

Електронен пид регулатор за корабни синхронни генератори

Тодор Лазаров

Proportional-integral-differential regulator of ships synchronous generators: Ship's electrical power systems distinguish themselves with commensurability of the generator and load power which defines the higher requirements of the generator controllers. Generator's excitation systems greatly define stability and work quality of the ship's electric stations. In this paper a new automatic voltage regulator /AVR/ is suggested and designed to work with a compound excitation system. The main characteristics of the ACR are shown and the main characteristics of the investigated system are collected. The gathered experimental results show the effectiveness of work of the suggested controller.

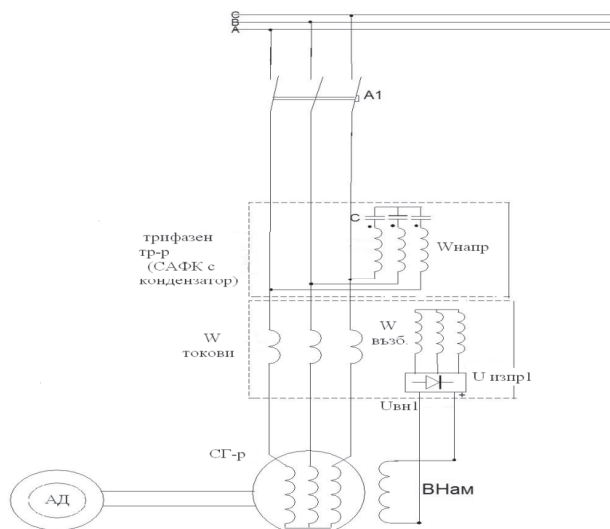
Key words: ship's electrical power system, compound excitation system, automatic volatge regulator, proportional-integral differential regulator, with impulse modulation.

ВЪВЕДЕНИЕ

Корабната електрическа енергия трябва да притежава високо качество и надеждност с цел по-добрата работа на всички системи, които са поставени при изключително тежки условия. В съвременните кораби се използват електронни регулатори на напрежение, които осигуряват тази енергия. На старите кораби системите за възбуждане не отговарят на тези изисквания. С цел осъвременяването им се предлага модернизирание на една от тези системи чрез добавянето на електронен регулатор.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Схемата има вида:



Фиг.1. САФК-Лети

Системата, която разглеждам е тип ЛЕТИ и се използва на учебния генератор тип SSG 5/2 IP22 – 5 kVA; $f = 50 \text{ Hz}$; $U = 390/235 \text{ V}$; $I = 7,4/4,5 \text{ A}$; $n = 3000 \text{ rpm}$; $U_f = 90 \text{ V}$; $I_f = 3,8 \text{ A}$; $R_a = 1,5 \ \Omega$; $R_f = 18,2 \ \Omega$; $X_a = 8,5 \text{ mH}$; $X_f = 518 \text{ mH}$; $x_d' = 0,17 \text{ p.u.}$; $x_d'' = 0,12 \text{ p.u.}$

Компаундиращ трансформатор – трибедрен и на всяко бедро по една напреженова (W_H), токова (W_T) и вторична намотка (Ввъзб). Трансформаторът се насища при токове през $W_T \approx 3 \div 4 I_H$. При I_H трансформаторът е ненаситен и вторичната намотка (Ввъзб) е източник на ток спрямо възбудителната намотка на генератора и не трябва да работи на празен ход.

Компаундиращият елемент C_k е включен последователно в напреженовата намотка W_H като я превръща в източник на ток спрямо възбудителната намотка. Така сигналите на KH и KT се сумират паралелно като токови източници.

$$R_{jeKB} = \frac{R_f \cdot \beta_i}{\beta_U} = \frac{R_f}{1.65} - \text{приведено съпротивление на } HB \text{ към}$$

променливотоковата страна на изправителя. Използвайки принципа на суперпозицията за тока получаваме:

$$I_f = I_{f_u} + I_{f_i} = \frac{K_U \cdot U}{R_{jeKB} - j \cdot K_U^2 \cdot X_C} + \frac{k_I \cdot I(jk_U^2 X_C)}{R_{jeKB} - jX_C k_U^2} \quad (1)$$

