

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ - ВАРНА

инж. Димитър Маринов Димитров

РАЗРАБОТКА НА ТЕХНОЛОГИЯ И ТЕХНИЧЕСКИ СРЕДСТВА
ЗА ПОВИШАВАНЕ НА ЕНЕРГИЙНАТА ЕФЕКТИВНОСТ В
КОРАБНИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГИЙНИ СИСТЕМИ

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертация за получаване на образователна и
научна степен “доктор”

по докторска програма «Електроснабдяване и електрообзавеждане»
към професионално направление 02.04.15

Научен ръководител: доц.д-р инж.Петко Д.Петков

Рецензенти:

1.....
2.....

Варна
2016

Дисертационният труд е обсъден на2016 г. в катедра “Електроснабдяване и електрообзавеждане” на разширен катедрен съвет, съгласно заповед на Ректора на ТУ-Варна No и насочен за защита.

Автор: инж. Димитър Маринов Димитров

Заглавие: Разработка на технология и технически средства за повишаване на енергийната ефективност в корабни електроенергийни системи

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ - ВАРНА

инж. Димитър Маринов Димитров

РАЗРАБОТКА НА ТЕХНОЛОГИЯ И ТЕХНИЧЕСКИ СРЕДСТВА
ЗА ПОВИШАВАНЕ НА ЕНЕРГИЙНАТА ЕФЕКТИВНОСТ В
КОРАБНИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГИЙНИ СИСТЕМИ

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертация за получаване на образователна и
научна степен “доктор”

Варна
2016

Дисертационният труд е обсъден на заседание на катедрен съвет на катедра “Електроснабдяване и електрообзавеждане“ при ТУ Варна на 25.04.2016г.

Докторантът работи като асистент в катедра “Електроснабдяване и електрообзавеждане“ при ТУ Варна, където са проведени основните теоретични и експериментални изследвания по дисертацията.

Дисертационният труд съдържа 157 страници, включително 168 фигури, 11 таблици, оформени в пет глави, общи изводи и списък на използваната литература от 99 заглавия, от които 29 на кирилица и 70 на латиница.

Автор: инж. Димитър Маринов Димитров

Заглавие: Разработка на технология и технически средства за повишаване на енергийната ефективност в корабни електроенергийни системи

Защитата на дисертационния труд ще се състои на г. от ч. в на открито заседание на жури, сформирано със заповед на Ректора No/..... г. Материалите по защитата (дисертацията, рецензиите и становищата) са на разположение на интересуващите се във ФД “Докторанти”, стая 318 НУК.

Обща характеристика на дисертационния труд

Актуалност на темата

От 2013 г., корабната индустрия и корабособствениците се съобразят с разпоредбите на ИМО(МЕРС.1/Circ.683), обхващащи енергийна ефективност на кораба и плана за нейното управление (SEEMP). Планирането е най-важният етап от SEEMP, в която главно се определя подхода за текущото състояние на плавателните съдове, така и очакваното подобряване на енергийната им ефективност. Решаването на проблема с енергийната ефективност в корабните електроенергийни системи, основно е свързан с детерминирането и управлението на техническите загуби при генериране, пренос, разпределение и използване на електрическата енергия в тях. Прилаганите методи и средства предимно са насочени към ограничаване загубите на празен ход на потребителите, загубите в елементите от електроснабдителната мрежа и загубите в режим на натоварване. Известни са голям брой технически решения за тяхното реализиране в практиката, необходимо е, обаче, всички тези действия да бъдат подчинени на технико-икономически анализи с положителен изход на прилаганите решения за управление на енергийната ефективност за конкретен обект. Появата на висши хармоници и несиметрии в електроразпределителните мрежи на плавателните съдове бележат ясно очертана тенденция за по-нататъшно нарастване. Това, заедно с появата и на други негативни последици, води до рязко увеличаване на техническите загуби в електроразпределителните мрежи и потребителите на електрическа енергия в електроенергийните системи на плавателните съдове. Ето защо усилията за оценка ефективността на прилаганите методи и технически средства са свързани с възможността за ограничаване на електрическите загуби с цел повишаване на енергийната ефективност на разглежданите обекти. както в преходен, така и в установен режим на работа. Процесите свързани с техническите загуби в корабни мрежи със смущения се оценяват предимно с намирането на мощностен баланс, като се определят компонентите на пълната мощност, активна (P), реактивна(Q), деформационна (D) и пулсираща (N). Последните две компоненти на пълната мощност D и N имат неактивен характер и съвместно с реактивната мощност Q завишават електрическите загуби в мрежата и намаляват нейната преносна способност по активна мощност (P). Въпросите, свързани с минимизирането на тези мощности (D, N и Q) са директно свързани с намаляване на електрическите загуби в корабните електроразпределителни мрежи и повишаване на енергийната ефективност в тях.

