prostega teka ne omogočajo generatorskega obratovanja pri nazivni napetosti oziroma imajo pri generatorskem obratovanju zelo malo obremenljivost.

Stroj, ki smo ga raziskali v naši nalogi, ima pri motorskem obratovanju velik tok prostega teka 3,0 A, kar je več kot 80 % nazivnega toka. Zato obravnavan stroj ni primeren za generatorsko obratovanje pri nazivni napetosti.

Možne rešitve problema, kako doseči primerno moč generatorja pri nazivni napetosti so:

- Transformacija generatorske napetosti na ustrezno višjo napetost. To zahteva trifazni transformator in ne ustreza ciljem našega projekta.
- Uporaba generatorja z manjšo napetostjo od standardizirane (400 V) na nekaterih enostavnih porabnikih, kot so žarnice in grelci je možna in ne zadošča našim ciljem. Kljub temu smo celotno raziskavo naredili za primer obratovanja generatorja pri znižani napetosti, torej manjši od nazivne.
- Sprememba nazivne napetosti stroja v motorskem obratovanju je rešitev, ki zahteva drugačen asinhronski stroj. Nazivna napetost stroja pri motorskem obratovanju bi morala biti vsaj 500 V. Tako bi bila napetost generatorja, ko je napetost na sponkah, zaradi že navedenih razlogov, manjša od inducirane, enaka željeni 400 V in bi tekel v navitja motorja manjši vzbujalni tok in bi bila obremenljivost generatorja večja. Statorsko navitje bi torej moralo ohraniti enak presek, za spremembo nazivne napetosti na 500 V pa bi morali povečati število ovojev statorskih tuljav. To je mogoče doseči s previjanjem statorskih navitij stroja na višjo nazivno napetost. Tako bi prilagodili stroj na generatorsko obratovanje pri napetosti 400 V. Takšen poseg je presegal naše možnosti.

V raziskovalnem delu naloge smo dokazali možnost reguliranja napetosti asinhronskega generatorja v otočnem obratovanju s spreminjanjem kapacitivnosti.

Potrdili smo 1. hipotezo (ponazorjeno s poizkusom v poglavju 3.2.4):

S spreminjanjem kapacitivnosti je možno regulirati napetost obremenjenega asinhronskega generatorja pri samostojnem obratovanju s konstantnim številom vrtljajev.

Spoznanje, da lahko ASG pri manjši regulirani napetosti napaja porabnike z večjo delovno močjo je svojevrsten paradoks. Elektrotehniška teorija pravi, da je moč sorazmerna z napetostjo in tokom, torej bi pri višji napetosti moral biti generator sposoben napajati porabnike z večjo močjo kot pri nižji napetosti.

Generator je samovzbuden takrat, ko rotor zavrtimo in ne potrebuje zunanjega vira napetosti za začetek delovanja. Preizkus delovanja regulatorja na realnem asinhronskem generatorju je pokazal odlične sposobnosti avtonomnega obratovanja.

Zaradi dovolj visoke kapacitivnosti se je generator pri povišanju števila vrtljajev vedno, brez izjem, samovzbudil. Hkrati je napetost generatorja začela preko napajalnega usmernika napajati regulator in nanj priključene releje, zato je regulator začel preko relejev in kontaktorjev izklapljati previsoko kapacitivnost in napetost se je stabilizirala znotraj določenega tolerančnega področja $U \pm 10$ V. Pri tem smo vedno spremljali glasno preklapljanje kontaktorjev.

Tako smo potrdili tretjo hipotezo:

S pomočjo krmilnika Arduino bomo uspeli izdelati regulator napetosti asinhronskega generatorja v otočnem obratovanju.

Raziskovali smo tudi možnost uporabe polprevodniških stikal (triak), ki bi zamenjali robustne kontaktorje in releje za izklapljanje kondenzatorjev. Polprevodniška stikala potrebujejo enosmerno napajanje, da sklenejo električni krog. V trenutku zagona, ko morajo biti na statorske sponke generatorja priključeni vsi kondenzatorji, bi triaki morali vse kapacitivnosti priključiti na statorske sponke. Za to bi potrebovali napajalno napetost še preden bi se generator vzbudil in začel generirati napetost. Takšna rešitev bi sicer zmanjšala velikost, maso in ceno izdelka, vendar bi oslabila avtonomnost delovanja agregata, saj bi morali imeti v trenutku zagona zunanji vir napetosti, kot je baterija ali akumulator.