Представяме го като модул и фаза:

$$I_f = \frac{K_U \cdot U}{\sqrt{R_{jeKB}^2 + X_C^2 k_U^4}} e^{+j\delta} + \frac{k_I \cdot I X_C k_U^2}{\sqrt{R_{jeKB}^2 + X_C^2 k_U^4}} e^{j\alpha} \quad (2)$$

където ъгъла на компаундиране е:

$$\delta = \arctg \frac{X_C \cdot k_U^2}{R_{jeKB}} \quad (3)$$

$$\alpha = \delta - \varphi - 90^0$$

$I = ie^{-j\varphi}$ - активно индуктивен товар

За да има аритметично сумиране напреженовата намотка W_H се обтича от край към начало т.е. сменяме изводите на трансформатора и получаваме I_{f_u} .

Общият подмагнитващ ток е капацитивен. Схемата осъществява много лесно самовъзбуждане на генератора.

Основен недостатък на схемата е, че при работа под товар – при включването и изключването му – съществуващата схема не поддържа напрежението на генератора съгласно изискванията на Българския Корабен Регистър.

СТРУКТУРА И ПРИНЦИП НА ДЕЙСТВИЕ НА ЕЛЕКТРОННАТА СХЕМА НА КОРЕКТОРА НА НАПРЕЖЕНИЕ

Схема на решаващото устройство

Тя се състои по същество от три функционални блока – сумиращ интегратор, напрежителен компаратор и нискочестотен филтър. Положителното напрежение U_1 е приложено непрекъснато на инвертиращия вход на сумиращия интегратор. При отворен ключ K_1 кондензаторът C_1 се зарежда пропорционално на времето с ток

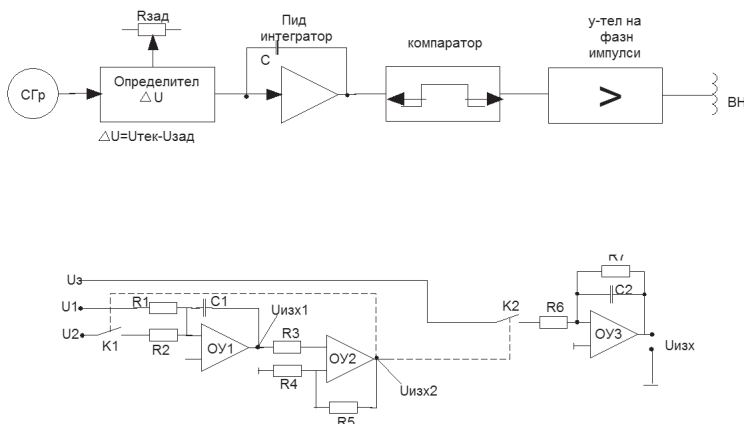
$$I_1 = \frac{U_1}{R_1}. \text{ Вследствие на това изходното напрежение на интегратора } U_{изх1} \text{ спада}$$

линейно от $+U_K$ към $-U_K$ съгласно следната функция на времето:

$$U_{изх1}(t) = -\frac{1}{R_1 C_1} \int U_1 dt + U_K \quad (4)$$

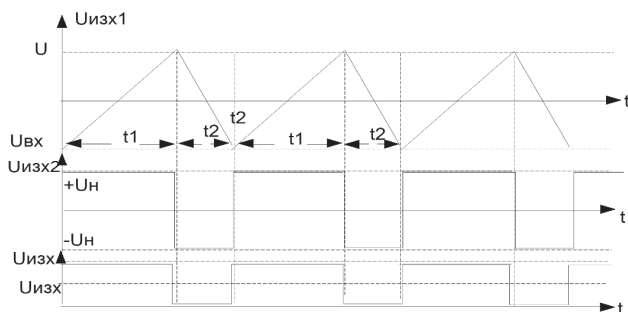
При $t = t_2$ се получава:

$$U_{изх1} = -U_K = \frac{R_4 U_H}{R_4 + R_5} \quad (5)$$



Фиг.2. Блокова схема на електронен коректор към САФК

Изходното напрежение на компаратора $U_{изх2}$ се изменя скокообразно от U_{H-} на U_{H+} (U_{H-} и U_{H+} са съответно отрицателното и положителното напрежение на насищане на усилвателя $ОУ_2$), в резултат на което ключът K_1 (изпълнен например с полеви транзистор) се затваря.