Цел на разработката

Целта на дисертационната работа са свързани с разработка на единна информационна технология за определяне показателите за качеството

на електрическата енергия, компонентите на електрическата мощност и фактора на мощността в корабните електроенергийни системи, свързано с определяне на електрическите загуби, циркулиращи в разпределителната им мрежа, както и специализирани технически средства за подобряване на електроенергийната ефективност в корабните мрежи.

Във връзка с целта са формулирани следните задачи:

1. Разработка на информационна технология за мониторинг на циркулиращите неактивни мощности в ЕЕС, определяне и детерминиране на електрическите загуби в разпределителните системи на плавателните съдове.
2. Разработка на практично-приложен подход за оценка на смущенията в ЕЕС на плавателните съдове и специализирани технически средства за повишаване на енергийната ефективност в тях.
3. Изследване и оценка на съвременните корабни електрозадвижвания от гледна точка на концепцията за енергийна ефективност на плавателните съдове, според изискванията на международната морска организация.
4. Експериментални и симулационни изследвания на технология за провеждане на мониторинг в ЕЕС на плавателни съдове и технически средства за повишаване на енергийната ефективност в тях.

Методи на изследването

Методите на изследване за осъществяване на теоретичните анализи се базират на обобщени такива, основаващи се на теорията на „изобразяващия вектор“ и на „моментната“ мощност.

Научни резултати

В резюме могат да бъдат посочени следните научни резултати, получени в дисертационния труд, а именно:

1. Разработена е информационна технология, позволяваща да се определят показателите за качеството на електрическата енергия и компонентите на пълната мощност в КЕЕС при наличие на смущения от несиметрия и висши хармоници.
2. Доказано е, че на база теорията на изобразяващия вектор могат да се определят електрическите загуби в електропреносните линии на КЕЕС и се детерминират електрическите загуби, в резултат на смущения от несиметрии, висши хармоници и лош фактор на мощността, като проценти от общите електрически загуби, приети за 100%.

Практическа значимост

Практическата значимост на резултатите се състои в следното:

1. Разработен е подход, свързан с осъществяване на практично-приложен анализ за определяне коефициента на несинусоидалност на напрежението при комплектоване на силовите елементи на КЕ-ЕС. Този подход се характеризира с удобство и достъпност, както и с достатъчна инженерна точност. Това се постига чрез непосредствено въвеждане параметрите на генериращите, преобразуващите и потребяващи мощности в корабната електроенергийна система.
2. Разработена е структура на силов хибриден филтър, съвместно със системата му за управление, предназначен за работа в корабни условия, включващ звена само за пети и седми хармоник.
3. Доказана е работоспособността на силовия хибриден филтър в условия на корабната електроенергийна система. Проведените изследвания показват неговата функционална годност при изменение на захранващата честота в границите от 47.5 до 52.5 Hz, при номинална честота 50 Hz. Мощността на активната част за корекция режима на филтъра е по-малка от 10% от мощността на смутителя. Това прави бъдещото приложение на този филтър много перспективно, от гледна точка повишаване на енергийната ефективност при решаване на проблемите с минимизиране на висшите хармоници в КЕЕС.
4. Обосновано доказано е, че циклоконверторните ГЕУ имат по-нисък коефициент на несинусоидалност по ток, по-ниски загуби от висши хармоници и по-висок резултативен фактор на мощността в сравнение с ГЕУ с честото преобразуватели, съдържащи звено за постоянен ток.
5. Изяснено е, че въпреки съществуващите малки различия в експлоатационните характеристики на двата вида честотопреобразуватели, те намират приложение при реализиране на пропульсивните ГЕУ. Това се дължи на технико-икономически съображения при изграждане на плавателните съдове, с отчитане на мореходните им характеристики и акватория на плаване.
6. Извършените експерименти с лабораторна автономна електроенергийна система с несиметричен и нелинеен товар доказват появата на неактивни мощности, като пулсираща и деформационна, съизмерими с останалите компоненти на пълната мощност. Това предизвиква влошаване на резултативния фактор на мощността и завишаване на електрическите загуби в електроенергийната система.

