

ВИСШЕ ВОЕННОМОРСКО УЧИЛИЩЕ Н. Й. ВАПЦАРОВ ВАРНА
КАТЕДРА ЕЛЕКТРОТЕХНИКА



ТОДОР ПЕТРОВ ЛАЗАРОВ

**РАЗРАБОТКА И ИЗСЛЕДВАНЕ НА АВТОМАТИЧНИ
РЕГУЛАТОРИ ЗА ВЪЗБУЖДАНЕ НА КОРАБНИ
СИНХРОННИ ГЕНЕРАТОРИ СЪС СИСТЕМА ЗА
КОМПАУНДИРАНЕ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
на дисертационен труд
за получаване на образователната
и научна степен **ДОКТОР**

Професионално направление
Транспорт, корабоплаване и авиация

Научна специалност
02.04.15 Електроснабдяване и електрообзавеждане (по отрасли)

Научен ръководител
професор, доктор на техническите науки Н.Ф.Джагаров

В а р н а
2015

Дисертантът работи като асистент в катедра „Електротехника” при факултет „Инженерен” на ВВМУ Н.Й.Вапцаров.

Изследванията по дисертационния труд са извършени в катедра „Електротехника” на ВВМУ Н.Й.Вапцаров.

Дисертационният труд е насочен за защита от съвета на Факултет „Инженерен” при ВВМУ Н.Й.Вапцаров в съответствие с чл.5, ал.1 от ЗРАС.

Автор: Тодор Петров Лазаров

Заглавие: Разработка и изследване на автоматични регулатори за възбуждане на корабни синхронни генератори със система за компаундиране

Тираж: 20 броя

ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА

Корабната електроенергийна система (КЕЕС) трябва да осигурява непрекъснат режим на работа и устойчивост на работа при производството и потреблението на електроенергия. Устойчивото и надеждно функциониране на КЕЕС е възможно единствено при автоматичното ѝ управление, осъществено от комплексни автоматични устройства и системи.

Разработката на различни типове автоматични регулатори на възбуждане (АРВ) е постоянна и актуална задача, тъй като от техни характеристики и тяхната работа зависят устойчивостта на работа на електроенергийните системи и качеството на произвежданата електроенергия.

Корабните електроенергийни системи са автономни системи, имащи специфични характеристики, които повишават изискванията към използваните регулатори. В КЕЕС мощностите на генераторите и товарите са съизмерими, съизмерими са и електромагнитните и механичните времеконстанти на електрическите машини, електроенергията се генерира и консумира без трансформация, разпределителната мрежа е ограничена по размер. Всичко това предизвиква много големи скорости на протичане на преходните процеси и много големи изисквания към регулаторите и системите за управление.

Тъй като са автономни системи, основно изискване към корабните електроенергийни системи е надеждността на работа. Едни от най-надеждните системи за възбуждане, които са се доказали при тяхната дългогодишна експлоатация, са системите за компаундиране. Те съчетават две обратни връзки – по напрежение и по ток на генератора, които се реализират с помощта на трансформатори. Обаче точността на регулиране, която осигуряват, е недостатъчна, затова те работят заедно с различен тип АРВ. Основното изискване и към автоматичните регулатори е също така надеждност. Но не по-малки изисквания са изискванията за точност и бързодействие.

При разработването на автоматични регулатори на възбуждане се използват различни закони за управление, различна елементна база за направата им, различни методи за проектиране и настройка. Именно това е областта на изследване и разработка на дисертационния труд.

Мотивите за написването на дисертацията са свързани с моята практика като инженер в кораборемонтен завод „Флотски арсенал” и

работата ми като асистент в катедра „Електротехника” във ВВМУ Н.Й.Вапцаров, Варна.

В дисертацията се разглежда и разработва част от изброените научни и технически проблеми, а също така и на обучението ми в докторантура във Висшето военноморско училище Н.Й.Вапцаров, Варна.

Обекти на изследването са корабните електроенергийни системи, използващи синхронни генератори със системи за компаундиране в качеството им на възбудители.

Предмети на изследването са автоматичните регулатори на възбуждане, използващи различни закони за регулиране, различни методи за проектиране, изследване и настройка.

В дисертацията са разработени нови регулатори на възбуждане за системи за компаундиране. Те използват пропорционално-интегрално -диференциално регулиране (ПИД).

Съставен е математически модел в статичен режим, свързващ управляемото статорно напрежение с управляващото напрежение на възбуждане. С помощта на метода на Зиглер и Николс са настроени параметрите на регулатора K_P , K_I , K_D .

За проверка на работоспособността и правилността на настройката е създаден математически модел на компаундиращия трансформатор, съставен е модел на КЕЕС и са изследвани преходните процеси в нея.

Проектиран и е създаден физически макет, състоящ се от СГ, система за компаундиране, статичен активно-индуктивен товар, динамичен товар (асинхронен двигател).

Синтезирани са две схеми на АРВ, като те са тествани с помощта на физическия макет. Изследвана е тяхната автономна работа със системата за компаундиране, а така също и използването им като двуканален автоматичен регулатор на възбуждане.

Цел на дисертационната работа е проектиране, изработване и изследване на автоматични регулатори на възбуждане за системи на компаундиране на корабни синхронни генератори.

За да се постигнат целите на изследванията се решават следните основни задачи:

- Класификация и обзор на системите за възбуждане на корабните синхронни генератори;
- Синтез на автоматични регулатори на възбуждане;

- ❑ Съставяне на статичен модел на синхронен генератор, свързващ управляваната величина – статорното напрежение и управляващото величина – напрежението на възбуждане;
- ❑ Избор и настройка на автоматичния регулатор на напрежение с помощта на статичен модел;
- ❑ Създаване на математически модел на компаундиращия трансформатор;
- ❑ Създаване на математически модел на корабна електроенергийна система;
- ❑ Изследване на преходните процеси в КЕЕС при различни смущаващи въздействия и оценка на тяхното качество при различни настройки на АРВ;
- ❑ Синтез и изработка на електронни автоматични регулатори на възбуждане.
- ❑ Изследване на статичните и динамичните режими на работа и качеството на преходните процеси на СГ със система за компаундиране и АРВ.

При изпълнение на формулираните задачи се използват различни методи за изследване и решение на проблемите. Използваните методи и средства за решаване на поставените задачи са широко известни и признати от научната общност, те са използвани квалифицирано и коректно, поради което получените в дисертацията научни резултати са достоверни.

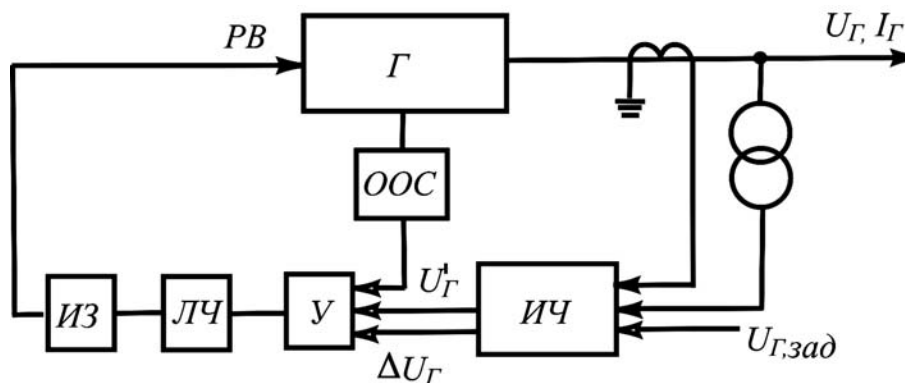
Научната новост на дисертацията се състои в доказване с нови средства на нови страни на вече съществуващи научни области и проблеми, както и създаване на нови схеми и средства.

Дисертационният труд бе разработван в течение на 4 години.

Резултатите на дисертационния труд са публикувани в България (3 публикации) и в чужбина (2 статии в списания). Публикациите бяха докладвани на: Twelfth International Conference of Marine Science and Technologies “Black Sea” 2014, Varna; International Scientific Conference ELMA 2015, Varna. Една публикация е в Научни трудове на Русенски университет, 2015, Русе. Другите две статии са в: Scientific Journal of Riga Technical University “Power and Electrical Engineering”, Vol.33, 2015, Riga, Latvia и Списание «Электротехнические системы и комплексы», №3, 2015, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

Първа глава ОБЗОР НА СИСТЕМИТЕ ЗА ВЪЗБУЖДАНЕ НА КОРАБНИТЕ СИНХРОННИ ГЕНЕРАТОРИ

В корабните електроенергийни системи се използват всички известни типове системи за възбуждане на синхронни генератори.



Фиг.1. Структурна схема на автоматичен регулатор на възбуждане

Системите за възбуждане са автоматични регулатори за възбуждане, състоящи се от следните основни блокове (фиг.1): Γ - генератор; изпълнителен елемент $ИЗ$, извършващ регулиращо въздействие $PВ$; измерваща част $ИЧ$, измерваща напрежението и тока на генератора и заданието за регулиране; $У$ – усилвател; $ЛЧ$ – логическа част.

Регулирането на възбуждането на СГ може да бъде реализирано с помощта на различна елементна база, да бъдат използвани различни закони за управление, да се използват различни входни сигнали.

Използвайки посочените параметри, е направена класификация на системите за възбуждане и са анализирани техните характеристики. Посочени са изискванията към тях по отношение на устойчивост, точност и качество на регулиране.

Съвременните автоматични регулатори за възбуждане с пропорционално действие с определени регулировъчни параметри и диапазон на изменение параметрите на гъвкава обратна връзка осигуряват статичната устойчивост. Разширяване диапазона на статическа устойчивост при тези генератори е възможно за сметка рязко изменение параметрите на гъвкавата обратна връзка. Във всички случаи ефективността на АРВ с пропорционално действие по отношение затишването на електромеханичните колебания е слаба и за повишаването ѝ е необходимо използването на допълнителен блок за стабилизация.

Направено е сравнение на АРВ, използващи различни закони на регулиране, сравнени са техните характеристики и методите им за проектиране.

Посочени са основните функции и характеристики на системите за разпределение на реактивните товари.

Направен е обзор на използваните автоматични регулатори на възбуждане. Разгледани са използваните закони за управление, посочени са предимствата и недостатъците им. Анализирано е използването на различни обратни връзки както по отношение на входните сигнали, така също използваните технически системи. Особено внимание е обърнато на реализацията на използваните закони за регулиране.

Разгледани са използваните методи за проектиране и настройка на автоматичните регулатори на напрежение.

Направен е извод, че системите за компаунддиране, използвани за възбуждане на синхронните генератори, продължават да бъдат най-надеждните системи за възбуждане. Използваните с тях автоматични регулатори на възбуждане позволяват да се подобрят основните им характеристики – точност и бързодействие.

Втора глава СИНТЕЗ НА АВТОМАТИЧЕН РЕГУЛАТОР ЗА ВЪЗБУЖДАНЕ

В корабните енергосистеми се наблюдават слабо затихващи или незатихващи електромеханични колебания при различните режими на работа. Това най-вече се случва, когато генератори са снабдени с автоматични регулатори за възбуждане, използващи принципа на пропорционалното действие, или нестабилизирани АРВ. Такива нискочестотни продължителни незатихващи електромеханични колебания възникват след комутационни превключвания или след плавни изменения режима на работа на системата.

За подтискане на тези нискочестотни колебания се използват различни методи за въздействие чрез възбуждането на генераторите. Същността на търсеното въздействие се състои в това, да се създаде допълнителен демпфиращ момент на вала на генератора. Това се извършва чрез въвеждане на така нареченото силно регулиране, при което в обратните връзки за въздействие се въвеждат сигнали, пропорционални на производните на параметрите на режима на работа, или чрез така наречените системни стабилизатори, които въвеждат допълнителна обратна връзка в контура на възбуждане, която компенсира забавянето в този контур за възбуждане.

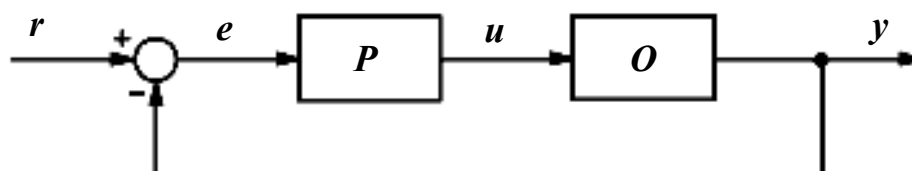
Същият ефект на демпфиране на нискочестотните електро-механични колебания може да се постигне и чрез използване на пропорционално-интегрално-диференциален закон за регулиране в автоматичните регулатори на възбуждане.

В тази глава е направен анализ на влиянието на основните параметри на електроенергийната система върху устойчивостта на работата ѝ, и причините за възникване на колебания в нея.

За еднолинейна електроенергийна система (ЕЕС) са приведени предавателните функции, построени са областите на устойчивост, направени са изводи за границите за устойчивост и за параметрите, влияещи на устойчивостта на системата.