Preizkusili smo obremenitev generatorja z delovnim tokom. Kaj pa v primeru ohmsko

induktivnega bremena s slabim faktorjem delavnosti $\cos\varphi$? Tudi obremenitev ASG z RL bremenom s slabim faktorjem delavnosti $\cos\varphi$ smo preizkusili. ASG ne more napajati porabnikov z jalovim tokom, saj je sam porabnik jalovega magnetilnega toka. V primeru obremenitve s porabniki z manjšimi faktorji delavnosti je potrebno narediti kompenzacijo jalove energije na samih porabnikih tako, da faktor delavnosti izboljšamo na vrednost 1.

Rešitev problema je tudi povečanje skupne kapacitivnosti regulatorja na tolikšno vrednost, da bo kapacitivnost kondenzatorjev v regulatorju napajala sam ASG in še RL porabnike. Skupna kapacitivnost kondenzatorjev (31 stopnja) je $37 \mu\text{F}$, kar zadošča za vzbujanje generatorja in še za napajanje z magnetilnim tokom priključenih RL porabnikov do določene jalove moči. Pri preveliki jalovi moči električnih porabnikov, ki presega kapaciteto kondenzatorjev, bo regulator vključil maksimalno kapacitivnost 31 stopnje. Zaradi premajhnega vzbujalnega toka pa bo napetost generatorja začela padati in generator se bo razmagnetil. To se pogosto zgodi, ko je breme asinhronski motor, ki v trenutku zagona obremeni ASG z mnogo večjo močjo. Naša ugotovitev je, da ASG lahko napaja in zažene samo asinhronske motorje manjše moči od moči ASG.

Rezultati naše raziskave veljajo za asinhronski stroj relativno male moči.

Kako pa prilagodimo regulator za vzbujanje večjih generatorjev?

ASG večje moči zahtevajo v otočnem obratovanju tudi večji vzbujalni magnetilni tok. Za regulacijo napetosti večjih generatorjev moramo v našem regulatorju spremeniti samo kapacitivnost skupin kondenzatorjev, da dosežejo potrebno večjo skupno kapacitivnost. Skupna kapacitivnost 31 stopnje, naj bi bila 1,5 krat večja od kompenzacijske vrednosti kondenzatorjev, potrebne pri motorskem obratovanju stroja. Določanje kapacitivnosti kompenzacijskih kondenzatorjev pri motorskem obratovanju stroja je prikazano v poglavju 3.1.4.

Določili smo potrebno minimalno spremembo kapacitivnosti za reguliranje napetosti znotraj tolerančnega področja $\pm 10 \text{ V}$ za naš stroj. V primeru uporabe asinhronskega stroja večje moči je tudi stopnja spremembe kapacitivnosti večja. Za dobro stopenjsko regulacijo napetosti generatorja morajo biti spremembe kapacitivnosti med stopnjami enake.

Kako iz generatorja iztisniti čim večjo moč pri nazivni napetosti, smo v razpravi že podali. Možnost obratovanja z nižanjem napetosti pogojenim z velikostjo skupnega toka

predlagamo za nadaljnje raziskovanje. Večina domačih motorjev ima zaradi zgoraj omenjenih razlogov omejeno moč pri nazivni napetosti zaradi tokovne preobremenitve. Naša ideja je, da bi z meritvijo skupnega toka naredili takšen program delovanja generatorja, ki bi pri povečanju skupnega toka preko nazivne vrednosti začel nižati napetost. Generator bi torej do nazivne vrednosti statorskega toka obratoval z nazivno napetostjo. Pri nadaljnjem večanju obremenitve pa bi regulator znižal napetost toliko, da bi bil generator samo nazivno obremenjen.

