

Generatori kao izvori struje u zrakoplovima

- › Generatori su uređaji koji mehaničku, rotacijsku energiju pretvaraju u električnu koristeći **princip elektromagnetske indukcije**¹. U zrakoplovima izvor te rotacijske energije su, naravno, motori zrakoplova (ili APU ili RAT).
- › Tipično zrakoplovi imaju po jedan generator na svakom motoru (i APU-u, ako ga posjeduju)
- › Svi generatori imaju **rotor** i **stator** na kojima se nalazi puno namotaja tanke izolirane žice, dakle **zavojnice**. Zavojnice su efektivno samo puno žičanih petlji za redom i u svakoj će se inducirati napon, dakle iznos induciranog napona (U) biti će izravno proporcionalan broju namotaja (N). Te zavojnice u pravilu će imati **željezne jezgre** koje pojačavaju, usmjeruju i oblikuju magnetsko polje.



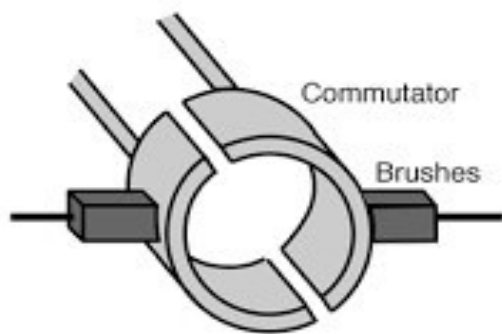
Slika 1 - zavojnice polja na statoru omotane oko tzv. polnih papuča

- › Jedna ili više zavojnica imaju ulogu elektromagneta, dakle izvora magnetskog polja. Nju/njih zovemo **zavojnica polja** (*engl. field coil*).
- › Ostale zavojnice (jedna ili više njih) su one u kojima nastaje struja principom elektromagnetske indukcije. Njih zovemo **zavojnice armature** (*engl. armature coil*).
- › Za generatore u kojima je zavojnica armature na statoru, a na rotoru se stvara magnetsko polje, koristi se još i naziv **alternator**. Dakle kod alternatora magnetsko polje kruži, a struja se stvara na mirujućim zavojnicama statora, dok kod običnih generatora magnetsko polje miruje, a zavojnica armature u kojoj se stvara napon kruži unutar tog magnetskog polja.
- › Iako se elektromagnetskom indukcijom iz jednolikog kruženja na žičanoj petlji može stvoriti isključivo izmjenična struja, konstrukcijom generatora moguće je na izlazu dobiti istosmjernu struju. Tako je glavna podjela generatora na izmjenične (AC) i istosmjerne (DC).

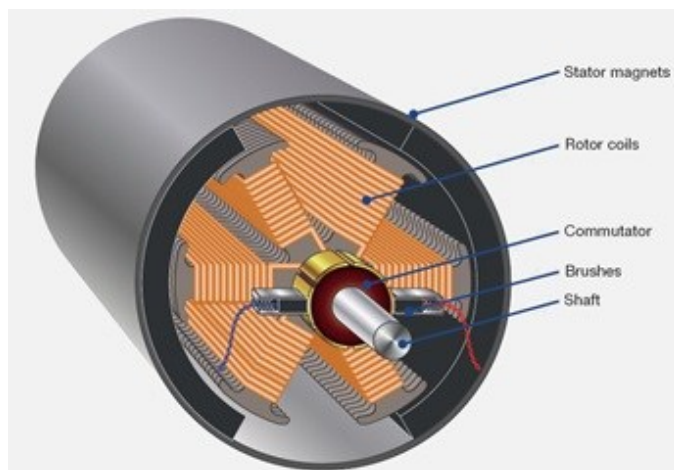
¹ Dakle da promjena magnetskog toka kroz žičanu petlju inducira na njenim krajevima elektromotornu silu, odnosno da se stvara razlika potencijala (napon) koji uzrokuje struju. Što je magnetsko polje jače i što je promjena brža (veća frekvencija) to je inducirani napon veći.