Създаден е физически макет на корабна електростанция, състояща се от синхронен генератор със система за компаундиране и статичен активно-индуктивен товар, а също така и динамичен товар (асинхронен двигател). Експериментално са определени основните параметри и са построени основните характеристики на генератора, необходими за проектиране и изследване на автоматични регулатори за възбуждане.

ПИД-регулаторите са най-разпространени поради простотата си и възможността да реши повечето задачи за управление на ниска цена. Избрано е пропорционално-интегрално-диференциално регулиране за разработваните автоматични регулатори за възбуждане. Направен е обзор на ограниченията и типичните задачи на регулиране.



Фиг.2. ПИД-регулатор в система с обратна връзка

На фиг.2 е показана схемата на ПИД-регулатор в система с обратна връзка, в която P - регулатор, O - регулируем обект, e - отклонение (грешка) на регулируемата величина, u - управляващо въздействие на регулатора, y - регулируема величина.

Управляващото въздействие на ПИД-регулатора е:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_I \cdot \int_0^t e(t) dt + K_D \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

където: t - време; K_P, K_I, K_D - коефициенти на усилване на пропорционалната, интегралната и диференциалната съставки на ПИД-регулатора.

Въпреки прогреса в автоматичното управление остават проблемите, свързани с отстраняване на интегралното насищане, с регулирането на обекти с хистерезис и други нелинейности, с автоматичната настройка и адаптация. Практически използването на ПИД контролери не използва филтри, има голям шум и външни смущения, които затрудняват настройката на параметрите му. Проблемите се усложняват от това, че не е известна динамиката на управляемия обект, регулируемите процеси не са независими, в измерваните параметри има шум, товарът се изменя.

Използват се няколко метода за настройка на контролерите. Има и методи за автоматична настройка на контролерите в реално време. При наличие на модел на управляемия обект могат да се използват различни методи за проектиране при определяне на параметрите на контролера, осигуряващи добри характеристики на затворената система за управление в статични и динамични режими на работа. При липса на модел на обекта може да се използват експериментални методи за настройка на контролерите.

Разгледани са различните методи за настройка на ПИД контролери: невронни мрежи, размита логика, генетични и други оптимизационни методи. Методите за настройка могат да бъдат класифицирани по следния начин:

1. *Теоретична настройка.* Необходимо е да са известни структурата, характеристиките на компонентите (предавателните функции) на управляемата система. След това се изчислява предавателната функция на системата, с помощта на която се определя качеството на преходните процеси, точността и др. Т.е. пресмятат се оптималните коефициенти на регулатора. Практически всичко е много трудно. Основен проблем е получаването на адекватен модел на системата, в който са отчетени всички нелинейности, случайности и др.

2. *Инженерна настройка.* Необходим е физически макет за изпитание, система за връзка с компютъра, осцилограф и други измервателни прибори. На входа на системата се подават стъпаловидни въздействия и се анализира реакцията на системата. Тази реакция се нарича преходна функция, с помощта на която се подбират коефициентите на регулатора.

3. *Реална настройка.* Коефициентите се определят чисто по експериментален начин с помощта на физическия макет. Коефици-

ентите се изменят дотогава, докато системата не реагира на входните въздействия по начин, който ни удовлетворява.

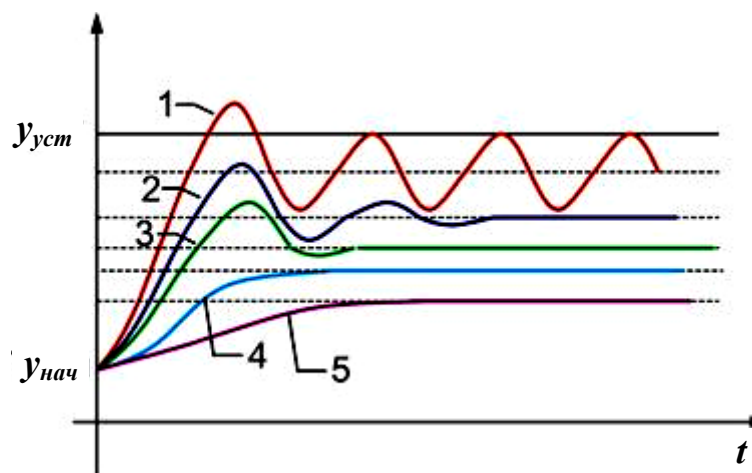
Избран е методът на Зиглер и Николс за настройка параметрите на ПИД регулатора K_P , K_I , K_D .

За целта е получен модел на синхронния генератор вход-изход: напрежение на възбуждане – напрежение на статора:

$$T_{d0} \cdot \frac{dE'}{dt} - T_{d0} \cdot (x_d - x_d') \cdot \frac{dI}{dt} \cdot \sin \psi + E = U_f \quad (2)$$

където: E – е.д.н.; E' – преходно е.д.н.; I – ток; T_{d0} - времеконстанта на възбудителната намотка на празен ход; x_d - надлъжно индуктивно съпротивление; x_d' - надлъжно преходно индуктивно съпротивление; U_f - напрежение на възбуждане.

С помощта на модела (2), свързващ напрежението на възбуждане с динамиката на синхронния генератор, се настройват коефициентите на ПИД регулатора. Отначало се настройва K_P , след това K_I , и накрая K_D . Правилността на настройката на всеки коефициент се определя в зависимост от реакцията на входното смущение, т.е. преходните характеристики (фиг.3).

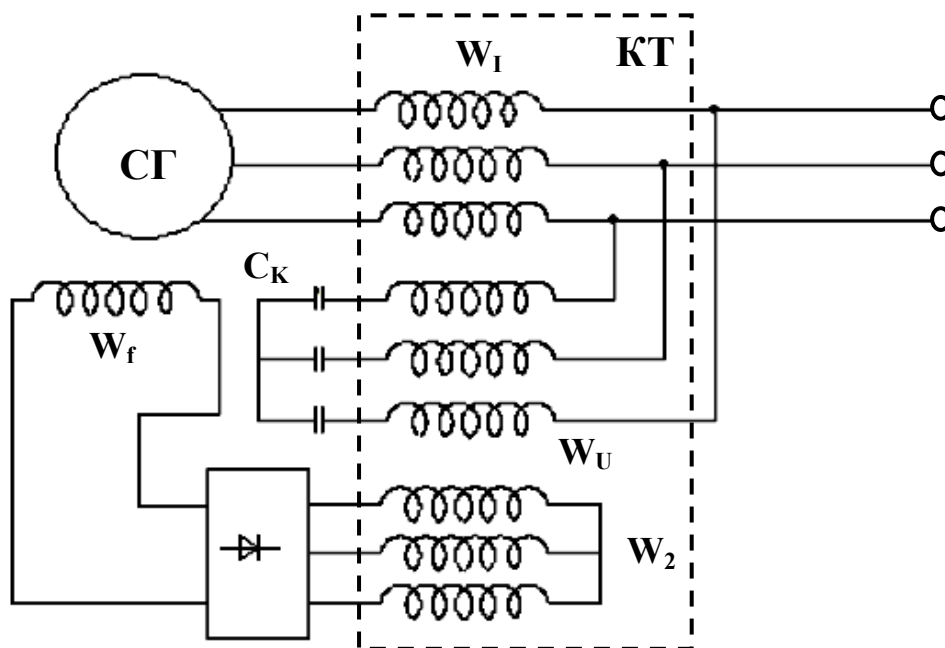


Фиг.3. Възможни преходни характеристики

В резултат на извършените експерименти, се получиха следните коефициенти на ПИД регулатора: $K_P = 1,5$, $K_I = 0,5$, $K_D = 0,1$.

Трета глава. ИЗСЛЕДВАНЕ РАБОТАТА НА АВТОМАТИЧНИЯ РЕГУЛАТОР НА ВЪЗБУЖДАНЕ ЧРЕЗ МАТЕМАТИЧЕСКО МОДЕЛИРАНЕ

Математическото моделиране се използва за изследване на процесите в електроенергийните системи (ЕЕС). Получените резултати служат при проектирането на регулаторите и защитата на елементите на ЕЕС, на системите за управление и анализа на преходните процеси и устойчивостта на работа на системите.



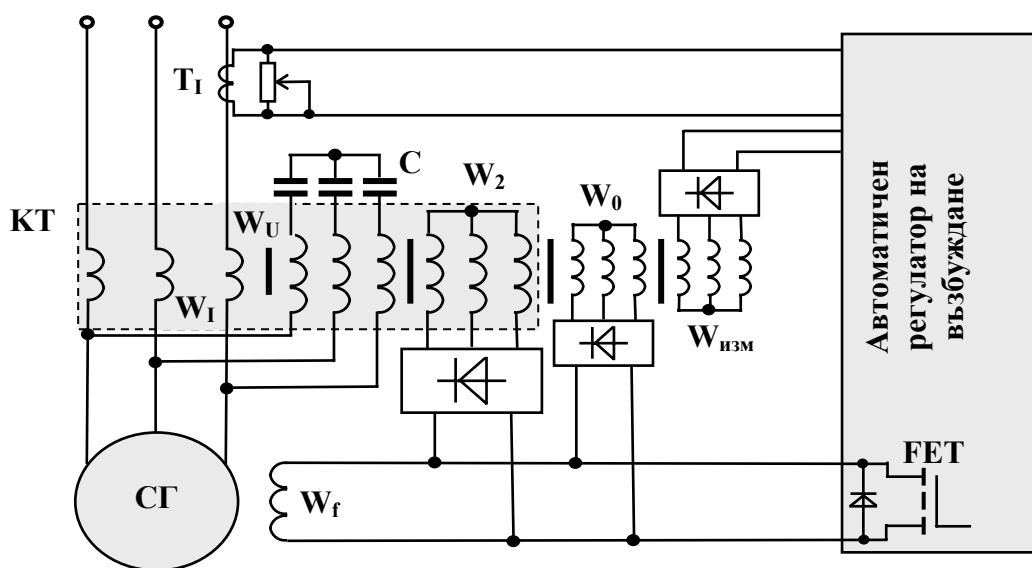
Фиг.4. Схема на трифазния компаундиращ трансформатор

При съставянето на математическите модели в дисертацията се използват безитеративните методи за пресмятане на преходни процеси. Същността на тези методи се състои в изключване на производните на променливите на състоянието от уравненията на разпределителната мрежа и изчисляване на възловите напрежения чрез алгебрична система уравнения. Благодарение на този подход се получават безитеративни алгоритми за пресмятане на преходните процеси, имащи огромно предимство по сравнение с използваните конвенционални методи.

Системите за компаундиране (фиг.4) осъществяват регулиране напрежението на СГ с обратна връзка по напрежение (W_U) и ток (W_I) на статора. Контурът по напрежение осигурява режимът на празен ход, а контурът на ток компенсира размагнитващата реакция на тока на статора. За осигуряване на необходимата точност на поддържане на напрежението се използва допълнителна обратна връзка по отк-

лонение на напрежението, осъществявана от автоматичен регулатор на напрежение (АРВ).

На фиг.5 е показана схемата на компаундиране и автоматичния регулатор на възбуждане (АРВ). Компаундиращият трансформатор КТ освен основните намотки (на напрежение W_U , на ток W_I , и вторична W_2) има още две: W_0 – за начално възбуждане и $W_{изм}$ - измервателна. Изпълнителен орган на АРМ е транзисторът FET, който се управлява чрез широчинно-импулсна модулация и който шунтира част от възбудителния ток, осигуряван от трансформатора на компаундиране.



Фиг.5. Схема на системата за компаундиране и автоматичен регулаторна възбуждане

При моделиране на процесите в КЕЕС обикновено представят системата за компаундиране чрез алгебрични съотношения на сумиране на сигналите от каналите на напрежение и ток. Обаче по време на преходните процеси компаундиращият трансформатор проявява форсиращи свойства, увеличавайки възбудителното напрежение на СГ до максималната му стойност. Затова е необходимо да се отчете динамиката на трансформатора, която подобрява регулирането на напрежението.