Фиг.3. Графики, обясняващи принципа на работа на коректора на напрежение

По такъв начин към сумиращата точка на интегратора през R_2 се прилага отрицателното напрежение $-U_2$ и при изпълнение на условието $[-U_2] > [U_1]$ започва обратно интегриране съгласно следната функция на времето:

$$U_{изх1}(t) = - \left[\frac{1}{R_1 C_1} \int U_1 dt + \frac{1}{R_2 C_2} \int -U_2 dt \right] - U_K \quad (6)$$

При $t = t_1$ се получава:

$$U_{изх1} = +U_K = \frac{R_4 U_{H+}}{R_4 + R_5} \quad (7)$$

Изходното напрежение на компаратора $U_{изх2}$ се изменя скокообразно от U_{H+} на U_{H-} . В резултат на това ключът $U_{изх2}$ K_1 се отваря и току-що описаният процес може да започне отново. Ако сега в уравнение (4) се положи $U_{изх1}(t_2) = -U_K$, а в уравнение (6) $U_{изх1}(t_1) = +U_K$ и уравненията се решат спрямо t_2 и t_1 , се получават следните изрази:

$$t_2 = \frac{2U_K R_1 C_1}{U_1}, \quad (8)$$

$$t_1 = \frac{2U_K R_2 C_1}{U_2 - U_1}, \quad (9)$$

където $t_2 2U_K$ представлява всъщност напрежението на хистерезиса U_X на компаратора. След това се образува изразът:

$$\frac{t_1}{t_1 + t_2} \quad (10)$$

И в (10) се заместват (8) и (9). Тогава при $R_1 = R_2 = R$ се получава:

$$\frac{t_1}{t_1 + t_2} = \frac{\frac{2U_K R C_1}{U_2 - U_1}}{\frac{2U_K R C_1}{U_2 - U_1} + \frac{2U_K R C_1}{U_1}} = \frac{U_1}{U_2} \quad (11)$$

Следователно коефициентът на запълване $\frac{t_1}{t_1 + t_2}$ е пропорционален на отношението на двете напрежения. Ако синхронно с K_1 се затваря и ключът K_2 , към нискочестотния филтър се прилага в съответствие с коефициента на запълване напрежението U_3 . В най-простия случай е достатъчно да се използва нискочестотен филтър от първи ред, изпълнен с инвертиращ усилвател. При подходящ избор на времеконстантите нискочестотния филтър образува аритметичната средна стойност на приложеното пулсиращо изправено напрежение U_3 . В сила е израза:

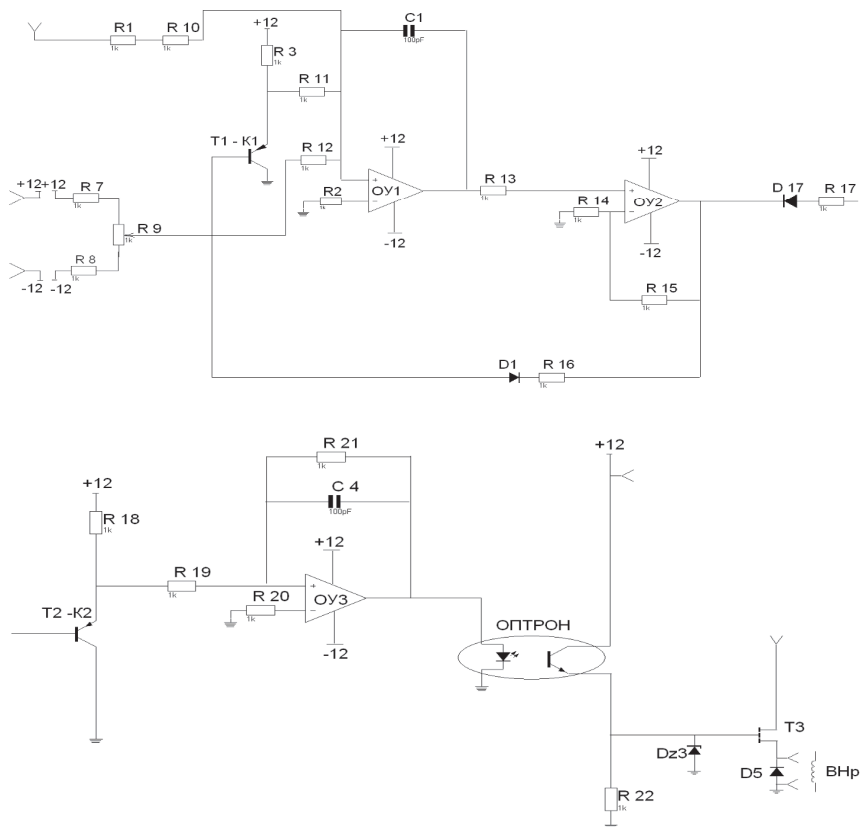
$$U_{изх} = \frac{t_1}{t_1 + t_2} U_2 \quad (12)$$