5 ZAKLJUČEK

Med nastajanjem naše raziskovalne naloge smo pridobili obilo znanja iz različnih področij tehnike in tehnologije, še posebej iz elektrotehniških področij, ki so nam bila predhodno manj poznana, saj zajemajo programiranje (kar vključuje mikrokontroler Arduino), sestavljanje vezja, ... Poleg tega smo raziskali in se naučili veliko novega o tehnologiji in znanosti, ki se skriva za uravnoteženjem kapacitivnosti, iskanjem ustrežnejših vezav ... Samo z znanjem, ki smo ga pridobili pri pouku, bi težko izdelali in dokončali raziskovalno nalogo.

O električnih motorjih, njihovi zgradbi, delovanju ... smo izvedeli veliko koristnih informacij. Zaradi številnih neuspehov, ko nam je regulator začel preko relejev in kontaktorjev izklapljati previsoko kapacitivnost in se je napetost stabilizirala znotraj določenega tolerančnega področja $U \pm 10 \text{ V}$ (glasno preklapljanje), smo bili vedno znova primorani raziskovati še neodkrita področja elektrotehniških »trdih oreščkov«. Ko smo zaradi segrevanja »skurili« Arduino ... in ponovnih poskusov vzpostavitve delovanja, smo bili v čevljih pravih raziskovalcev, ki jim velikokrat spodleti in se z vsakim neuspehom naučijo nekaj novega in ugotavljali smo, da je res, kar je dejal Isaac Newton: »To, kar vemo, je kapljica; to česar ne vemo, je morje.«

Dosežki in spoznanja raziskovalne naloge so:

- Napetost obremenjenega ASG lahko uspešno reguliramo s spremembo kapacitivnosti.
- Nazivna napetost asinhronskega generatorja je manjša od nazivne napetosti pri motorskem obratovanju.
- ASG ima pri manjših reguliranih napetostih večjo moč kot pri višjih napetostih.
- Za učinkovito generatorsko obratovanje potrebujemo asinhronski stroj projektiran za generatorsko obratovanje.
- Mikrokontroler Arduino sicer omogoča uspešno regulacijo napetosti ASG, vendar bi z vidika konstantne napetosti, lahko uporabili tudi druge mikrokontrolerje, ki bi bili manj občutljivi in zato bolj zanesljivi.

- Največji dosežek naloge je izdelek – regulator napetosti ASG. Z njim smo potrdili raziskovalna spoznanja. Zadan cilj smo dosegli, saj smo izdelali regulator napetosti s stopenjskim spreminjanjem kapacitivnosti, vendar so mogoče izboljšave:
- Stabilnosti delovanja v smislu zmanjšanja števila preklopov kapacitivnih stopenj. Med obratovanjem smo opazili, da sami preklopi kapacitivnosti povzročajo motnje meritve napetosti generatorja. Posledica so bile preštevilne spremembe kapacitivnosti oziroma preklopi kontaktorjev. Nadaljnje raziskave želimo usmeriti v izboljšanje programske kode tako, da bi bila sprememba kapacitivne stopnje odvisna od velikosti odstopanja napetosti od željene vrednosti.
- Izdelati tržni izdelek, ga na Startup vikendu predstaviti, dodelati strategijo prodaje, pri tem pa ne smemo zanemariti oglaševanja, ki je zelo pomembno za uspešno delovanje ter finančni rezultat. Ker želimo naš unikatni regulator predstaviti širšemu krogu potencialnih uporabnikov oz. naročnikov, bomo oglaševali preko več kanalov, s pomočjo spleta in z neposrednimi predstavitvami ciljnim skupinam in naš kapacitivni regulator ASG ponuditi na trgu kot alternativo uveljavljenim, tržno dostopnim, a cenovno manj ugodnim sinhronskim agregatom. Če na tem mestu navedemo ekonomski vidik (nizko ceno) regulatorja (okrog 90 evrov):
 - 15 kondenzatorjev, po 2, 5 evra
 - 5 kontaktorjev, po 8 evrov
 - 1 mikrokrmilnik (Arduino), po 4 evre
 - 1 vrstica relejev, po 6 evrov
 - 1 usmernik, po 5 evrov

Prednost našega izdelka je predvsem cenovna dostopnost za lastnike delovnih strojev z mehanskim pogonom večjih moči. Pri moči nekaj deset kilovatov je cena konkurenčnih sinhronskih agregatov visoka. Cena našega izdelka je seveda odvisna od moči agregata. Pri večjih močeh večje kapacitivnosti nekoliko podražijo izdelek. Ves ostali material potreben za izdelavo regulatorja je neodvisen od moči agregata.