Създаден е нов модел на трансформатора за компаундиране, отчитащ динамиката му. Системата уравнения (3) показва модела на трансформатора във фазна координатна система a, b, c в матричен вид:

$$\left. \begin{aligned}
U_{abc,U} &= r_U \cdot I_{abc,U} + \frac{d}{dt} \Psi_{abc,U} + U_{abc,C}; \\
U_{abc,2} &= r_2 \cdot I_{abc,2} + \frac{d}{dt} \Psi_{abc,2}; \\
U_{abc,C} &= \frac{1}{C_\kappa} \cdot \int I_{abc,U}
\end{aligned} \right\} \quad (3)$$

В матричен вид системата уравнения, свързваща потокосцепленията и токовете, ще бъде:

$$\left. \begin{aligned}
\Psi_{abc,U} &= m_U \cdot I_{abc,U} + m_{U2} \cdot I_{abc,2} + m_{UI} \cdot I_{abc,I}; \\
\Psi_{abc,2} &= m_2 \cdot I_{abc,2} + m_{2U} \cdot I_{abc,U} + m_{2I} \cdot I_{abc,I}
\end{aligned} \right\} \quad (4)$$

След преобразуване (3) и (4) в оси $d, q, 0$, ще получим:

$$\left. \begin{aligned}
U_{dq,U} &= r_U \cdot I_{dq,U} + \frac{d}{dt} \Psi_{dq,U} \mp \omega_k \cdot \Psi_{qd,U} + U_{dq,C}; \\
U_{dq,2} &= r_2 \cdot I_{dq,2} + \frac{d}{dt} \Psi_{dq,2} \mp \omega_k \cdot \Psi_{qd,2}; \\
U_{dq,C} &= \frac{1}{C_\kappa} \cdot \int I_{dq,U}
\end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned}
\Psi_{dq,U} &= m_U \cdot I_{dq,U} + m_{U2} \cdot I_{dq,2} + m_{UI} \cdot I_{dq,I}; \\
\Psi_{dq,2} &= m_2 \cdot I_{dq,2} + m_{2U} \cdot I_{dq,U} + m_{2I} \cdot I_{dq,I}
\end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Замествайки (6) в (5) и преобразувайки по отношение на производните, ще получим модела на трансформатора:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{dq,U} \\ I_{dq,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{UU} & A_{U2} \\ A_{2U} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dq,U} \\ I_{dq,2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{UU} & B_{U2} & B_{UC} \\ B_{2U} & B_{22} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{dq,U} \\ U_{dq,2} \\ U_{dq,C} \end{bmatrix}; \quad (7)$$

където: елементите на матрици A_{ij} и B_{ij} са функции на параметрите на намотките на трансформатора, ъгловата скорост на въртене на координатната система $d, q, 0$ - ω_k и компаундиращия елемент C_κ .

Напрежението на вторичната намотка на трансформатора се намира чрез първия закон на Кирхоф в диференциална форма:

$$\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{d}{dt} i_f + \frac{d}{dt} \sqrt{i_{d2}^2 + i_{q2}^2} = 0 \quad (8)$$

$$\text{където: } \frac{d}{dt} i_f = \frac{1}{l_f} u_f - \frac{r_f}{l_f} i_f; \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \mathbf{I}_{dq,2} &= \\ &= \mathbf{A}_{2U} \cdot \mathbf{I}_{dq,U} + \mathbf{A}_{2I} \cdot \mathbf{I}_{dq,I} + \mathbf{A}_{22} \cdot \mathbf{I}_{dq,2} + \mathbf{B}_{2U} \cdot \mathbf{U}_{dq,U} + \mathbf{B}_{22} \cdot \mathbf{U}_{dq,2} \end{aligned} \quad (10)$$

След заместване на производните в (8) чрез десните части на диференциалните уравнения (9) и (10), ще се получи система алгебрични уравнения за изчисление на напрежението на вторичната намотка на трансформатора $\mathbf{U}_{dq,2}$.

Напрежението на клемите на СГ се изчислява с помощта на първия закон на Кирхоф в диференциална форма:

$$m^{\Gamma} \cdot \frac{d}{dt} \mathbf{I}_{s,dq}^{\Gamma} + m^T \cdot \frac{d}{dt} \mathbf{I}_{dq}^T = 0; \quad (11)$$

където: $m^{\Gamma} = 1$, $m^T = S^T / S^{\Gamma}$ - мащабни коефициенти; S^{Γ} , S^T - съответно мощност на генератора и товара.

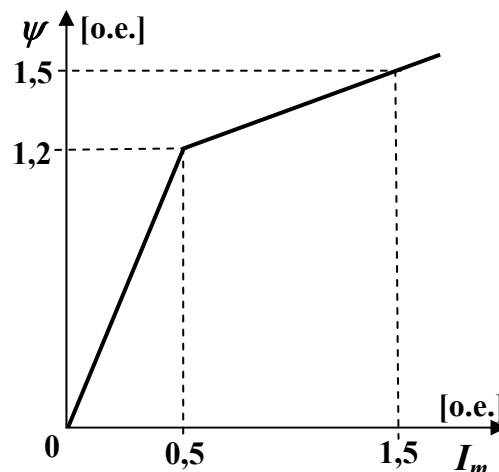
След заместване на производните в (11) чрез десните части на (13), (14) и преобразуване по отношение на неизвестния вектор на напрежение на СГ, ще се получи следната алгебрична система уравнения:

$$\mathbf{U}_{CG} = - \frac{\mathbf{H}_s^{\Gamma} + \mathbf{B}_{sr}^{\Gamma} \cdot u_f + m_T \cdot \mathbf{H}^T}{\mathbf{B}_{ss}^{\Gamma} + m_T \cdot \mathbf{B}^T}. \quad (12)$$

Отчитане на насищането на компаундиращия трансформатор

Основната нелинейност е насищането на стоманата на магнитопровода, която превишава другите нелинейности – хистерезиса и вихровите токове. Затова използваме апроксимация на кривата на насищане на компаундиращия трансформатор чрез две прави (фиг.6).

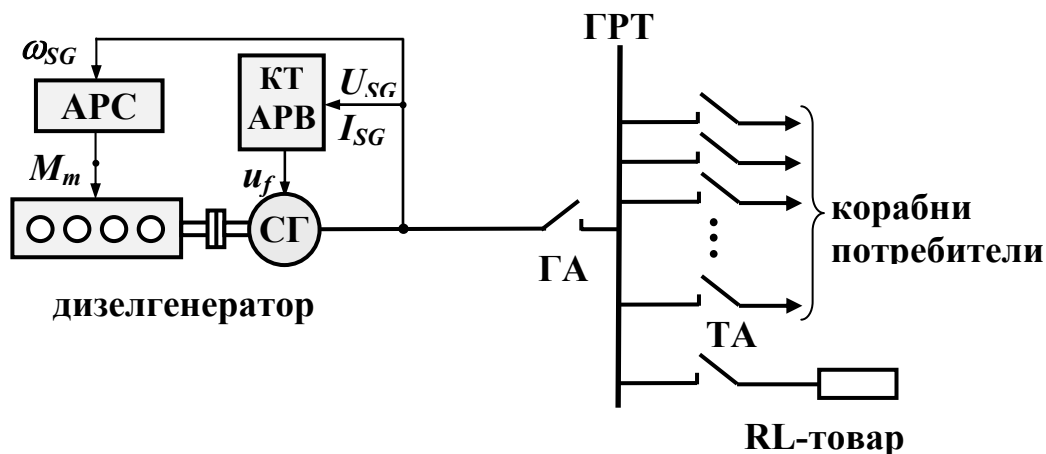
Математическият модел на автоматичния регулатор на въз-



Фиг.6. Крива на насищане на трансформатора

буждане е реализиран в среда Matlab и той регулира напрежението на генератора, съгласно (1).

На фиг.7 е показана схемата на изследваната електроенергийна система, която съдържа дизелгенератор с автоматичен регулатор на скорост APC, компаундиращ трансформатор с автоматичен регулатор на възбуждане КТ и APB. СГ през генераторния автомат ГА захранва корабните потребители, включващи активно-индуктивен товар.



Фиг.7. Изследвана корабна електроенергийна система

В матрична форма моделът на СГ ще има следния вид:

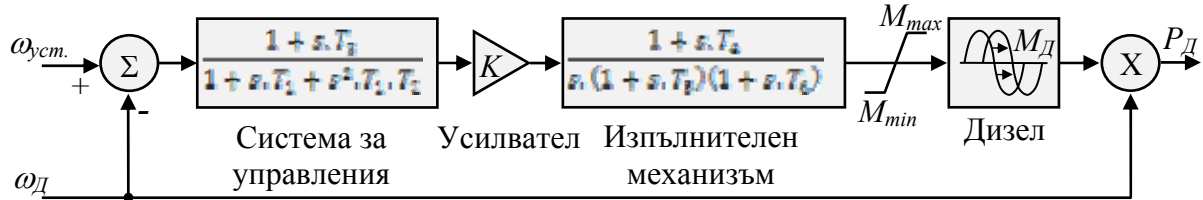
$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix}_\Gamma &= \begin{bmatrix} A_{ss} & A_{sr} \\ A_{rs} & A_{rr} \end{bmatrix}_\Gamma \cdot \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix}_\Gamma + \begin{bmatrix} B_{ss} & B_{sr} \\ B_{rs} & B_{rr} \end{bmatrix}_\Gamma \cdot \begin{bmatrix} U_{ГРЩ} \\ u_f \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} H_s \\ H_r \end{bmatrix}_\Gamma + \begin{bmatrix} B_{ss} & B_{sr} \\ B_{rs} & B_{rr} \end{bmatrix}_\Gamma \cdot \begin{bmatrix} U_{ГРТ} \\ u_f \end{bmatrix}; \end{aligned} \quad (13)$$

$$\frac{d}{dt} \omega_k = \frac{1}{\tau_m} (M_D + M_\Gamma); \quad (13)$$

където: индекси s и r се отнасят съответно за статорните и роторните променливи и параметри; M_D - момент на дизела; M_Γ - момент на генератора; τ_m - механична константа на дизела и генератора; u_f - напрежение на възбуждане; $U_{ГРТ}$ - вектор на напрежение на главно разпределително табло; елементите на матрици A и B са функции на статорните и роторните активни и индуктивни съпротивления и скоростта на въртене ω_k на генератора (скорост на въртене на осите $d, q, 0$);

$$\mathbf{I}_s^\Gamma = \begin{bmatrix} i_d^\Gamma \\ i_q^\Gamma \end{bmatrix}; \mathbf{I}_r^\Gamma = \begin{bmatrix} i_f \\ i_g \\ i_h \end{bmatrix}; \mathbf{H}_s^\Gamma = \begin{bmatrix} h_d^\Gamma \\ h_q^\Gamma \end{bmatrix}; \mathbf{B}_{ss}^\Gamma = \begin{bmatrix} b_{11}^\Gamma & 0 \\ 0 & b_{22}^\Gamma \end{bmatrix}; \mathbf{U}_{ГРТ} = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix}.$$

На фиг.8 е показана блок-схемата на модела на дизела и автоматическия му регулатор на скорост.



Фиг.8. Блок-схема на дизела и автоматическия му регулатор на скорост

Модел на симетричен статичен активно-индуктивен товар:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & 0 \\ 0 & b_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \\ &= \frac{d}{dt} \mathbf{I}^\Gamma = \mathbf{A}^\Gamma \cdot \mathbf{I}^\Gamma + \mathbf{B}^\Gamma \cdot \mathbf{U}_{ГРТ} = \mathbf{H}^\Gamma + \mathbf{B}^\Gamma \cdot \mathbf{U}_{ГРТ} \end{aligned} \quad (14)$$

където: a_{ij} и b_{ij} - функции на активно-индуктивния товар и ъгловата скорост на въртене на координатната система d, q, θ - ω_k ;

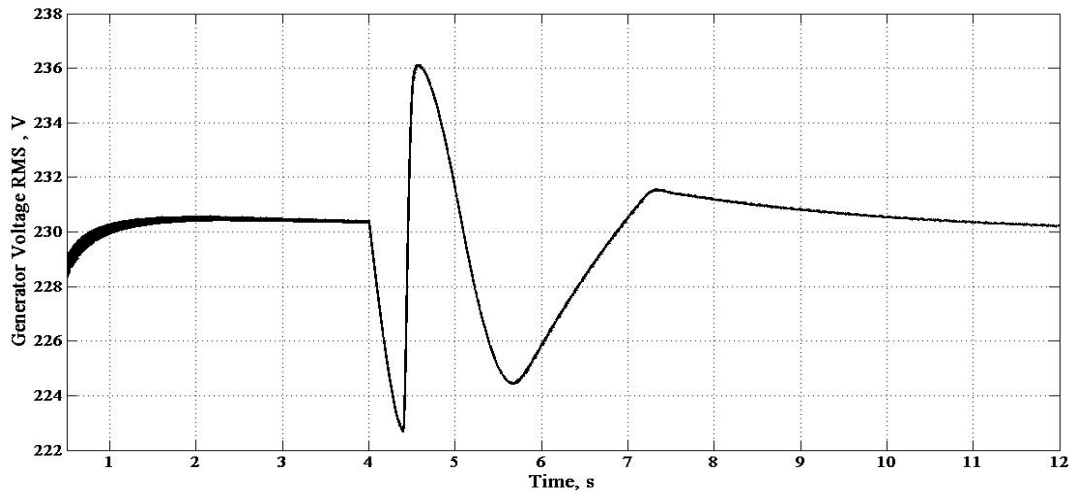
$a_{11} = a_{22} = -\frac{r_T}{l_T}$; $a_{12} = -a_{21} = \omega_k$ $b_{11} = b_{22} = \frac{l}{l_T}$; r_T, l_T - активно и индуктивно съпротивление на товара.