Апробация на получените резултати

Основните резултати от проведените изследвания в дисертацията са докладвани и обсъдени на научни форуми, национални и международни конференции: International Scientific Symposium "Electrical Power Engineering 2014 11-13.09.2014, Varna, Bulgaria; XIV-th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems ELMA 2015, October 2015, Varna, Bulgaria; VII-та КОНФЕРЕНЦИЯ НА ЕЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ „ЕФ 2015“, 19 - 21 септември 2015 г., Созопол, България

Кратко съдържание на дисертационния труд

ПЪРВА ГЛАВА

Съвременно състояние на проблема с енергийната ефективност в КЕЕС с преобладаващо участие на нелинейни и несиметрични товари

В първа глава е направен обзор на съвременното състояние на проблема, свързан с енергийната ефективност в корабните електроенергийни системи. Анализирани са състоянието и тенденциите за развитие в нормативната база и средствата за мониторинг. Направена е оценка на съвременните подходи и технически средства, използвани за повишаване на електроенергийната ефективност в електроенергийните системи на плавателните съдове. Направен е критичен анализ на теоретичните методи, използвани за изследване на електроенергийни процеси в електроразпределителните мрежи и потребителите. В резултат от направения анализ са формулирани основни изводи от проучването:

1. Повишаването на енергийната ефективност в корабните електроенергийни системи е издигната на ниво глобална световна политика, залегнала в стандартизираните изисквания на ИМО, като са отразени директиви на SEEMP за планиране и осъществяване на енергийна ефективност в плаващите обекти.
2. Необходимостта от повишаване на енергийната ефективност в плавателните съдове придоби допълнителна актуалност и поради факта, че все по-голям брой ЕЕС са от интегриран тип, както в съвременните пасажерски кораби, така и на специализираните плаващи обекти с различно предназначение.
3. Повишаването на енергийната ефективност в ЕЕС на плаващите обекти поставя за решаване различни по характер задачи от

техническо-икономическо естество. Те се свързват както със събиране на информация за протичащите електроенергетични процеси в системите на плаващите обекти, носещи информация за реализирани загуби в тях, така и с осъществяване на мониторинг в това отношение. Прилаганите, за реализация на тази цел, системи имат съществени непълноти, което се отразява неблагоприятно върху изготвяните мениджърски планове за управление на електроенергийната ефективност в ЕЕС на плаващите обекти.

4. В световната практика са разработени разнообразни методи и технически средства за управление на електроенергийните процеси и свързаните с тях електрически загуби в условие на смущения, породени от висши хармоници и несиметрии в електроразпределителните системи. Една значителна част от тези въпроси са намерили своето частично или цялостно решение. Развитие на елементната база на силовата електроника и новите методи на високочестотни модуляции доведе до създаване на многофункционални устройства на база на активни филтри. На този етап основна пречка за масовото им внедряване е високата им себестойност и не на последно място големите им масогабаритни показатели, породени от тяхното естество на оразмеряване. Това налага търсенето на други технико-икономически ефективни и целесъобразни решения, приложими в ЕЕС на плавателните съдове.
5. Въпросите, свързани с повишаване на енергийната ефективност в условия на смущения в ЕЕС на плаващите обекти поради съизмеримост на генериращите мощности и товара, изисква прилагане на специализирани математически методи за анализ и изследване на такъв вид режими. Все още обаче, в теоретичен и практично-приложен аспект този въпрос не е решен цялостно. Особено внимание трябва да се обърне на възможността за адаптиране на подхода свързан с използване на „изобразяващия вектор” в комбинация с метода на „моментните мощности” за оценка на енергийната ефективност.
6. Трябва да продължат изследванията свързани с прилагане на подобрени възможности за управление на електрозадвижвания с оглед ефективното им използване в ЕЕС на плавателните съдове.