Ob zaključku projektnega dela in brezhibnem delovanju našega regulatorja, so se nam porodile ideje še za mnoge spremembe in nadgradnje našega sistema. Morda naslednje leto nadaljujemo.

6 POVZETEK

Naš sistem proizvodnje električne energije, bi bil lahko uporaben na kmetijah, ki v času izrednih vremenskih razmer zaradi daljše prekinitve dobave električne energije utrpijo veliko škodo. V Sloveniji je bil tak primer žledolom izpred nekaj let. In to je bila motivacija, zaradi katere smo se podali v raziskavo specifičnega področja elektrotehnike.

Veliko kmetij v Sloveniji se poleg kmetovanja ukvarja še s kakšno dejavnostjo, pri kateri kot pogonski stroj uporabljajo asinhronski motor. Torej bi lahko z manjšo predelavo svoj motor spremenili v začasen generator/agregat za lastno mrežo električne energije. Kot pogonski stroj bi uporabili kar traktor, s katerim bi preko kardana vrteli motor. Kardan je zmožen zagotavljati konstantno število vrtljajev, kar pa je za nas pomembno. Naš sistem omogoča napajanje tako enofaznih kot tudi trifaznih porabnikov. Tako bi kmetije lahko brez problema napajale stroje za molžo krav in tudi ostale pomembne porabnike kot so skrinje, hladilniki, žarnice.

Raziskovanja smo se lotili načrtno in mnogokrat spremenili smer, metodo raziskovanja, ko se je izbrana izkazala za napačno. Kako smo postopali, se razgrinja v poglavjih: Materiali in metode raziskovanja ter Rezultati izbranih metod. Naše ugotovitve in zaključki ter mogoče nadaljevanje raziskovanja pa smo predstavili v poglavju Razprava.

Naš regulator za regulacijo napetosti ASG, je podrejen kompromisom, ki smo jih sprejeli zaradi specifičnih lastnosti uporabljenega laboratorijskega stroja, vendar deluje in menimo, da bi bil načrt zanj lahko v veliko pomoč ob izpadu električne energije.

7 ZAHVALA

Za pomoč pri izdelavi raziskovalne naloge se zahvaljujemo:

- Mentorju Matjažu Žeraku in somentorici dr. Nataši Meh Peer, ki sta nam pomagala in ob vsaki težavi bila v podporo. Tako smo vedno poiskali preproste in odlične rešitve.
- Mag. Bojani Urbanc za lektoriranje angleške različice povzetka.
- Našim prijateljem in sorodnikom za podporo pri nastajanju naloge.
- ŠC Velenje – Elektro in računalniški šoli, ki nam je nudila odlične pogoje za izdelavo raziskovalne naloge.

8 PRILOGE

Priloga 1: Rezultati preizkusa obremenitve asinhronskega generatorja pri regulirani napetosti

$U=300\text{ V}$

I_d [A]	I_c [A]	I [A]	P [W]
0	1,5	1,50	0
1,28	2,23	2,57	665,1
1,36	2,33	2,70	706,7
1,50	2,45	2,87	779,4
1,62	2,57	3,04	841,8
1,77	2,65	3,19	919,7
1,87	2,78	3,35	971,7
1,97	2,90	3,51	1023,6

$U=310\text{ V}$

I_d [A]	I_c [A]	I [A]	P [W]
0	1,6	1,60	0
1,13	2,32	2,58	606,7
1,22	2,43	2,72	655,1
1,33	2,56	2,88	714,1
1,45	2,70	3,06	778,6
1,60	2,80	3,22	859,1
1,72	2,93	3,40	923,5
1,80	3,00	3,50	966,5

$U=320\text{ V}$

I_d [A]	I_c [A]	I [A]	P [W]
0	1,77	1,77	0
0,92	2,40	2,57	509,9
1,00	2,50	2,69	554,3
1,18	2,65	2,90	654,0
1,28	2,80	3,08	709,4
1,40	2,90	3,22	776,0
1,58	3,00	3,39	875,7
1,63	3,10	3,50	903,4