Използва се моделът на трифазен неуправляем изправител от пакета SimPowerSystems на програмната среда Matlab.

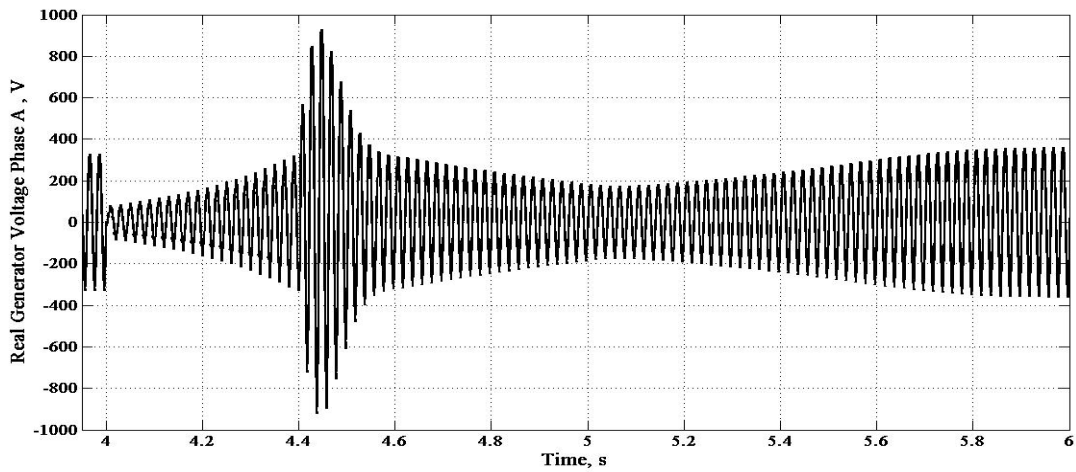
Като автоматичен регулатор на напрежение се използва пропорционално-интегрално-диференциален регулатор със следните коефициенти на усилване $K_P = 1,5$, $K_I = 0,5$, $K_D = 0,1$.

С помощта на създадения модел на корабна електроенергийна система бяха изследвани различни преходни режими, предизвикани от различни смущаващи въздействия в среда Matlab. По-долу е показана част от получените резултати. Бе симулирано късо съединение (к.с.) в системата чрез въвеждане на съпротивлението на късо съединение $R_{к.с.} = 0,25\Omega$, $L_{к.с.} = 0,5H$ в момент на време $t = 4\text{ sec}$, и изключването му от защитата при $t = 4,4\text{ sec}$.

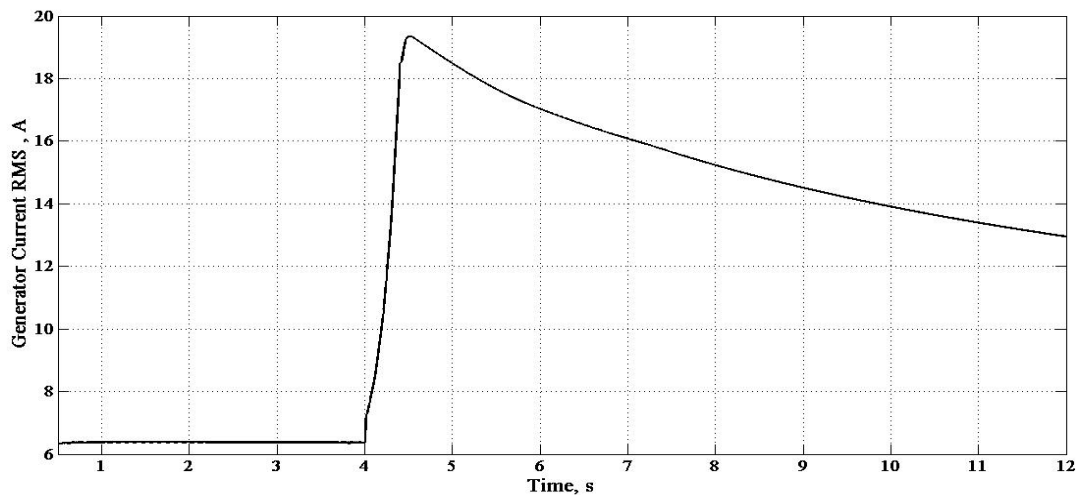
Показана е част от осцилограмите на изменение на съответните променливи на състоянието.



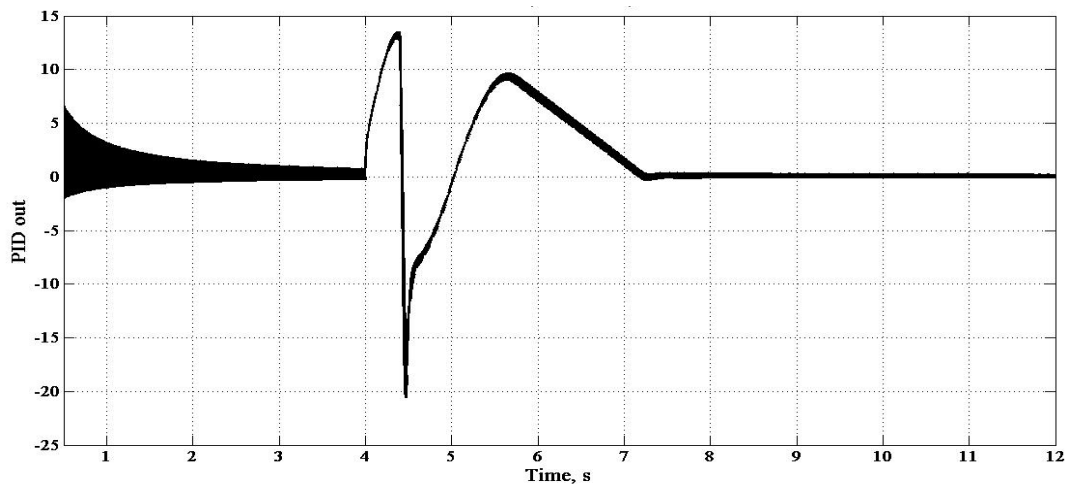
Фиг.9. Ефективна стойност на напрежението на синхронния генератор (ГРТ)



Фиг.10. Фазна стойност на напрежението на синхронния генератор (ГРТ)



Фиг.11. Ефективна стойност на тока на синхронния генератор



Фиг.12. Изходен сигнал на автоматичния
на ПИД регулатор на възбуждане

При съставянето на математическите модели в дисертацията се използват безитеративни методи за пресмятане на преходни процеси, като получените резултати служат при проектирането и настройката на разработвания АРВ.

Създаден е математически модел на компаундиращия трансформатор, отчитащ електромагнитните връзки на намотките и неговото насищане.

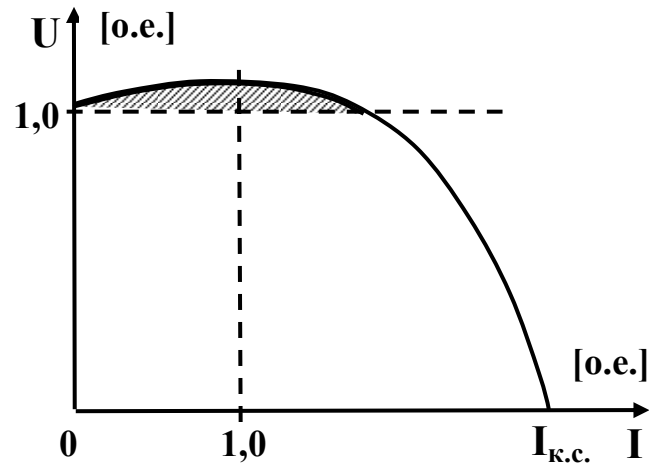
Създаден е математически модел на корабна електроенергийна система, с помощта на който са изследвани преходни процеси, предизвикани от различни смущаващи въздействия. Получените експериментални резултати показват адекватността на създадените модели.

С помощта на моделите е направена проверка на точността на настройките на синтезираните автоматични регулатори на напрежение.

Четвърта глава РАЗРАБОТКА НА АВТОМАТИЧНИ РЕГУЛАТОРИ ЗА ВЪЗБУЖДАНЕ

Компаундиращ трансформатор е проектиран да осигури напрежение по-голямо от номиналното при изменение товара от празен ход до номинален, а също така и траен ток на късо съединение, необходим да осигури селективността на защитата (фиг.13). Автоматичният регулатор на възбуждане отбира „излишното” напрежение (мощност) – защрихованата област.

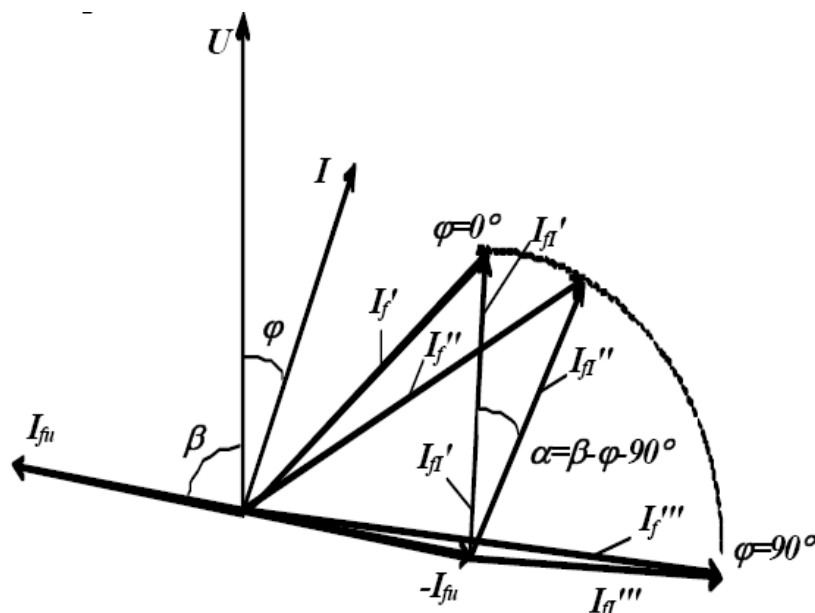
Компаудираният елемент C_k е включен последователно с намотката на напрежение W_H , като я превръща в източник на ток спрямо възбудителната намотка. Така сигналите на KH и KT се су-



Фиг.13. Външна характеристика на синхронния генератор

мират паралелно като токови източници.

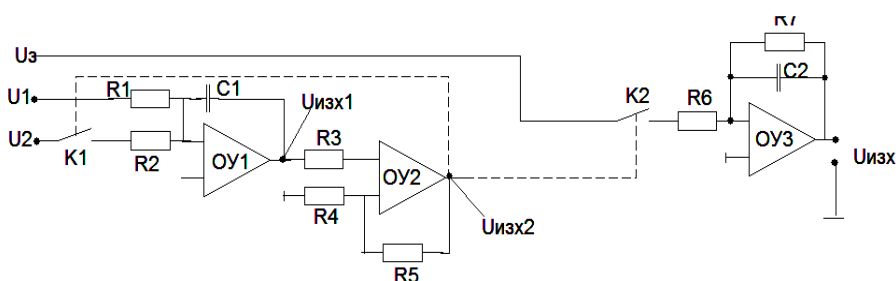
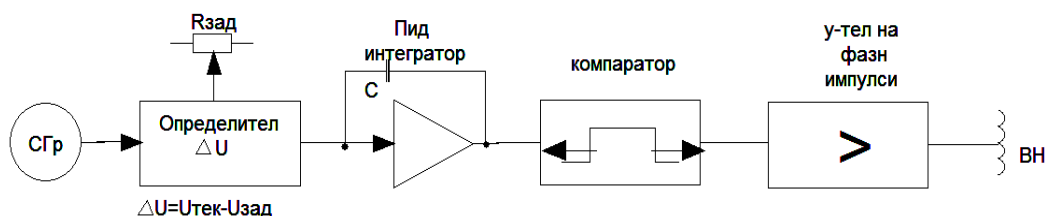
На фиг.14 е показана векторната диаграма на сумиране на сигналите на намотките на KT : $W_U \rightarrow I_{fU}$, $W_I \rightarrow I_{fI}$, при изменение на характера на товара.