DC generatori:

- › Običan DC generator radi tako što ima zavojnice armature na rotoru i svakih pola kruga se zamijene kontakti između krajeva zavojnice i izlaznih vodova koji struju odvođe dalje u zrakoplov. Taj proces zove se komutacija² i postiže se **kliznim kontaktima** (tzv. **četkice**, engl. *brushes*) na dijelu generatora koji se zove **komutator**.

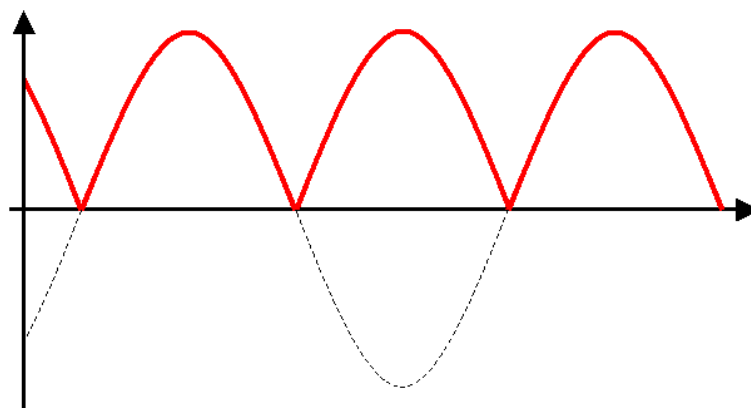


Slika 2 - princip komutacije



Slika 3 - skica komutatora sa 3 para zavojnica armature

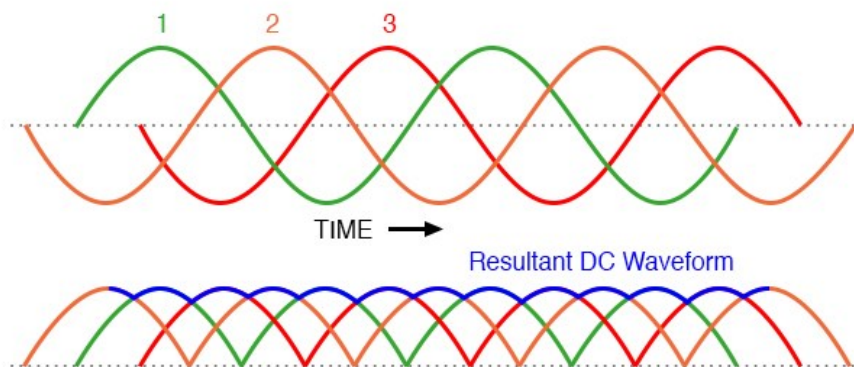
- › Na taj način na izlaznim vodovima struja uvijek ide u istome smjeru, jer kada kroz zavojnicu armature teče u suprotnom smjeru onda su krajevi zavojnice spojeni na suprotne izlazne vodove (<https://www.youtube.com/watch?v=ATFqX2Cl3-w>)



Slika 4 - crno je napon u zavojnici armature, crveno je napon na izlaznim vodovima iz komutatora

- › U praksi se koristi više zavojnica armature i komutator koji ostvaruje spoj između izlaznih vodova i one zavojnice na kojoj je najveći trenutni napon (vidi sliku 3). Tako se postiže istosmjerni napon koji ima **puno manju valovitost**. Valovitost se dodatno smanjuje spajanjem kondenzatora velikog kapaciteta paralelno na izlazne vodove (tzv. peglanje napona).

² Engl. *commute* – zamijeniti, ići negdje i nazad

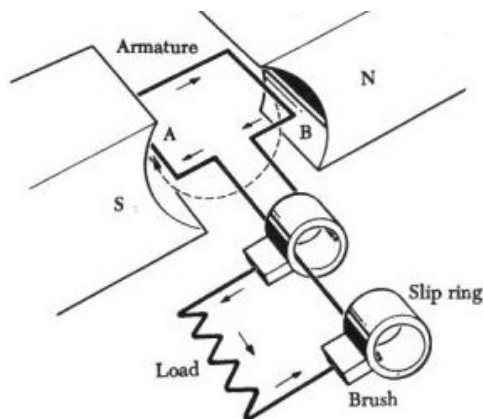


Slika 5 - Izlaz sa komutatora sa 3 para zavojnica armature. Zavojnica može biti i puno više pa je ukupni izlazni napon još manje valovit.