$U=330\text{ V}$

I_d [A]	I_c [A]	I [A]	P [W]
0	2	2,00	0
0,72	2,50	2,60	411,5
0,85	2,63	2,76	485,8
1,00	2,78	2,95	571,6
1,12	2,90	3,11	640,2
1,18	3,00	3,22	674,5
1,36	3,15	3,43	777,3
1,49	3,26	3,58	851,6

$U=340\text{ V}$

I_d [A]	I_c [A]	I [A]	P [W]
0	2,3		0
0,50	2,62	2,67	294,4
0,62	2,76	2,83	365,1
0,82	2,90	3,01	482,9
0,90	3,00	3,13	530,0
0,98	3,10	3,25	577,1
1,10	3,20	3,38	647,8
1,28	3,40	3,63	753,8

$U=350\text{ V}$

I_d [A]	I_c [A]	I [A]	P [W]
0	2,5	2,50	0
0,32	2,70	2,72	194,0
0,43	2,85	2,88	260,7
0,54	2,95	3,00	327,4
0,70	3,12	3,20	424,4
0,79	3,25	3,34	478,9
0,87	3,30	3,41	527,4
1,10	3,55	3,72	666,8

$U=360\text{ V}$

I_d [A]	I_c [A]	I [A]	P [W]
0	2,7	2,70	0
0,12	2,81	2,81	74,8
0,23	2,95	2,96	143,4
0,33	3,10	3,12	205,8
0,50	3,25	3,29	311,8
0,59	3,36	3,41	367,9
0,66	3,40	3,46	411,5
0,88	3,66	3,76	548,7

$U=370\text{ V}$

I_d [A]	I_c [A]	I [A]	P [W]
0,00	3,05	3,05	0
0,08	3,15	3,15	51,3
0,16	3,20	3,20	102,5
0,28	3,36	3,37	179,4
0,38	3,50	3,52	243,5
0,48	3,65	3,68	307,6
0,69	3,80	3,86	442,2

Priloga 2: Stopnje kapacitivnosti vzbujačnih kondenzatorjev:

stopnja	C_5 [μF]	C_4 [μF]	C_3 [μF]	C_2 [μF]	C_1 [μF]	C [μF]
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	1	1
2	0	0	0	2,5	0	2,5
3	0	0	0	2,5	1	3,5
4	0	0	5	0	0	5
5	0	0	5	0	1	6
6	0	0	5	2,5	0	7,5
7	0	0	5	2,5	1	8,5
8	0	10	0	0	0	10
9	0	10	0	0	1	11
10	0	10	0	2,5	0	12,5
11	0	10	0	2,5	1	13,5
12	0	10	5	0	0	15
13	0	10	5	0	1	16
14	0	10	5	2,5	0	17,5
15	0	10	5	2,5	1	18,5
16	20	0	0	0	0	20
17	20	0	0	0	1	21
18	20	0	0	2,5	0	22,5
19	20	0	0	2,5	1	23,5
20	20	0	5	0	0	25
21	20	0	5	0	1	26
22	20	0	5	2,5	0	27,5
23	20	0	5	2,5	1	28,5
24	20	10	0	0	0	30
25	20	10	0	0	1	31
26	20	10	0	2,5	0	32,5
27	20	10	0	2,5	1	33,5
28	20	10	5	0	0	35
29	20	10	5	0	1	36
30	20	10	5	2,5	0	37,5
31	20	10	5	2,5	1	38,5