Фиг.14. Векторна диаграма на сумиране на сигналите на намотките на KT : $W_U \rightarrow I_{fU}$, $W_I \rightarrow I_{fI}$, при изменение на

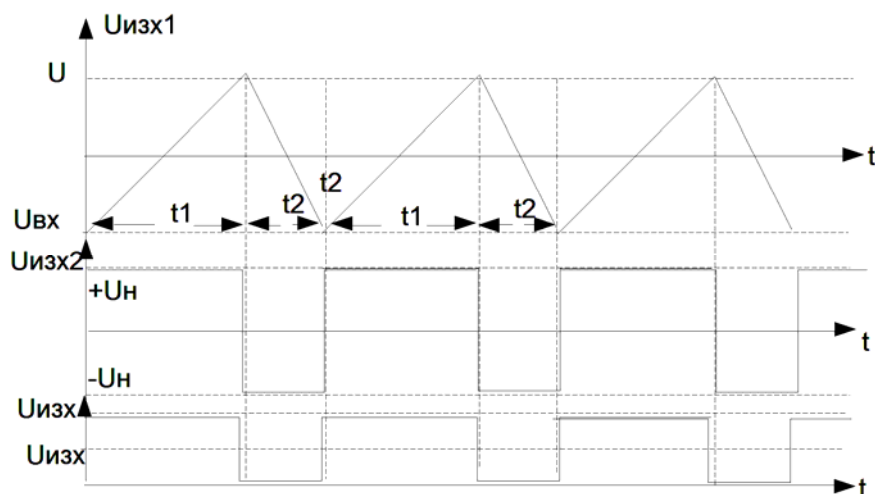
На фиг.15 е показана блок-схема и електронна схема на ПИД регулиране на първия регулатор АРВ1. Схемата на решаващото уст-

ройство се състои по същество от три функционални блока – сумиращ интегратор, компаратор на напрежение и нискочестотен филтър. Положителното напрежение U_1 е приложено непрекъснато на инвертиращия вход на сумиращия интегратор.



Фиг.15 Блок-схема и електронна схема ПИД регулиране на АРВ1

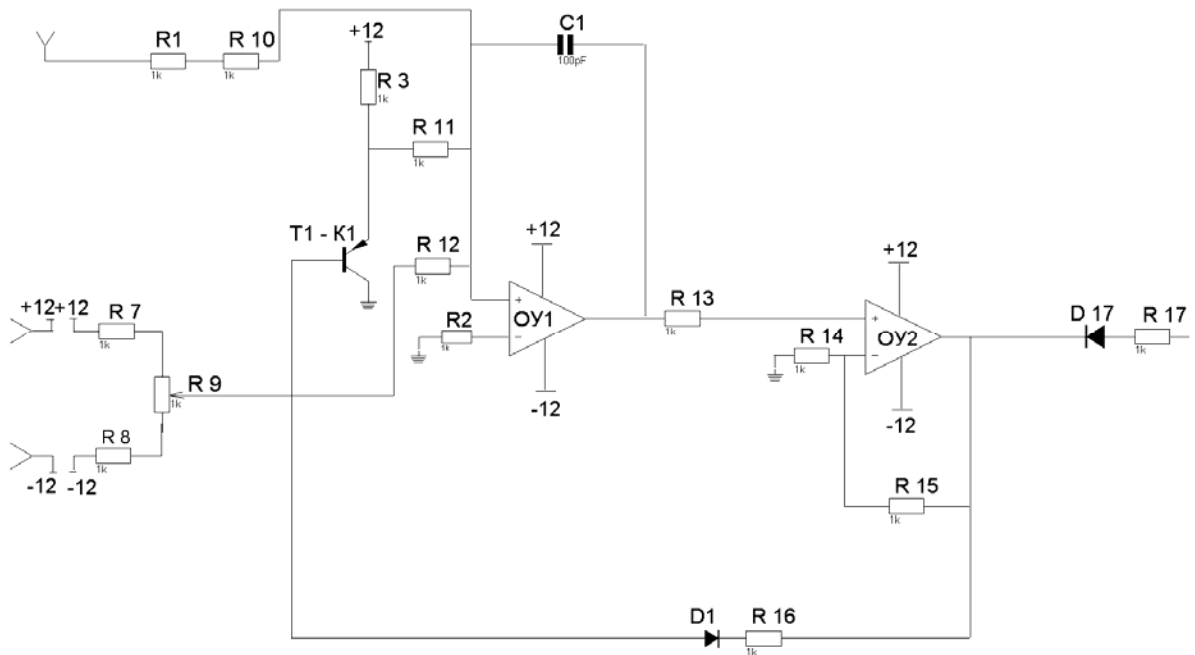
На фиг.16 са показани времедиаграмите, обясняващи принципа на работа на автоматичния регулатор на възбуждане.



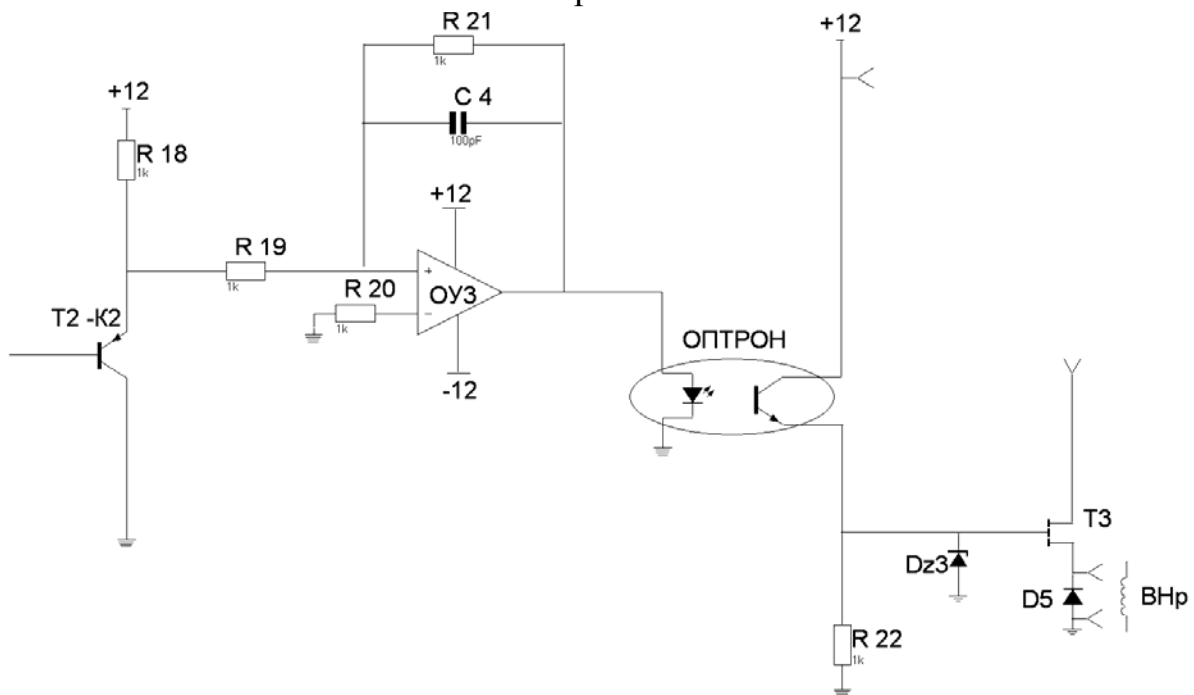
Фиг.16. Времедиаграми, обясняващи принципа на работа на автоматичния регулатор на възбуждане

На фиг.17. е показана електрическата схема на автоматичния регулатор на напрежение АРВ1.

АРВ1 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. Напрежението на заданието се сема от делителя $R7$ - $R9$ и също пос-



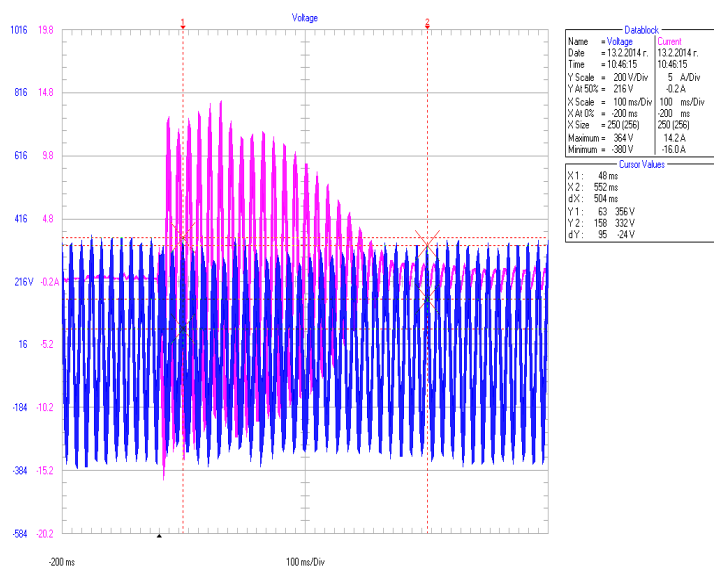
Фиг.17. Електрическа схема на автоматичния регулатор на напрежение АРВ1



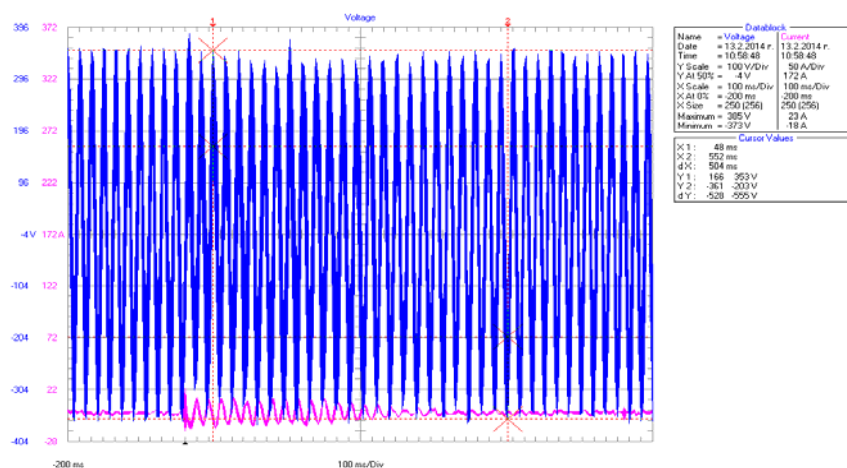
тъпва на инвертиращия вход.

АРВ1 е най-простият от създадените регулатори на напрежение, но той осигурява много висока надеждност. Електронният регулатор има възможност да се използва за синхронни генератори с номинална честота 50 и 60 Hz с напрежение до 440 V. Регулаторът има канал за разпределение на реактивните товари при паралелна работа с други генератори, позволяващ да се разпределят товарите с точност 2%, което е по-точно от изискванията от корабните регистри.

Регулаторът може да се използва за синхронни генератори със система за възбуждане с различна мощност. Възможно е използването му и за брегови синхронни генератори.



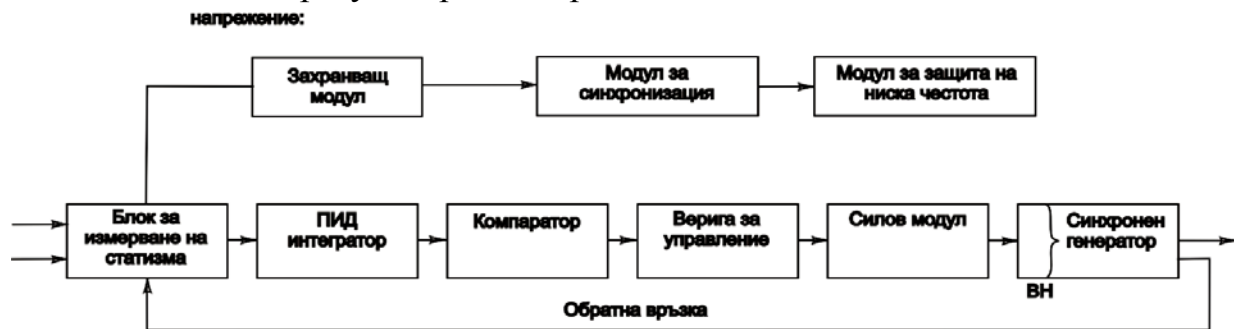
Фиг.18. Ток на възбуждане по време на преходния процес с АРВ1



Фиг.19. Напрежение на статора СГ при работа АРВ1

Бяха извършени тестови изпитания на физическия макет, снабден с АРВ1. Част от експерименталните резултати е показана на осцилограмите, показани на фиг.18 и фиг.19.