ВТОРА ГЛАВА

Разработка на информационна технология за мониторинг на електроенергийните процеси в корабните електроенергийни системи

Електроенергийните процеси и тяхното управление в енергийните системи на плавателните съдове се явяват елемент от подхода за повишаване

на енергийната ефективност в тях. Наличието на смущения в корабните електроенергийни системи, причинени от нелинейни и несиметрични натоварвания предизвикват неуравновесеност в енергийната система. Това е така защото настъпват изменения в моментните стойности на основните електрически величини – напрежение и ток в системата. Електрическите величини могат да се представят само с един обобщаващ вектор, наречен „изобразяващ”, който еднозначно определя тяхното поведение в трифазната система, а именно:

$$\begin{aligned}\bar{U}(t) &= \frac{2}{3}(u_a + au_b + a^2u_c) = |\bar{U}(t)|e^{j(\omega t + \varphi_u)} \\ \bar{I}(t) &= \frac{2}{3}(i_a + ai_b + a^2i_c) = |\bar{I}(t)|e^{j(\omega t + \varphi_i)}\end{aligned}\quad (2.2)$$

при което:

- $|\bar{U}(t)|$ и $|\bar{I}(t)|$ представляват модулите на „изобразяващите” вектори на напрежението и тока;
- ω , кръговата електрическа честота на мрежата;
- φ_u, φ_i , фазово изместване на напрежението и тока;
- a и a^2 – оператори:

$$\begin{aligned}a &= e^{j\frac{2\pi}{3}} \\ a^2 &= e^{-j\frac{2\pi}{3}}\end{aligned}\quad (2.3)$$

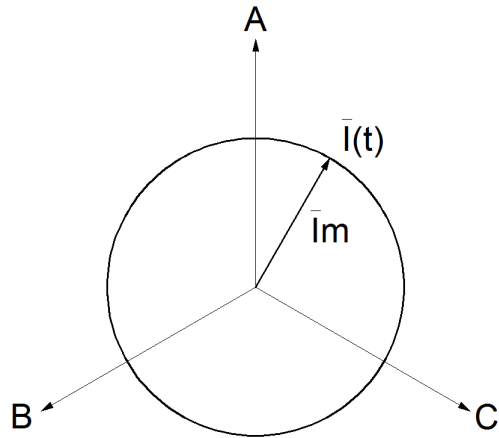
На фигурите по-долу са представени ходографите на „изобразяващите” вектори на напреженията и токовете в ЕЕС, съответно:

- без смущения (фиг.2.1);
- със смущения породени от наличието на несиметрии в натоварването (фиг.2.2);
- със смущения предизвикани от наличие на генерирани в системата висши хармоници (фиг.2.3).

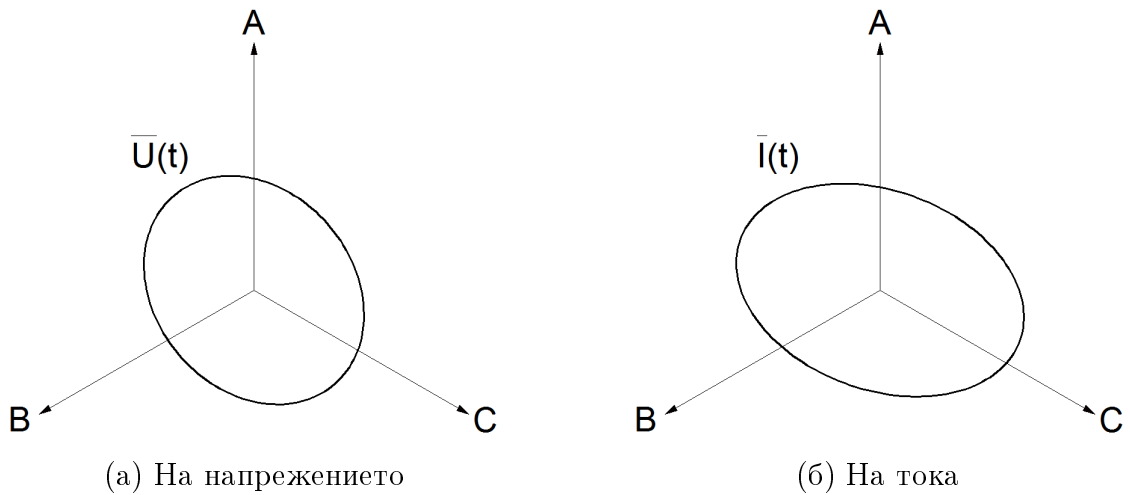
При обследване въздействието на смущенията върху електрическите величини напрежение и ток в КЕЕС, се оказва по-рационално да се работи като „изобразяващите” вектори се представят с модулите си, изменящи се във времето. Тези модули могат да се представят както в трифазна координатна система (a,b,c), така и в неподвижна ортогонална координатна система (α, β), съгласно зависимостите:

$$\bar{I}_{abc}(t) = |\bar{I}|e^{j(\omega t)}, \quad (2.6)$$

$$\bar{I}_{\alpha\beta}(t) = |\bar{I}|_{\alpha\beta}e^{j(\omega t)} = |\bar{I}|_{\alpha\beta}e^{j\alpha(t)}, \quad (2.7)$$



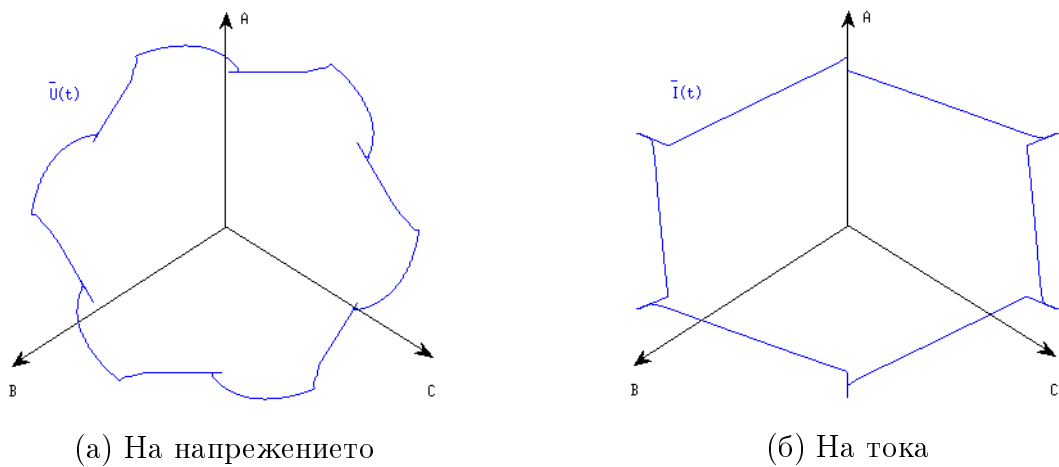
Фигура 2.1: Ходограф на „изобразяващият“ вектор при синусодален симетричен режим



(a) На напрежението

(б) На тока

Фигура 2.2: Ходограф на „изобразяващият“ вектор при смущения породени от наличието на несиметрии в натоварването



(a) На напрежението

(б) На тока

Фигура 2.3: Ходограф на „изобразяващият“ вектор при смущения предизвикани от наличие на генерирани в системата висши хармоници

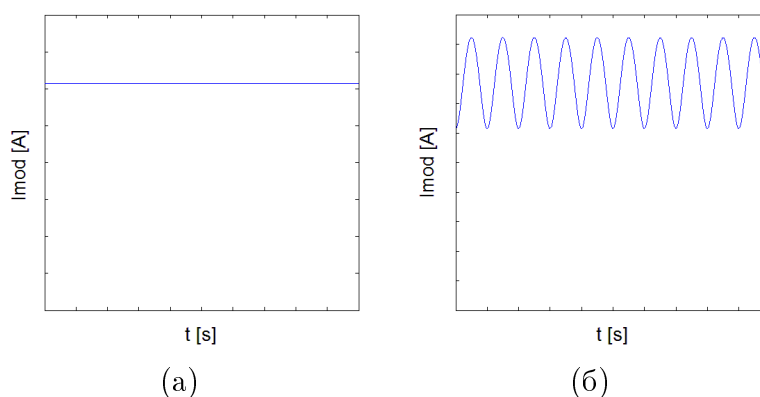
Където: $|\bar{I}|_{\alpha\beta}$, представлява модула на изобразяващия вектор, представен в ортогонална координатна система (α, β) , т.е.

$$|\bar{I}|_{\alpha\beta} = \sqrt{i_{\alpha}^2 + i_{\beta}^2}, \quad (2.8)$$

а $\alpha(t)$ представлява фазата на изобразяващия вектор.