Priloga 3: Program za Arduino

Program smo komentirali v poglavju 4.1.3.



```
AsinhronskiG | Arduino 1.8.2 Hourly Build
Datoteka Uredi Skica Orodja Pomoč
AsinhronskiG §
//Program za raziskovalno nalogo:
int A = 2;
int B = 3;
int C = 4;
int D = 5;
int E = 6;

boolean a = LOW;
boolean b = LOW;
boolean c = LOW;
boolean d = LOW;
boolean e = LOW;

int napetoat = 0;
int vhod = 0;

int count = 0;
int count2 = 0;

unsigned long stevilo = 20;
unsigned long prejsnji = 0;
unsigned long vsota = 0;
unsigned long povprecje = 0;

float cas = 0.05;
unsigned long cas2 = 0;

boolean stopp31 = LOW;
boolean stopp0 = LOW;
boolean naprej = LOW;
boolean nazaj = LOW;

void setup() {
  Serial.begin(74880);
  pinMode(A5, INPUT);
  pinMode(A, OUTPUT);
  pinMode(B, OUTPUT);
  pinMode(C, OUTPUT);
  pinMode(D, OUTPUT);
  pinMode(E, OUTPUT);
}

void loop() {
  Serial.println(povprecje);
  if(count2 < stevilo)
  {
    vhod = analogRead(A5);
    count2++;
    delay(cas);
    vsota = prejsnji + vhod;
    prejsnji = vsota;
  }
  else
  {
    povprecje = vsota / stevilo;
    //Serial.println(povprecje);
    count2 = 0;
    vsota = 0;
    vhod = 0;
    prejsnji = 0;
  }
  if(count == 0)
  {
    stopp0 = HIGH;
  }
  else
  {
    stopp0 = LOW;
  }
  if(count == 31)
  {
    stopp31 = HIGH;
  }
  else
  {
    stopp31 = LOW;
  }
  if((povprecje < 500) && (stopp31 == LOW) && (naprej == LOW))
  {
    naprej = HIGH;
    cas2 = millis();
  }
  if(naprej == HIGH)
  {
    if((millis() - cas2) > 1000)
    {
      if(povprecje < 500)
      {
        count = count + 1;
        naprej = LOW;
      }
      else
      {
        naprej = LOW;
      }
    }
  }
  if((povprecje > 530) && (stopp0 == LOW) && (nazaj == LOW))
  {
    nazaj = HIGH;
    cas2 = millis();
  }
  if(nazaj == HIGH)
  {
    if((millis() - cas2) > 1000)
    {
      if(povprecje > 530)
      {
        count = count - 1;
        nazaj = LOW;
      }
      else
      {
        nazaj = LOW;
      }
    }
  }
}
```

(nadaljevanje na desni) (nadaljevanje na desni) (nadaljevanje spodaj)

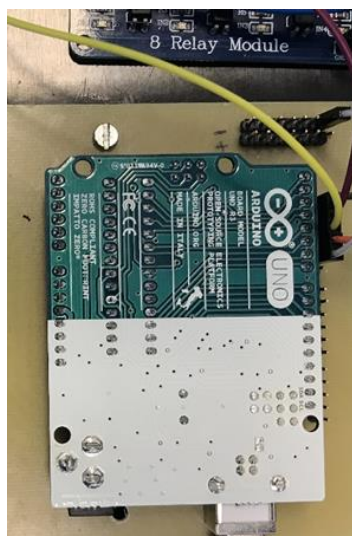
```
}  
}  
  
if(count == 1 || count == 3 || count == 5 || count == 7 || count == 9 || count == 11 || count == 13 ||  
   count == 15 || count == 17 || count == 19 || count == 21 || count == 23 || count == 25 || count == 27 || count == 29 || count == 31) //3  
{  
  a = HIGH;  
}  
else  
{  
  a = LOW;  
}  
  
if(count == 2 || count == 3 || count == 6 || count == 7 || count == 10 || count == 11 || count == 14 ||  
   count == 15 || count == 18 || count == 19 || count == 22 || count == 23 || count == 26 || count == 27 || count == 30 || count == 31) //4  
{  
  b = HIGH;  
}  
else  
{  
  b = LOW;  
}  
  
if(count == 4 || count == 5 || count == 6 || count == 7 || count == 12 || count == 13 || count == 14 || count == 15 ||  
   count == 20 || count == 21 || count == 22 || count == 23 || count == 28 || count == 29 || count == 30 || count == 31) //5  
{  
  c = HIGH;  
}  
else  
{  
  c = LOW;  
}  
  
if(count == 8 || count == 9 || count == 10 || count == 11 || count == 12 || count == 13 || count == 14 || count == 15 ||  
   count == 24 || count == 25 || count == 26 || count == 27 || count == 28 || count == 29 || count == 30 || count == 31) //6  
{  
  d = HIGH;  
}  
else  
{  
  d = LOW;  
}  
  
if(count == 16 || count == 17 || count == 18 || count == 19 || count == 20 || count == 21 || count == 22 || count == 23 ||  
   count == 24 || count == 25 || count == 26 || count == 27 || count == 28 || count == 29 || count == 30 || count == 31) //7  
{  
  e = HIGH;  
}  
else  
{  
  e = LOW;  
}  
  
if(a == HIGH)  
{  
  digitalWrite(A, LOW);  
}  
else  
{  
  digitalWrite(A, HIGH);  
}  
  
if(b == HIGH)  
{  
  digitalWrite(B, LOW);  
}  
else  
{  
  digitalWrite(B, HIGH);  
}  
  
if(c == HIGH)  
{  
  digitalWrite(C, LOW);  
}  
else  
{  
  digitalWrite(C, HIGH);  
}  
  
if(d == HIGH)  
{  
  digitalWrite(D, LOW);  
}  
else
```

```
{  
  digitalWrite(D, HIGH);  
}  
  
if(e == HIGH)  
{  
  digitalWrite(E, LOW);  
}  
else  
{  
  digitalWrite(E, HIGH);  
}  
}
```