Бе разработена и втора схема на електронен автоматичен регулатор на напрежение АРВ2. На фиг.20 е показана блок схемата на автоматичния регулатор на напрежение АРВ2



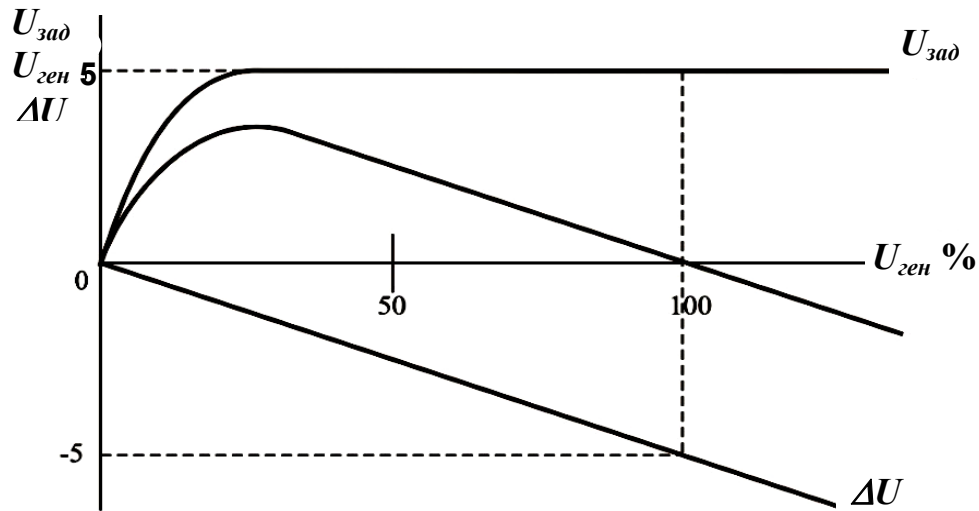
Фиг.20. Блок схема на автоматичен регулатор на напрежение АРВ2

Схемата се състои от следните модули: захранващ модул; блок за измерване и настройка на статизма; ПИД регулатор; силов модул; модул за управление; модул за защита по ниска честота.

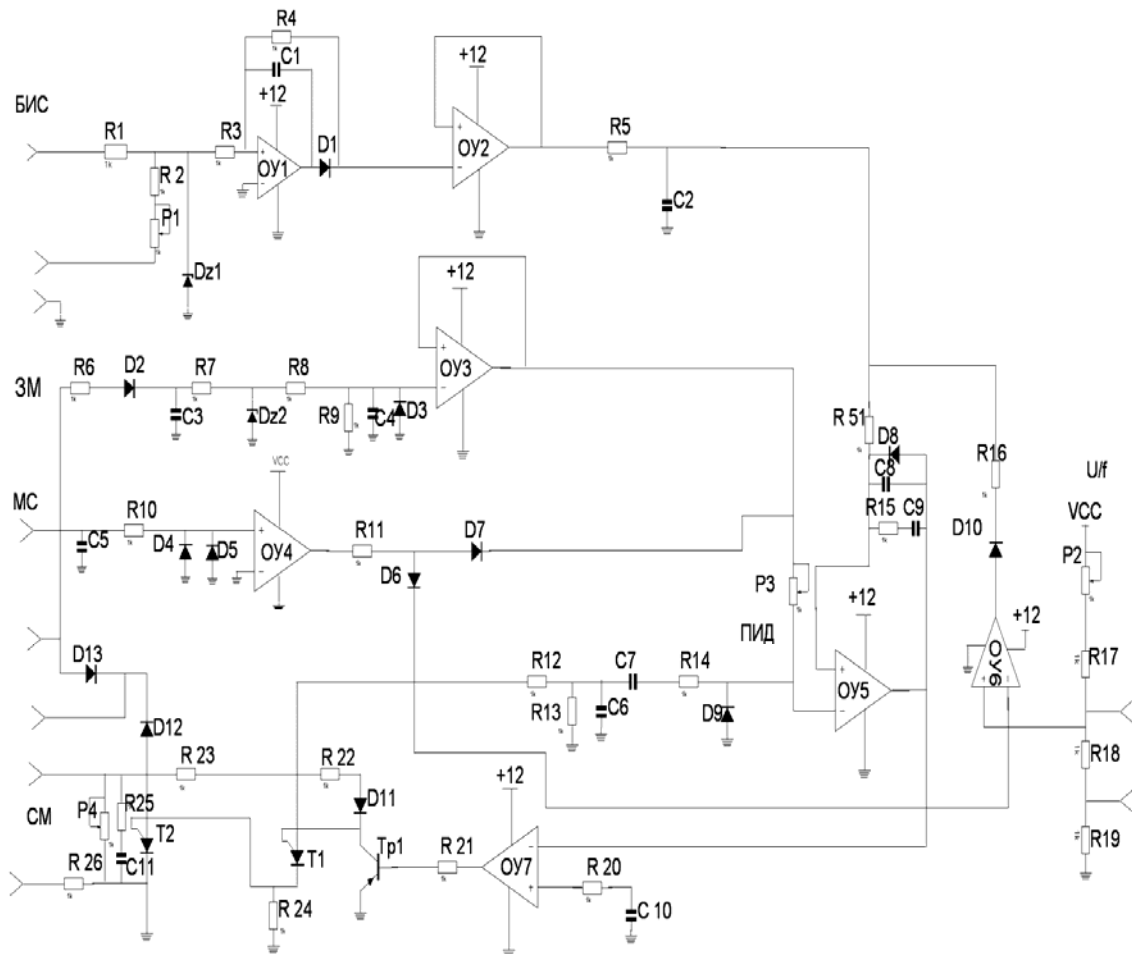
Основната част на регулатора е операционен усилвател ОУ, който реализира ПИД регулатор. Компараторът представлява електронна схема с аналогов вход и логически изход, т.е. на базата на постъпилото напрежение от ПИД регулатора, той изработва импулси с определена продължителност и амплитуда (единица и нула). Логическото състояние на изхода е индикация, дали входното напрежение $U_{ген}$ е по-голямо от зададеното напрежение $U_{зад}$, или не. Задният фронт на изработения импулс управлява ъгъла на отпушване на тиристорите α от силовия модул. Силовият модул е управляван от управляващ сигнал и в зависимост от него отклонява по-голяма или малка част от възбудителния ток на изхода на системата за компаундиране. По този начин се регулира напрежението на възбуждане на синхронния генератор. Модулът за управление представлява функционален генератор, изработващ импулси, които с импулса, изработван от модула за защита по ниска честота изработва импулси, блокиращи силовия модул при ниска честота на въртене на генератора до 30 Hz, в резултат на което на възбудителната намотка не постъпва напрежение.

На фиг.21 е показана зависимостта между сигналите по напрежение на входа и на изхода на компаратора на АРВ2.

На фиг.22 е показана електричката схема на автоматичния регулатор на напрежение АРВ2.



Фиг.21. Зависимост между сигналите по напрежение на входа и на изхода на компаратора на АРВ2

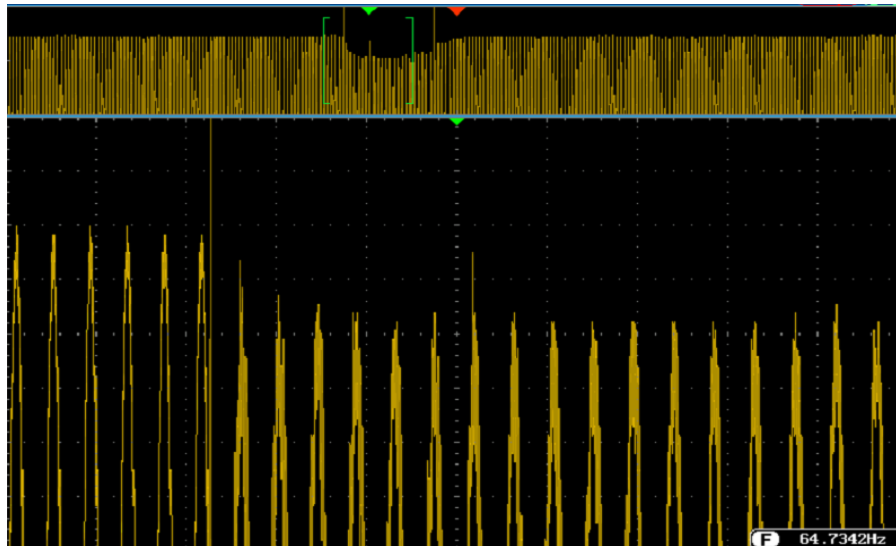


Фиг.22. Електрическа схема на автоматичен регулатор на напрежение АРВ2

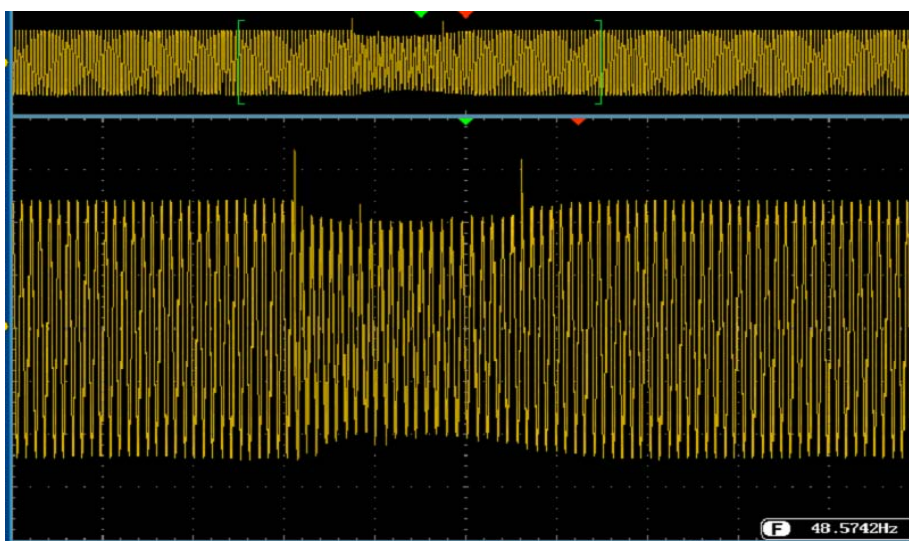
Бяха извършени експерименти с физическия макет, снабден с АРВ2, като се включваше съизмерим по мощност товар. В таблицата по-долу са показани основните параметри от експериментите.

На осцилограмите по-долу са показани записи на основните параметри на режима и на сигналите в отделните блокове на АРВ2.

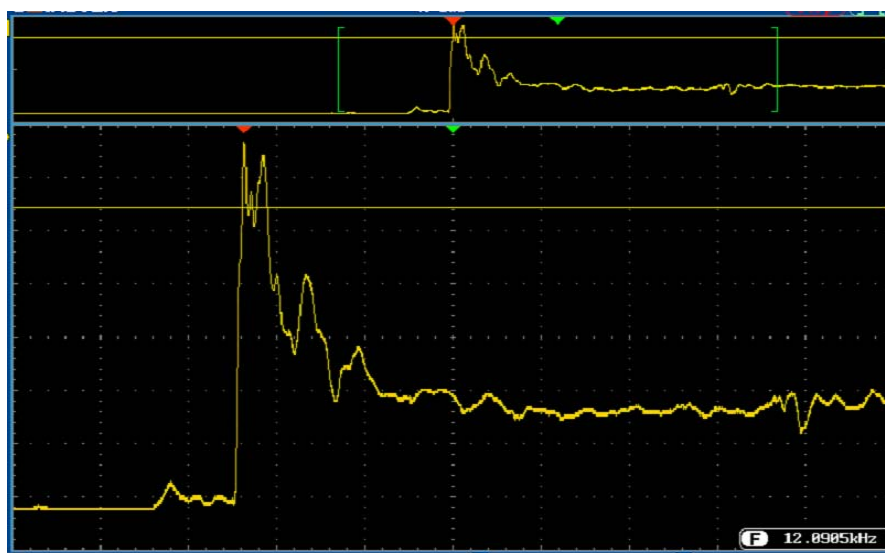
Изисквания към системата за възбуждане	САФК	САФК с АРВ
Статична точност $\pm 2,5\%$ при товар $0 \div 100\%$ с $\cos\varphi = 0,8$.	$\Delta U = -20V$ (5%)	$\Delta U = -1,5V$ (0,3%)
Свърхтовар 150% (2мин.) $\cos\varphi = 0,6$, динамична точност $\pm 10\%$	$\Delta U = -40V$ (10%)	$\Delta U = -5V$ (2,5%)
Провал на напрежение при включване на товар ($\leq 60\%$) $+20 \div -15\%$, време на възстановяване с точност $\pm 3\%$ $t \leq 1,5$ s	40 V (5%) $t = 0,8$ s	15 V (1%) $t = 0,25$ s
Траен ток на късо съединение ($t = 2s$), $I_{к.с.} \geq 3 I_n$	$I_{к.с.} = 4 I_n$	$I_{к.с.} = 4 I_n$