Изменението на този модул във времето има вида, показан на следващите фигури, както следва:

- при отсъствие на смущения (фиг.2.5а);
- при наличие на смущения от несиметрично натоварване (фиг.2.5б).



Фигура 2.5: Модула на изобразяващия вектор на тока

Изменението на тези модули във времето носят информация за състоянието на показателите за качеството на електрическата енергия в КЕЕС [?].

Техническите електрически загуби се определят основно от големината и характера на електрическите товари. Тези загуби върху реалната компонента на импеданса на електроразпределителната система на КЕЕС като „изобразяващ“ вектор може да се представи, съгласно [?] във вида:

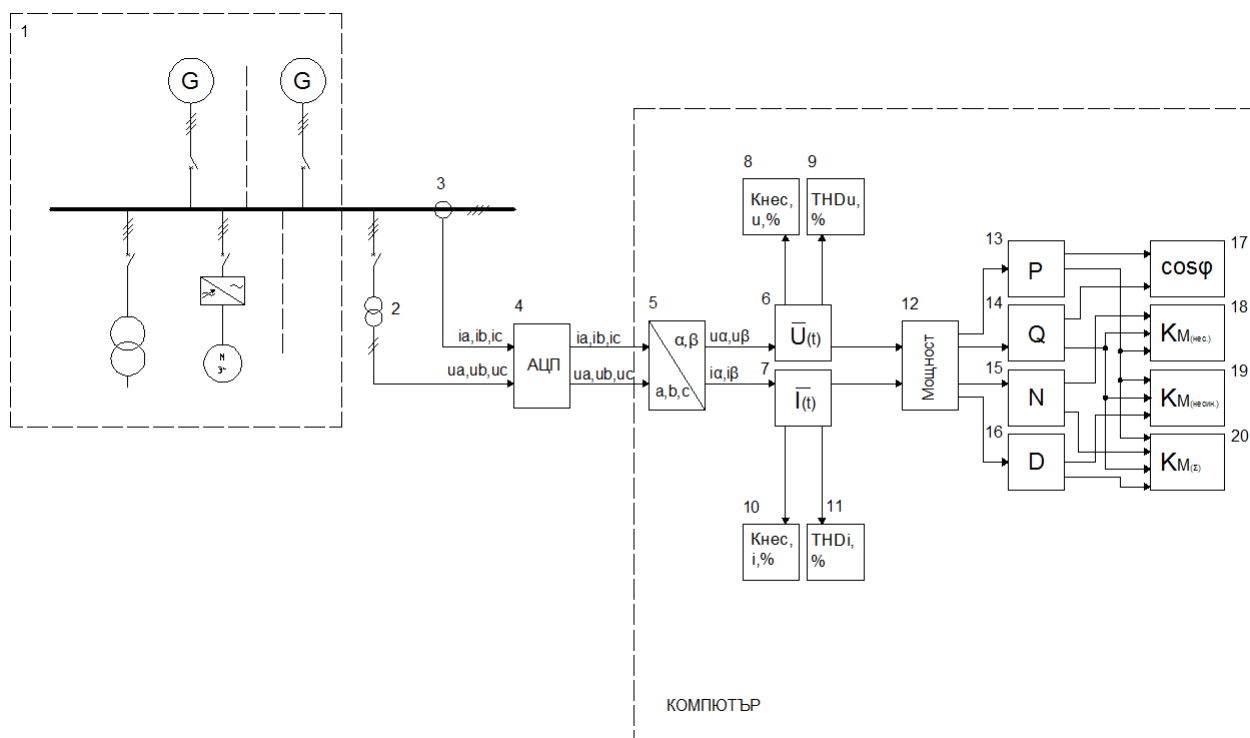
$$\Delta \bar{P}(t) = \frac{3}{2} R_{\Sigma} \bar{I}^2(t), \quad (2.20)$$

Където:

- R_{Σ} – представлява еквивалентното активно електрическо съпротивление от импеданса на електрическата мрежа;
- $\bar{I}(t)$ – „изобразяващ“ вектор на пълния ток.