- › Četkice u DC generatorima moraju biti dovoljno mekane da ne oštećuju komutator, a dovoljno čvrste i izdržljive da se ne potroše ili izgore od silnog trenja i grijanja. Također trebaju biti vrlo precizno izrađene i dobro nasjedati na točno proračunatu neutralnu ravninu da bi se izbjeglo iskrenje koje dodatno pospješuje trošenje. To je teško i skupo za postići, nemoguće je potpuno to trošenje eliminirati i zahtijeva održavanje.
- › Zbog atmosferskih uvjeta trošenje četkica se dodatno i značajno pogoršava na velikim visinama
- › Da bi se DC generator mogao sam **pokrenuti** potreban je **remanentni** magnetizam na statoru
 - zato što treba struja da napaja zavojnice polja, a struje nema dok nema polja, dakle treba biti neko magnetsko polje prisutno prije nego se počne stvarati struja – **permanentni magnet**
- › Sve skupa, **mane** DC generatora su sljedeće:
 - kompliciran je i skup zbog sustava komutacije i četkica
 - zahtijeva često održavanje zbog trošenja četkica i komutatora što ga čini još skupljim
 - problem trošenja četkica pogoršava se radom na velikim visinama što ga čini posebno neprikladnim za zrakoplove
- › Iz tih razloga klasični DC generatori se više ne koriste i mogu se naći samo u starim zrakoplovima.
- › Prije su se koristili jer je DC struja bila potrebna, a pretvorba AC u DC struju je bila još teža, skuplja i/ili kompliciranija nego navedene mane DC generatora.
- › **DC alternatori ne postoje** u ovom klasičnom smislu, jer su zavojnice armature na statoru pa se struja ne može komutirati, ali postoje kao AC alternatori u koje je integriran poluvodički ispravljač napona na izlazu. O jednome i drugome malo više kasnije.

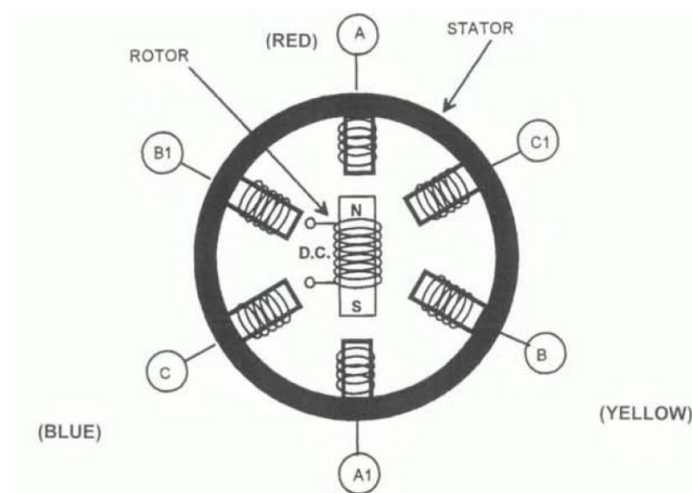
AC generatori:

- › Obični AC generatori vrlo su slični upravo opisanim DC generatorima. Jedina bitna razlika je što **nemaju komutator** pa na izlazu daju izmjeničnu struju.