Следователно съществува линейна зависимост между изходното напрежение $U_{изх}$ и коефициента на запълване. Ако в (7) се замени (6), се получава желаната зависимост:

$$U_{ИЗХ} = \frac{t_1}{t_1 + t_2} U_3 = \frac{U_1 U_3}{U_2} \quad (13)$$

Проектиране на АРВ

Системата е предназначена за възбуждане на синхронен генератор тип SSG 5/2 IP22, като с направените корекции в щатната система се цели достигането на параметрите, изисквани от БКР към източниците на електрическа енергия на корабите.



Фиг.4. Електрическа схема на коректор за напрежение

Електронният коректор на напрежение измерва напрежението на генератора чрез потенциометър R и сигнала от реактивния ток посредством измервателен токов трансформатор ТТрр2, който е включен в една от фазите на генератора. Резултантният сигнал е векторна сума от напрежението на генератора и сигнала от реактивния ток, постъпващ на неинвертиращия вход на сумиращия интегратор – операционен усилвател ОУ1. Еталонното напрежение се сменя от делителя R7- R9 и също постъпва на инвертиращия вход. При отворен ключ K_1 - Тр1 кондензаторът C_1

се зарежда пропорционално на времето с ток $I_1 = \frac{U_1}{R_1}$. Вследствие на това

изходното напрежение на интегратора U_{ux1} спада линейно от $+U_K$ към $-U_K$ и е във функция от времето t .

Изходното напрежение на компаратора U_{ux2} се изменя скокообразно от U_{H-} на U_{H+} (U_{H-} и U_{H+} са съответно отрицателното и положителното напрежение на насищане на усилвателя OY_2), в резултат на което ключът K_1 , изпълнен с транзистор $Tr1$, се затваря.

По такъв начин към сумиращата точка на интегратора през R_2 се прилага отрицателното напрежение $-U_2$ и при изпълнение на условието $[-U_2] > [U_1]$ започва обратно интегриране съгласно функция на времето. Изходното напрежение U_{ux2} на компаратора $OY2$ се изменя скокообразно от U_{H+} на U_{H-} . В резултат на това ключът $K_2 - Tr2$ се отваря и току-що описаният процес може да започне отново.

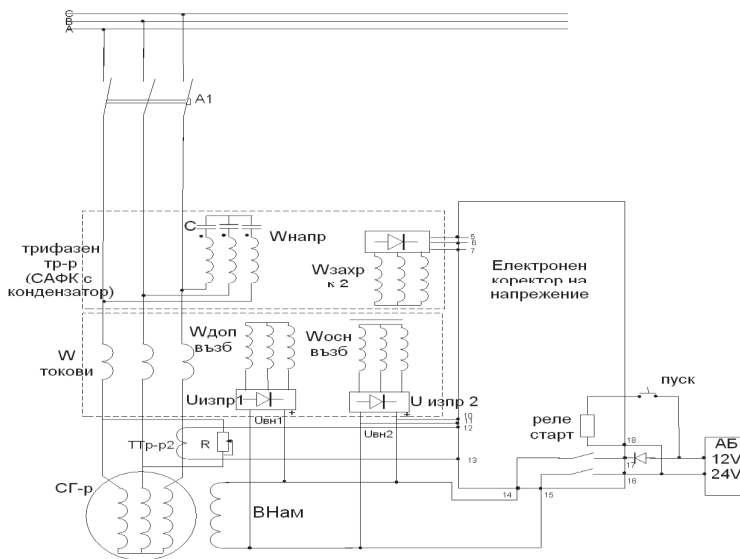
Ако синхронно с $K_1 - Tr1$ се затваря и ключът $K_2 - Tr2$, към нискочестотния филтър се прилага в съответствие с коефициента на запълване напрежението U_3 . В най-простия случай е достатъчно да се използва нискочестотен филтър $OY3$ от първи ред, изпълнен с инвертиращ усилвател.