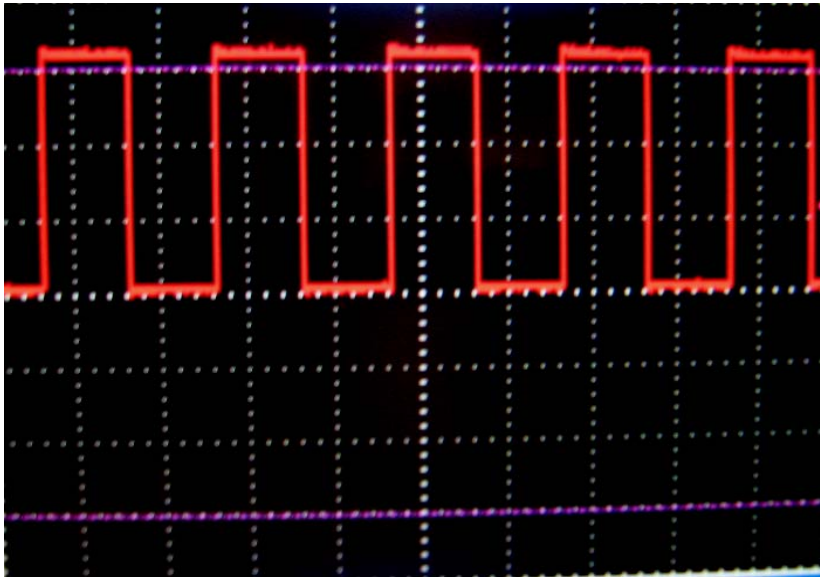
Фиг.23. Провал на статорното напрежение на генератора без АРВ2



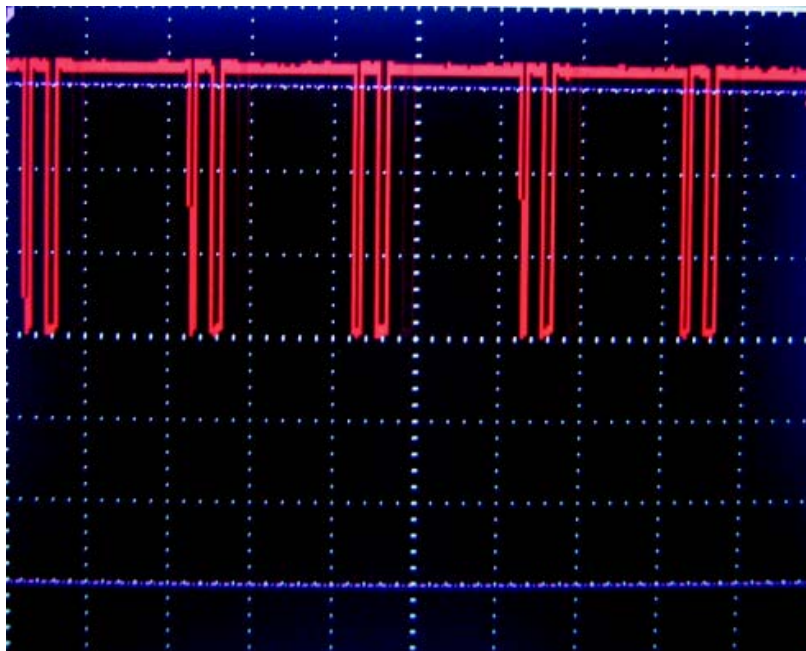
Фиг.24. Провал на статорното напрежение на генератора с АРВ2



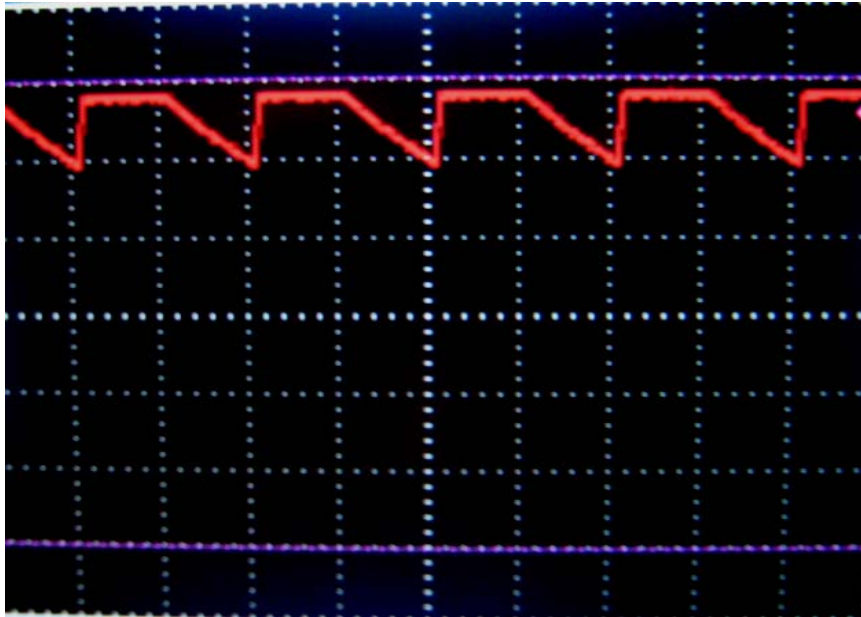
Фиг.25.Ток на възбуждане на генератора с АРВ



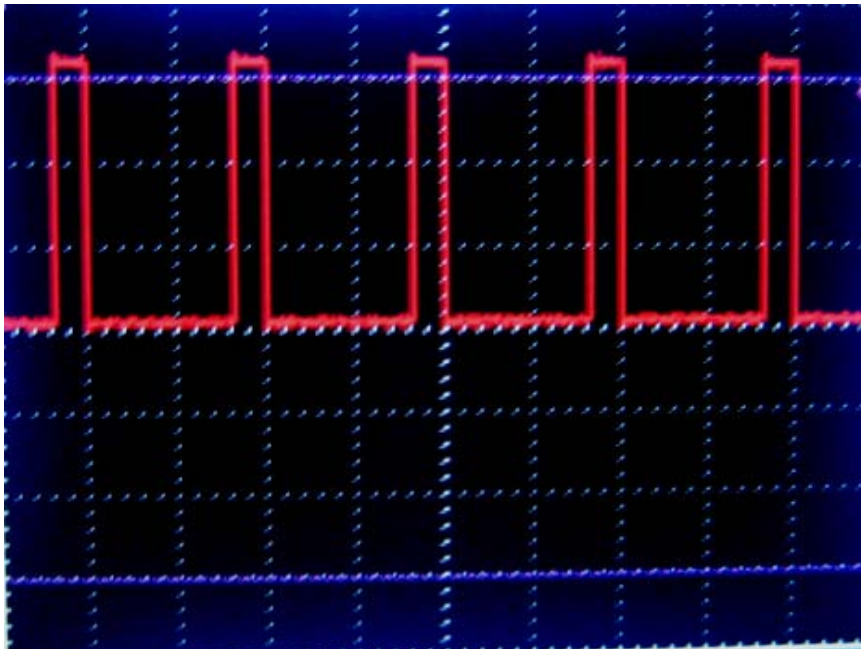
Фиг.26. Изходни импулси на (OJU2.1)



Фиг.27. Изходни сигнали от блок MC OJU1.1

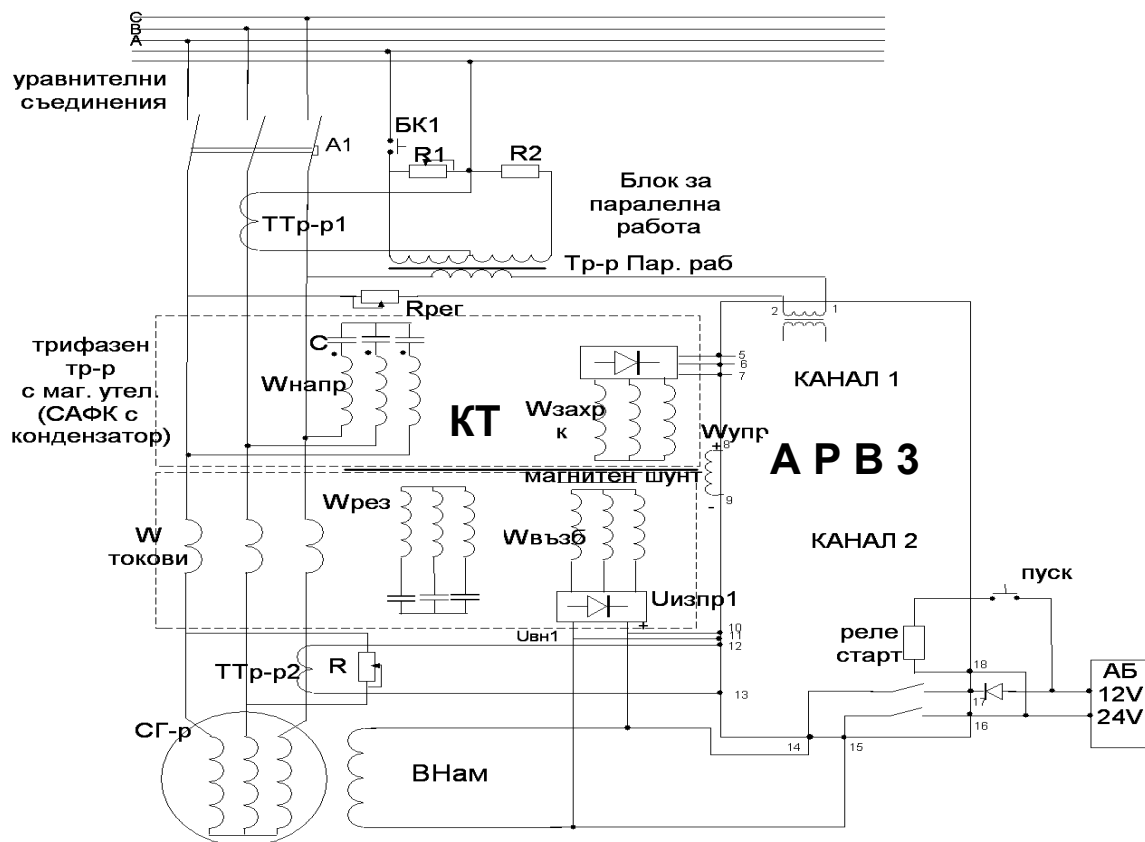


Фиг.28. Исходни сигнали от блок *МС ОЈУ1.1*



Фиг.29. Исходни сигнали от блок *ОЈУ2.4*

Бѐ разработен двуканален автоматичен регулатор на възбуждане АРВЗ, включването на който е показано на фиг.30.



Фиг.30. Схема на двуканален автоматичен регулатор на възбуждане АРВЗ

Компаундиращият трансформатор КТ има три основни и три допълнителни намотки. Основни намотки са: токова $W_{\text{токова}}$, напреженова $W_{\text{напр}}$ и вторична намотка $W_{\text{възб}}$. Напреженовата намотка е отделена от токовата и вторичната с магнитен шунт, който определя коефициента на взаимна индукция между намотките. Вторичната намотка $W_{\text{възб}}$ захранва възбудителната намотка на генератора през изправителен мост.

Допълнителни намотки са: захранваща коректора $W_{\text{захр.к}}$, резонансна $W_{\text{рез}}$ и управляваща $W_{\text{упр}}$. Началното самовъзбуждане се осъществява с резонансен контур, включващ $W_{\text{рез}}$ и кондензаторна батерия. Управляващата намотка $W_{\text{упр}}$ е включена към изхода на автоматичния регулатор на напрежение АРВ. Тя подмагнитва компаундиращия трансформатор и изменя коефициентите на трансформация на напреженовия K_U и токовия K_I канали.

Двата канала за управление имат две различни изпълнителни устройства. Първият канал - управляващата намотка $W_{упр}$, с помощта на която се подмагнитва компаундиращия трансформатор. Вторият канал - тиристори на изхода на компаундиращия трансформатор, които шунтират част от изходния ток на трансформатора.

Управлението по канал 1

Управлението на напрежението на възбуждане се извършва чрез подаване на управляващ сигнал от автоматичния регулатор на напрежение АРВЗ към управляващата намотка $W_{упр}$.

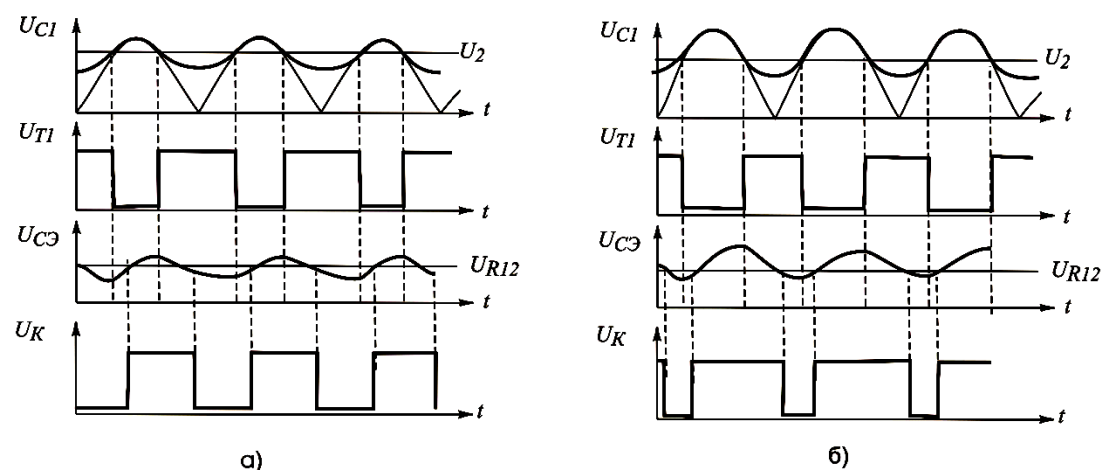
Блокът за паралелна работа се състои от трансформатор за паралелна работа (ТПР), измервателен трансформатор (ИТ) на входа на регулатора и токов трансформатор (ТТ). Блокът за паралелна работа разпределя реактивния товар с точност 10% между паралелно работещи генератори. Той не оказва влияние на автономната работа на генератора. Фактически блокът представлява датчик на реактивна мощност.