Slika 5 - shema prijenosa napona sa armature na izlaze kod AC generatora

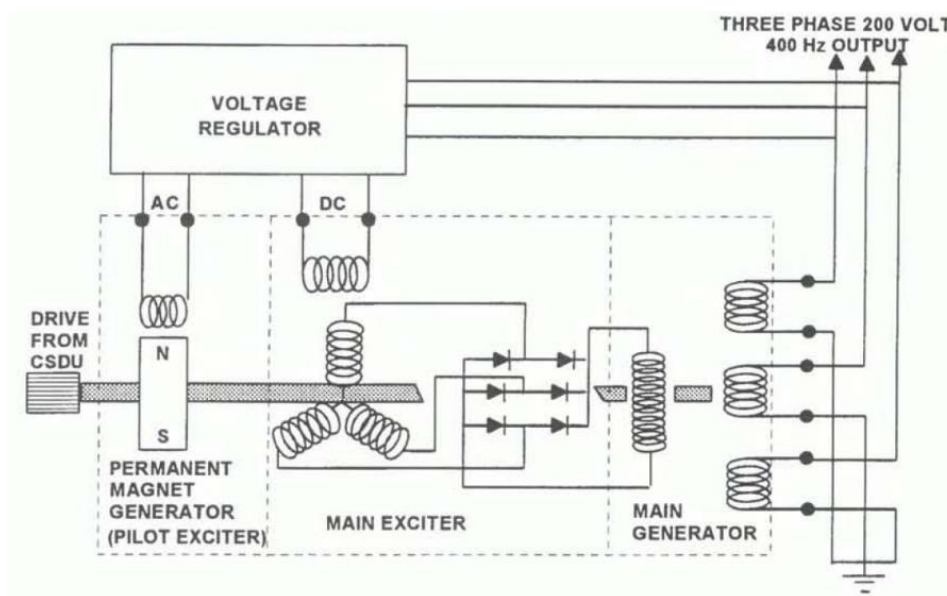
- › Umjesto komutatora imaju fiksne klizne prstenove. Konstrukcija je jednostavnija, ali isti problemi sa trošenjem četkica kao i kod DC generatora.
- › Takvi AC generatori se zato također ne koriste, nego se koriste **AC alternatori**.
- › AC alternatori – **armatura je na statoru**, zavojnice polja na rotoru. To znači da magnetsko polje koje se stvara na rotoru kruži i na taj način uzrokuje stvaranje napona u statičnim zavojnicama armature.



Slika 6 - shema principa rada AC alternatora

- › Najčešće **3 para zavojnica polja – trofazna struja** na izlazu (3 faze u pomaku od 120°)
- › AC alternatori trebaju DC struju na rotoru za zavojnice polja – opet **četkice i komutator!**
 - Ali problem četkica puno manji jer kroz njih ne teče struja koja napaja cijeli zrakoplov nego samo onoliko koliko treba za napajanje jednog elektromagneta. Manja struja – manje trošenje, zagrijavanje i iskrenje – puno manje održavanja.

- Ali i dalje fizički kontakt pa se dakle četice troše što i dalje nije idealno i treba održavanje
- › Kao i kod DC generatora, potreban je remanentni magnetizam (permanentni magnet) u zavojnicama polja da bi se generator **mogao samostalno pokrenuti**
- › Postoje i AC alternatori bez četkica – *engl. brushless*
 - oni rade tako da se struja za napajanje zavojnica polja na rotor ne dovodi direktnim kontaktom nego induksijski – kao mali, zasebni DC generator (lijevo od sredina na slici 7)
 - ta struja se potom u rotoru ispravlja pomoću diodnog ispravljača ugrađenog unutar samog rotora (desno od sredine na slici 7)
 - konačno struja iz ispravljača napaja elektromagnet koji inducira struju u glavnim zavojnicama armature na statoru (desno na slici 7)
 - permanentni magnet skroz lijevo na slici 7 potreban je samo za inicijalno samostalno pokretanje generatora (**exciter**)

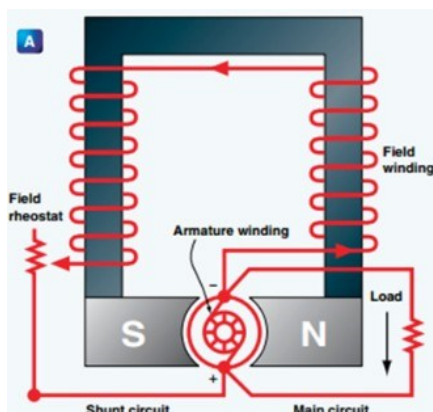


Slika 7 - shema rada brushless AC alternatora

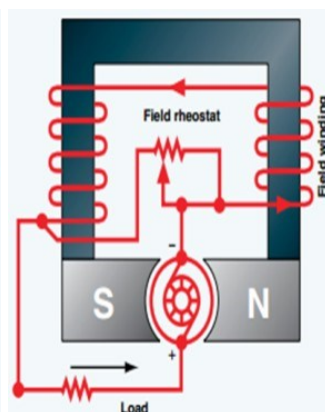
- ovakvi generatori postali su mogući tek pojavom, razvojem i minijaturizacijom poluvodičkih komponenti poput dioda
- › Brushless AC generatori **najefikasniji** su i zahtijevaju najmanje (gotovo nimalo) održavanja, pa stoga sve skupa i najjeftiniji, odnosno **najisplativiji**.
- › Najčešće upotrebljavani generatori na zrakoplovima u moderno doba.
- › Također upotrebljavani za tzv. **DC brushless generatore** koji su zapravo samo AC brushless generatori sa poluvodičkim ispravljačem struje na izlazu (a činjenica da je struja trofazna čini ispravljeni napon još glađim).