Напрежението от изхода на филтъра $U_{изх}$ постъпва на оптрона, който разделя електрически електронния коректор от крайното мощно стъпало – полевия транзистор $Tr3$. По този начин електронната схема е защитена от високоволтови пренапрежения, възникващи от възбудителната намотка. Крайното стъпало е изпълнено от полевия транзистор, който е защитен с ценов диод $Dz3$, а успоредно на възбудителната намотка BH е включен обратно високоволтов диод $D5$.

Така коректорът на напрежение измерва напрежението на генератора и сигнала от реактивния ток и регулира напрежението на възбуждане така, че напрежението на генератора да се поддържа с точност не по-малко от 2% като се осигури статизъм (наклон на характеристиката) при реактивно натоварване в границата на споменатите 2%. Коректорът работи по широчинно-импулсен принцип, като регулира ширината на импулсите към крайния транзистор, като по този начин се регулира големината на възбудителния ток. Чрез потенциометъра R на захранващата платка се променя големината на еталонното стабилизирано напрежение, с което се сравнява напрежението на генератора.

Използваните операционни усилватели са от типа 741. За ключовете K_1 и K_2 са използвани силициеви PNP транзистори ($BC 252 A$), които са свързани инверсно с цел да се намали напрежението U_{CEsat} . При показаните стойности на елементите е измерено напрежение $U_{CEsat} \approx 11mV$. Това напрежение въвежда грешка в точността на преобразуване. Ето защо при по-големи изисквания по отношение на точността трябва да се използват полевия транзистори.

След монтажа на електронния коректор схемата добива вида:



Фиг.5. САФК с електронен коректор на напрежение

Работа на празен ход

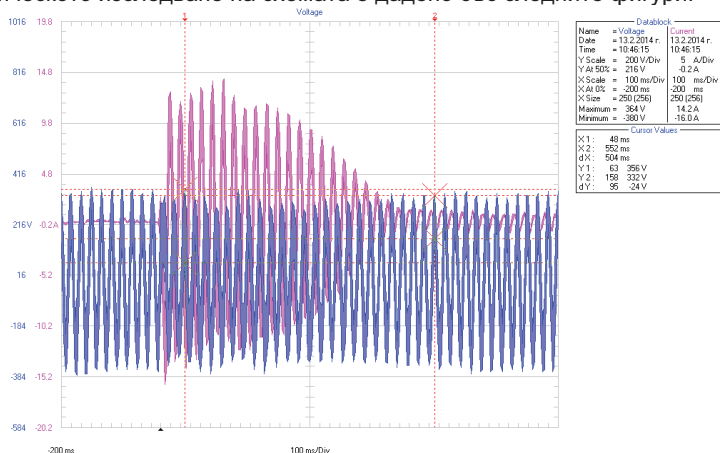
Ако генераторът е бил на ремонт или дълго време не е бил експлоатиран, то остатъчният му магнетизъм спада и не е достатъчен за възбуждането му. С цел повишаване ефективността на възбуждане е предвидена кнопка „**пуск**“, която задейства стартовото реле и от външен акумулатор 12V през изправителен предпазен диод се подава напрежение на възбудителната намотка на генератора. Задължително се спазва поляритетът към намотката на възбуждане означен на съответната клемма. Акумулаторното напрежение осигурява протичане на възбудителен ток в индуктора на генератора, който е напълно достатъчен за започване процес на самовъзбуждане.

По време на нормална експлоатация остатъчната магнитна индукция е достатъчна за стартирането нормалната работа на генератора. Но тъй като електронният коректор се захранва от трансформатор, на който са му необходими 380 V, то е въведена допълнителна намотка $W_{доп..възб.}$ с изправител, която изпълнява функцията на първоначално възбуждане.