Резонансният контур $W_{рез-С}$ служи за първоначално самовъзбуждане на генератора. При достигане 70% от номиналната скорост на въртене, настъпва резонанс.

АРВЗ има две основни части:

- измервателен трансформатор (ИТ);
- усилвател – съставен от 4 транзистора.

На фиг.31 са показани времедиаграмите на напреженията, обясняващи принципа на работа регулатора.

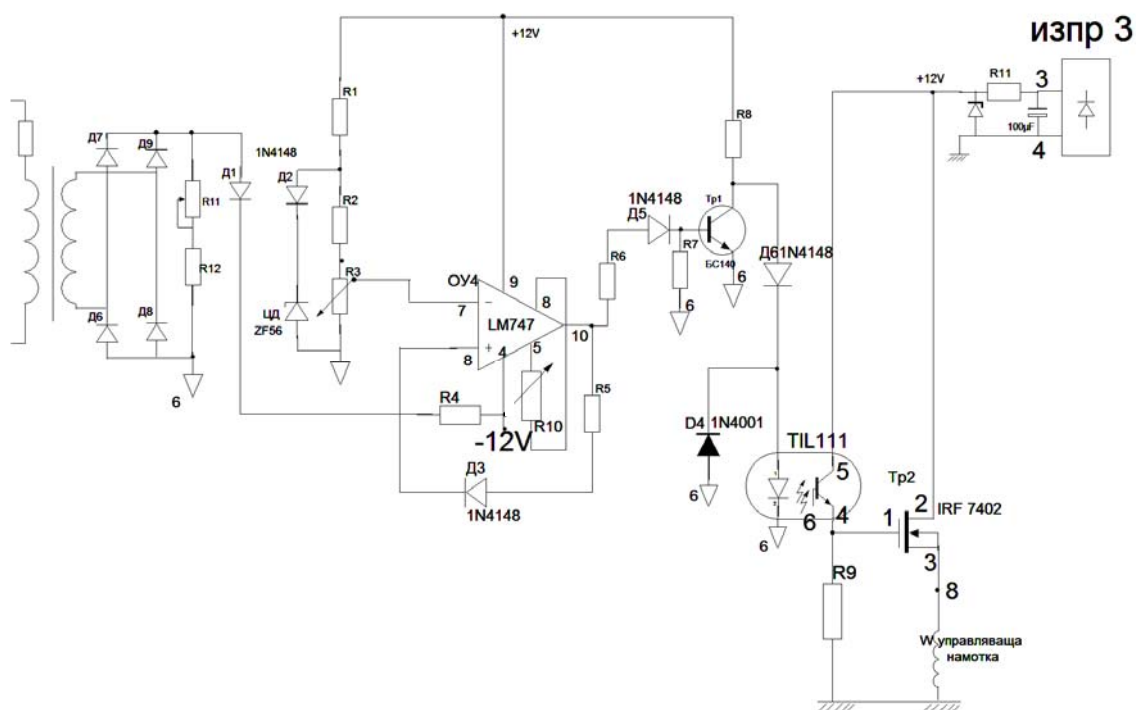


Фиг.31. Времедиаграми на напреженията, обясняващи принципа на работа регулатора

При увеличаване на напрежението на генератора U_2 , ширината на импулсите става по-голяма, нараства средният ток през намот-

ката $W_{упр}$ и индуктираното напрежение във вторичната намотка $W_{възб}$ на трансформатора намалява. Следователно, намалява $U_{възб}$ и намалява $I_{възб}$ на генератора и заедно с това намалява напрежението на генератора U_2 .

АРВЗ чрез управляващата намотка $W_{упр}$ чрез широчинно-импулсна модулация ШИМ подмагнитва магнитната система на компаундиращия трансформатор, в резултат на което индуктираното напрежение във възбудителната намотка на генератора се променя.



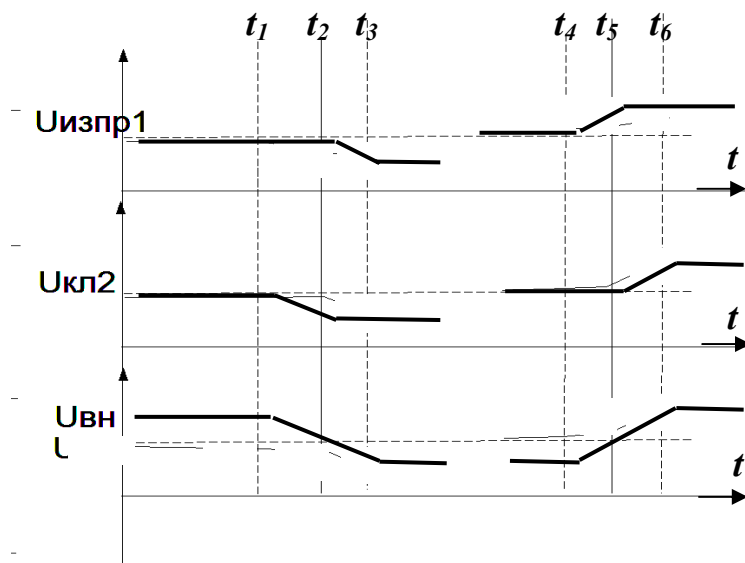
Фиг.32. Схема на управление на канал 1 на двуканалния АРВЗ

Управлението по канал 2

За управлението на канал 2 се използва схемата за управление, показана на фиг.22. На фиг.33 са показани времедиаграми, обясняващи работата на регулатора на възбуждане.

С помощта на шунтиращите тиристори, които се управляват широчинно-импулсно, се шунтира част от изходния ток на компаундиращия трансформатор. Канал 1 подмагнитва компаундиращия трансформатор и изменя коефициентите на трансформация на канала на напрежение K_U и канала на ток K_I . На фиг.33 има два интервала от време, при които се изменя напрежението на генератора $t_1 \div t_3$ - напрежението се увеличава, $t_4 \div t_6$ - напрежението се намалява, Използват се следните означения: $U_{изпр1}$ - напрежението на

изхода на $W_{взб}$; $U_{кл2}$ – напрежението на изхода на канал 2; $U_{вн}$ - резултиращото напрежение на възбудителната намотка.



Фиг.33. Времедиаграми, обясняващи работата на регулатора на възбуждане

АРВ3 повишава бързодействието и точността на регулиране 3-5 пъти.

Разработени са три електронни схеми на автоматичен регулатор на възбуждане, използващи пропорционално-интегрално-диференциално регулиране. Схемите се отличават по схемно решение и по използвани елементи и настройки. Третият АРВ е двуканален автоматичен регулатор. Описани са схемните им решения и са приведени основните им характеристики.

Проведени са изпитания и тестове, които показват правилността на работа на регулаторите и много добрите показатели на регулиране – висока точност и голямо бързодействие.

Анализиран са получените експериментални резултати. Анализът на резултатите показва подобряване на статичните и динамичните характеристики на работа на контролерите.

Подобрена е точността на поддържане на напрежението, съкратено е времето за възстановяване на напрежението, намалени са колебателните съставки в преходните процеси.

Разработеният АРВ1 повишава точността 3 пъти, а АРВ2 - 10 пъти.

Възстановяването на напрежението след смущения при АРВ1 е $<0,6$ сек., при АРВ2 - $<0,25$ сек, което представлява подобрени 2 и 4 пъти съответно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Корабната електроенергийна система (КЕЕС) трябва да осигурява непрекъснат режим на работа и устойчивост на работа при производството и потреблението на електроенергия. Устойчивото и надеждно функциониране на КЕЕС е възможно единствено при автоматичното ѝ управление, осъществено от комплексни автоматични устройства и системи.

В много голяма степен решаването на тази задача зависи от използваните регулатори на скорост и възбуждане на корабните първични двигатели и синхронни генератори.

Системите за възбуждане получиха голямо развитие, като се използват различни типове, закони за регулиране и характеристики.

Системите за компаундиране продължават да се използват широко за възбуждане на генераторите, като те се комплектоват с автоматични регулатори на възбуждане (АРВ).

Синхронният генератор има голямо вътрешно съпротивление, което предизвиква намаляване на напрежението при увеличаване на товара, ограничава мощността при паралелна работа по устойчивост и по възможност за колебания.

В КЕЕС мощностите на генераторите и товарите са съизмерими, съизмерими са и електромагнитните и механичните времеконстанти на електрическите машини, електроенергията се генерира и консумира без трансформация, разпределителната мрежа е ограничена по размер. Всичко това предизвиква много големи скорости на протичане на преходните процеси и много големи изисквания към регулаторите и системите за управление.

В дисертацията са разработени нови регулатори на възбуждане за системи за компаундиране. Те използват пропорционално-интегрално-диференциално регулиране (ПИД).

Съставен е математически модел в статичен режим, свързващ управляемото статорно напрежение с управляващото напрежение на възбуждане. С помощта на метода на Зиглер и Николс са настроени параметрите на регулатора K_P , K_I , K_D .

За проверка на работоспособността и правилността на настройката е създаден математически модел на компаундиращия трансформатор, съставен е модел на КЕЕС и са изследвани преходните процеси в нея.

Проектиран и е създаден физически макет, състоящ се от синхронен генератор, система за компаундиране, статичен активно-индуктивен товар, динамичен товар (асинхронен двигател).

Синтезирани са три схеми на АРВ, като те са тествани с помощта на физическия макет. Изследвана е тяхната автономна работа със системата за компаундиране, а така също и използването им като двуканален автоматичен регулатор на възбуждане.

ПРИНОСИ В ДИСЕРТАЦИОННАТА РАБОТА

Научни резултати

- ❑ Създаден е модел на синхронния генератор с входен сигнал напрежение на възбуждане и изходен сигнал статорно напрежение.
- ❑ С помощта на този модел и метода на Зиглер и Николс са настроени коефициентите на усилване на пропорционалния, интегралния и диференциалния канал на ПИД регулирането.
- ❑ Създаден е модел на компаундиращия трансформатор, отчитащ електромагнитните процеси и насищането на магнитопровода му.
- ❑ Създаден е математически модел на корабна електроенергийна система, съдържаща дизелгенератор, статични и динамични товари.
- ❑ Изследвани са преходните процеси в корабната електроенергийна система при различни смущаващи въздействия.

Резултати с приложна насоченост

- ❑ Създаден е физически макет на корабна електроенергийна система, съдържаща синхронен генератор с компаундиращ трансформатор, задвижван от първичен двигател (асинхронен двигател),
- ❑ Снети са основните статични и динамични характеристики на създадения физически макет.
- ❑ Синтезирани са три схеми на автоматичен регулатор на възбуждане, които са проектирани, изработени и тествани.
- ❑ Експерименталните резултати от изпитанията на двата ПИД контролера при различни смущаващи въздействия показват подобряване на статичните и динамичните характеристики на работа на контролерите;
- ❑ Подобрена е точността на поддържане на напрежението, съкратено е времето за възстановяване на напрежението, намалени са колебателните съставки в преходните процеси.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ДИСЕРТАЦИОННАТА РАБОТА

1. N.Djagarov, **T.Lazarov**, Automatic Voltage Regulator for a Ship's Synchronous Generator, Proceedings of Twelfth International Conference of Marine Science and Technologies "Black Sea" 2014, Varna, Bulgaria, September 25th–27th, 2014, pp.132-137, ISSN 1314-0957.
2. N.F.Djagarov, **T.P.Lazarov**, Investigation of Automatic Voltage Regulator for a Ship's Synchronous Generator, Scientific Journal of Riga Technical University "Power and Electrical Engineering", Vol.33, 2015, Riga, Latvia
3. Джагаров Н.Ф., Бонев М.Б., Гроздев Ж.Г., **Лазаров Т.П.**, Джагарова, Ю.В., Моделирование процессов в судовом синхронном генераторе с системой компаундирования, Журнал «Электротехнические системы и комплексы», №3, 2015, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия
4. **T.P.Lazarov**, Modernized Excitation Systems of Synchronous Generators of Bulgarian Merchant Fleet Ships, International Scientific Conference ELMA 2015, Varna, Bulgaria
5. **Т.Лазаров**, Н.Джагаров, М.Бонев, Ж.Гроздев, Двуканално управление на морска система за компаундиране МСК, Научни трудове на Русенски университет, 2015, Русе, том , серия