Spajanje i regulacija generatora:

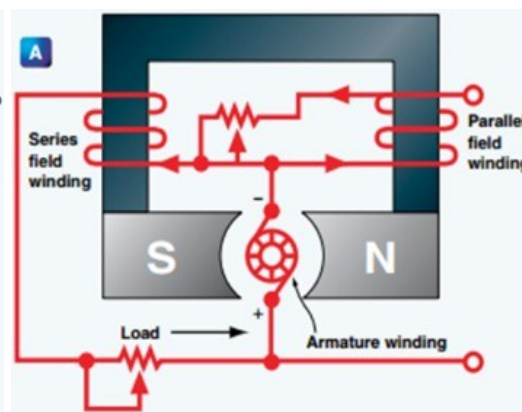
- › Amplituda induciranog napona u armaturnim zavojnicama ovisi o jačini magnetskog polja (dakle jačini struje kroz zavojnice polja) i o brzini promjene toka kroz zavojnice armature, dakle o brzini vrtnje osovine
- › Brzina vrtnje osovine ovisi o brzini vrtnje motora, a ona varira, dakle varira i napon i to se treba kompenzirati
- › Struja koja teče kroz zavojnice polja generatora je ista ona koju taj isti generator stvara. Kada bi ta veza bila izravna dogodili bi se sljedeći scenariji:
 - 1) motor ubrza → poveća se napon na izlazu generatora → poveća se struja kroz zavojnice polja → poveća se magnetsko polje → poveća se napon na izlazu generatora → poveća se struja kroz zavojnice polja → ... → žice se otope zbog prevelike struje
 - 2) motor uspori → smanji se napon na izlazu generatora → smanji se struja kroz zavojnice polja → smanji se magnetsko polje → smanji se napon na izlazu generatora → smanji se struja kroz zavojnice polja → ... → struja je nula
- oba opisana slučaja primjeri su **pozitivne povratne veze**, kada se izlaz sustava dovodi na ulaz istog tog sustava na način da se zbroji sa originalnom pobudom, a to uzrokuje guranje sustava dalje u istom smjeru
- › Postoje tri osnovna načina spajanja generatora na električnu mrežu: *serijski* (slika 8a), *paralelni* (slika 8b) i *složeni* (kompandni; slika 8c)
 - svaki od njih ima svoje prednosti i mane, ali karakteristika sva tri je promjenjivi otpornik u krugu zavojnica polja (vidi slike 8a-c)
 - promjenom tog otpora utječe se na struju kroz zavojnice polja, dakle na jačinu magnetskog polja koje uzrokuje elektromagnetsku indukciju u zavojnicama armature