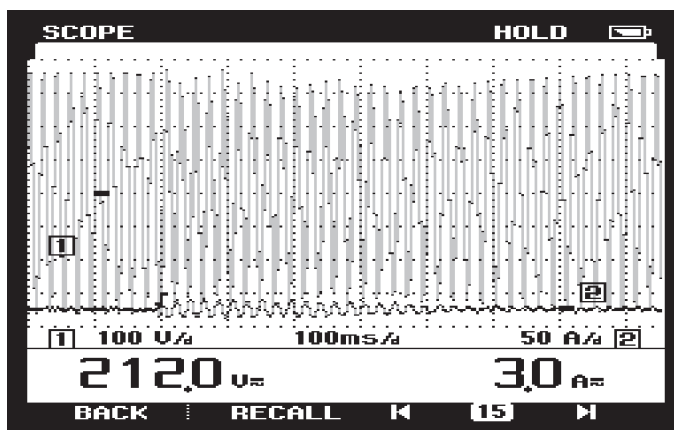
Напреженовата трифазна намотка $W_{напр.}$ е свързана в звезда. В нея протича малък ток, който създава магнитен поток в трансформатора, индуктира е.д.с. във вторичната намотка $W_{доп..възб.}$, протича малък възбудителен ток I_b , който създава малка намагнитваща сила F_b . Тя, от своя страна, увеличава основния магнитен поток Φ_B , който индуктира допълнително е.д.с., в статорните намотки. Токът, който протича през $W_{напр.}$ нараства, но и нараства $I_{възб}$ на възбуждането. В резултат на това започва един лавинообразен процес на възбуждане, като токът се определя от големината на компаундиращия елемент С, в резултат на което генераторът се възбужда $U_r = 400V$ и се създава напрежение достатъчно за захранване коректора на напрежение.

При натоварване на генератора токът на възбуждане се определя от векторната сума на напреженовата и токовата намотка. Токът $I_{\text{възб}}$ се подрегулира допълнително от коректора на напрежение, така че да осигури оказаната точност на поддържане на напрежението. При късо съединение целият ток на възбуждане се определя от токовата намотка на компаундиращия трансформатор $I_{K.C} = 1 \div 5 I_H$, като големината му се определя от насищането на трансформатора.

Практическото изследване на схемата е дадено със следните фигури:



Фиг.6. Ток на възбуждане по време на преходния процес с електронен регулатор- 1.5 пъти по-голяма амплитуда на тока и се подава за 3 пъти по малко време



Фиг.7. Преходен процес - с електронен регулатор има подобрение от 3-5 пъти

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Това е най-простият електронен регулатор, но в замяна на това осигурява изключително висока надеждност.
2. Електронният регулатор позволява да се прилага на генератори с честота 50 и 60 Hz до 440V.
3. Системата позволява влизане на няколко генератора в паралел без уравнителни съединения.
4. Приложим е за различни по мощност генератори след изчисление на трансформатора.
5. Може да се прилага и на брегови системи, които трябва да влизат в паралел с единната енергийна мрежа – напр. на радио-локационни станции, работещи на летищата.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Djagarov N., Lazarov T., Automatic voltage regulator for a ship's synchronous generator, Proceedings of Twelfth International Conference on Marine Science and Technologies, 25-27 September, 2014, Varna, Bulgaria, pp.132-137.

[2] Djagarov N.F., Ship's Electrical Power Systems, Technical University of Varna, 1997, 324 p.

[3] Български корабен регистър, Правила за класификация и строеж на морски кораби, част 7-15, 1986

[4] Вълков, Ст., Аналогова електроника, Техника, 2002

[5] Иванов, А. Ц.р Електрообзавеждане на кораба, част втора, Военно издателство, 1989

[6] Конов, К., Импулсни схеми в радиолюбителската практика, Техника, 1981

[7] Тауърс, Т., Транзистори, техника, 1999

[8] Шишков, Ат., Полупроводникова техника, Деликом, 2000

За контакти:

инж. Тодор Петров Лазаров, Катедра „Електротехника“, Висше военноморско училище „Никола Й. Вапцаров“, тел: 0886 135246, e-mail: todor_lazarov@yahoo.com

Докладът е рецензиран.