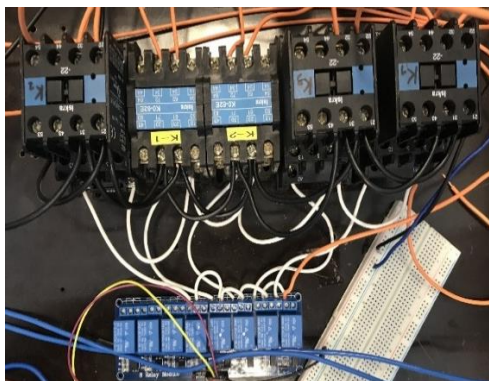
Priloga 4: Regulacijski sistem



Slika 13: Usmernik



Slika 14: Krmilnik



Slika 15: Izvršilni členi



Slika 16: Kondenzatorji

9 VIRI IN LITERATURA

1. Avčin, F., Jereb, P. 1983. Preizkušanje električnih strojev in njihove lastnosti. Tehniška založba Slovenije, Ljubljana.
2. Brechmann, G., Dzieia, W., Hörnemann Heiden, E., Hübscher Lüneburg, H., Jagla, D., Klaue Roxheim, J. 1994. Elektrotehniški priročnik. Viharnik d.o.o., Ljubljana.
3. Mehatronika. Priročnik. Ljubljana: Pasadena, 2009.
4. Miljavec, D., Jereb, P. 2005. Električni stroji. Temeljna znanja. Samozaložba - Tiskarna Formatisk, Ljubljana.
5. Pavšek, Z. / Petkovšek, S. A. S. / Pokorny, B. / Ribarič Lasnik, C. / Steblovnik, K. / ŠALEJ, M. / Štrbenk, E. / Vrbič Kugonič, N. 2008. Osnove znanstveno raziskovalnega dela, 5. dopolnjena izdaja, Inštitut za ekološke raziskave ERICo Velenje d. o. o.
6. Uršič, L. 2011. Sklop enosmernega motorja in asinhronskega samovzbudnega generatorja z regulacijo vrtilne hitrosti. Ljubljana: Fakulteta za elektrotehniko, laboratorij za električne stroje, 2011. Dostopno na: http://les.fe.uni-lj.si/mes/seminarji/Sklopitev_kolektorski_motor_in_trifazni_asinhronski_generator/sklop_kolektorski_motor_in_trifazni_asinhronski_generator.pdf [15. 7. 2105].
7. Zagradišnik, I., Slemnik, B. 2001. Električni rotacijski stroji. Učbenik. FERi, Maribor.
8. Žalar, Z., 1991. Osnove elektrotehnike 1. Tehniška založba Slovenije, Ljubljana.
9. Žalar, Z., 2010. Osnove elektrotehnike 2. Tehniška založba Slovenije, Ljubljana.
10. Žerak, M., 2014. Osnove elektrotehnike. Spletna učilnica ERŠ.
11. www.beatson.co.uk/history-electric-motors/ (12. 12. 2017).
12. (<https://zmaga.com/content.php?id=4394>, (17. 1. 2018)
13. <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3> (13. 12. 2017)