Slika 8a - paralelni spoj generatora



Slika 8b - serijski spoj generatora

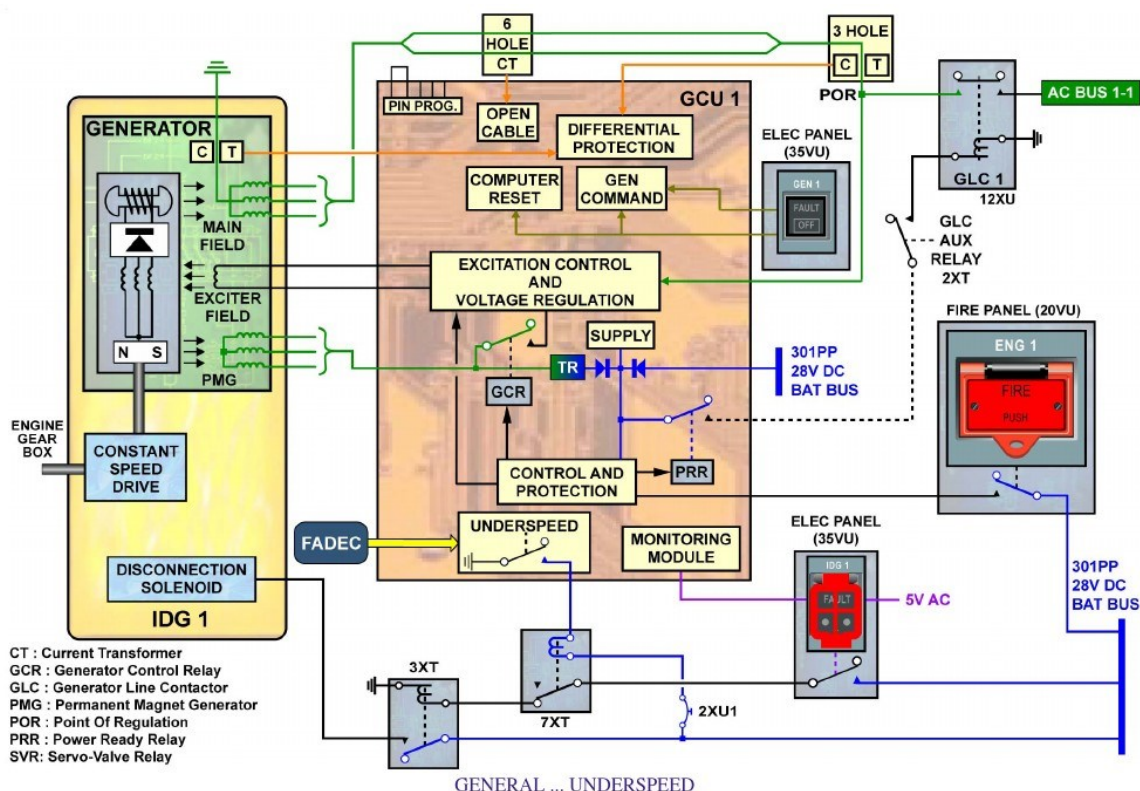


Slika 8c - složeni (kompandni) spoj generatora

- › **Regulator** je uređaj koji služi postizanju stabilnog, konstantnog iznosa napona na izlazu iz generatora, a radi na principu **negativne povratne veze**:

- kada je napon na izlazu generatora **prevelik** regulator **smanji** struju kroz zavojnice polja (povećanjem otpora u krugu zavojnica polja), to uzrokuje slabije magnetsko polje i **smanjenje** napona na izlazu
 - kada je napon na izlazu generatora **premali** regulator **poveća** struju kroz zavojnice polja (smanjenjem otpora u krugu zavojnica polja), a to uzrokuje jače magnetsko polje i **povećanje** napona na izlazu
 - negativna povratna veza je kada se izlaz sustava dovodi na ulaz istog tog sustava na način da se oduzme od originalne pobude, a to uzrokuje stabilizaciju sustava
- › Regulatori mogu raditi na **elektromehaničkom** principu ili na **elektroničkom**, odnosno poluvodičkom (*solid state*) principu:
- Kod elektromehaničkog regulatora otpor promjenjivog otpornika u krugu zavojnica polja mijenja se mehanički. Dva najčešća tipa elektromehaničkih regulatora su **ugljeni** regulator i **vibrirajući** (trodjelni) regulator (*engl. vibrating, three-unit*):
 - **Ugljeni regulator** sastoji se od niza šupljih ugljenih pločica (ugljeni stup, *engl. carbon pile*) čiji otpor se mijenja u ovisnosti o pritisku. Ugljeni stup unutar regulatora pritisnut je metalnom oprugom ispod koje je solenoid (zavojnica). Prolaskom struje kroz tu zavojnicu stvara se magnetsko polje koje privlači ili odbija oprugu koja time više ili manje stišće ugljeni stup i tako mu mijenja otpor.
 - Ugljeni regulatori su neefikasni, troše se i zahtijevaju često održavanje. Zbog toga se više ne upotrebljavaju i mogu se naći samo u starim zrakoplovima (sa DC generatorima).
 - **Vibrirajući** (trodjelni) regulatori rade pomoću releja koji su namješteni tako da kada je struja u krugu zavojnice polja prevelika ju prespoje kroz otpornik (fiksno iznosa) pa kada bude premala isti taj otpornik ponovno odspoje i ciklus se ponavlja. Posljedično izlazni napon generatora titra oko željene vrijednosti, a sam regulator stalno „vibrira“ između ta dva opisana stanja.
 - Ti regulatori zovu se trodjelni jer uglavnom imaju integrirane tri funkcije koje se ostvaruju na vrlo slične načine (pomoću releja), a to su: **regulacija napona**, **ograničavanje maksimalne struje** i **sprječavanje inverzne struje**. Oni su nešto napredniji, efikasniji i bolji od ugljenih i uglavnom su ih zamijenili gdje se elektronički nisu mogli uvesti.
 - Elektronički, poluvodički regulatori rade se od tranzistora i ostalih elektroničkih komponenti kojima se otpor može precizno mijenjati naponima i strujama. Nemaju pokretnih dijelova, ne treba ih održavati, vrlo rijetko se kvare, imaju jako dugi vijek trajanja (ne troše se) i vrlo su efikasni (mali gubitak energije). Zbog silnih prednosti oni su moderni standard.
- › U modernim zrakoplovima regulatori su dio **GCU-a (Generator Control Unit)**
- elektronički uređaji čija glavna funkcija je regulacija napona, ali imaju i razne druge poput nadgledanja ispravnosti rada generatora (razni senzori) i automatskog spajanja i odspajanja generatora sa električne mreže zrakoplova u slučaju raznih problema i kvarova (npr. preveliki ili premali napon, preveliko opterećenje, tok struje u suprotnom smjeru itd.)

- › Kod generatora AC struje uz iznos (amplitudu) napona važna je i frekvencija struje, koja se također mijenja sa brzinom motora, a koja također treba biti regulirana jer mnogi potrošači i električna mreža očekuju struju točno određene frekvencije³.
- › Ovaj problem uglavnom se rješava **CSDU-om (Constant Speed Drive Unit)**
 - hidraulički uređaj koji vrši mehanički prijenos sa osovine motora na osovinu generatora na način da osigurava približno konstantnu brzinu rotacije osovine generatora neovisno o brzini rotacije motora (**u osnovi mjenjačka kutija**)
 - velik, težak, mehanički kompliciran i zahtijeva održavanje (dakle skup) – sve vrlo loše za zrakoplove
 - prije je bio zasebna jedinica, a danas uglavnom dolazi integriran sa generatorom - to se zove **IDG (Integrated Drive Generator)**; tako je pouzdanije, manje, lakše i jeftinije, ali je otežano održavanje i popravljanje, a zamjena skuplja jer se mora mijenjati sve



Slika 9 - Primjer sheme spajanja brushless AC IDG-a i pridruženog GCU-a. Treba primijetiti kako „Excitation control and voltage regulation” dio GCU-a kao ulaz ima struju iz generatora, a za izlaz krug pobudnih zavojnica polja koje određuju koliki će biti napon na izlazu iz generatora

³ Ovo nije više nužno točno, što ćemo komentirati kasnije u analizi električnih mreža zrakoplova. Postoje AC sustavi koji su napravljeni tako da toleriraju varijaciju u frekvenciji struje i nose se s time na razini pojedinih potrošača.

- › Problem konstantnosti frekvencije napona može se riješiti i s **VSCF (Variable Speed Constant Frequency)** uređajem:
 - vrlo kompliciran elektronički uređaj koji na ulaz prima AC napon svakakvih frekvencija i onda ga elektronički prilagođava tako da na izlazu daje napon konstantne frekvencije
 - prednosti bi trebale biti one koje uvijek dolaze od elektronike – lakši je, manje se kviri, zahtijeva manje održavanja i ima duži životni vijek – no u stvarnosti ima problema s ovim uređajima i još nisu istisnuli IDG-ove
 - općenito, elektronika je osjetljiva i komplicirani sklopovi se teško nose sa jakim strujama i velikim snagama, a generatori modernih zrakoplova daju i preko 100 kW snage; razvoj elektronike je omogućio da se elektronika i tu primjenjuje, ali i dalje ne bez problema (još je u razvoju)