За реализиране на информационната технология, която е предмет на разработката се прилага обобщен подход, базиран на метода на „изобразяващия“ вектор, носещ пълна и еднозначна информация за състоянието на електрическите величини в трифазната система. Това дава възможност да се формира както пълната мощност „S“, така и нейните компоненти –

активна "P", реактивна "Q", пулсираща "N" и деформационна „D", без да се допускат ограничения и неточности в теоретичен аспект.

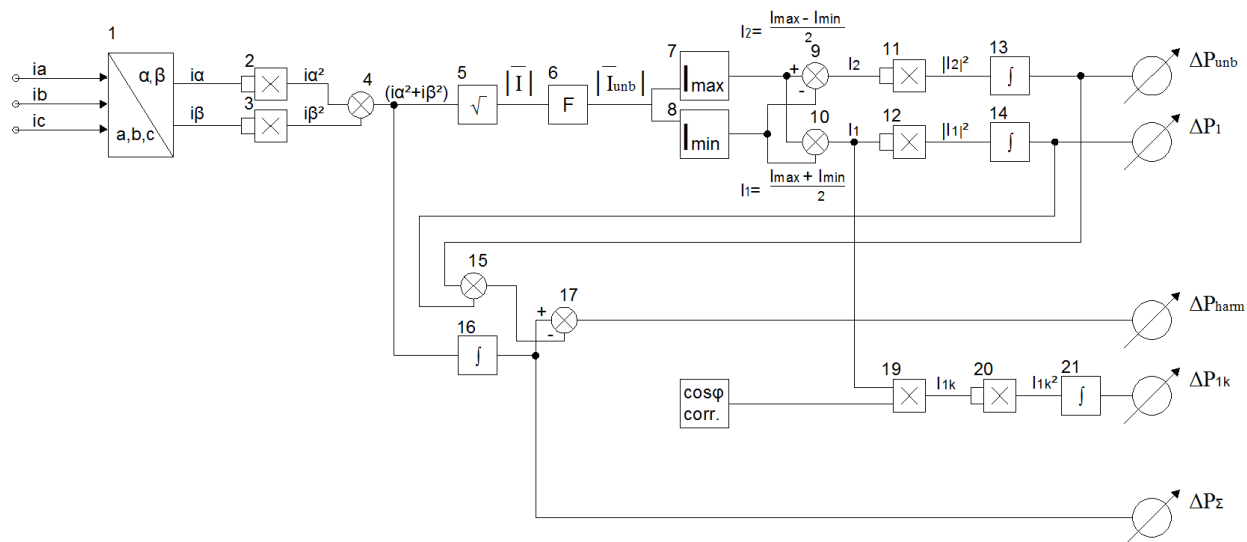


Фигура 2.7: Информационна технология за определяне показателите за качеството на електрическата енергия, компонентите на електрическата мощност и фактора на мощността в КЕЕС

При реализирането на този подход отсъстват всякакви методични грешки при определянето на неактивните компоненти на пълната мощност „S", при което се отчита пълния спектър на смущаващите въздействия от висши хармоници и несиметрия.

На практика не са ни познати методи и технически средства, даващи възможност за детерминиране на електрическите загуби в електроразпределителните мрежи на автономните ЕЕС, породени от наличието на смущения от несиметрии, висши хармоници и влошен фактор на мощността освен целокупното им определяне на база разлика от генерирана и потребена електрическа енергия.

Информационната технология, обект на настоящето предложение е описана словесно в блоков вид, съгласно (фиг.2.13). Тя се реализира като се измерват сигнали пропорционални на фазните токове i_a, i_b, i_c в контролирания по отношение на електрическите загуби участък. Тези сигнали се подават на входа на бл.1, който се явява преобразувател от трифазна неподвижна координатна система (a,b,c) в двуфазна ортогонална неподвижна координатна система (α, β). Изходните сигнали, пропорционални на i_α и i_β се подават на входовете на квадраторите, съответно бл.2 и бл.3.



Фигура 2.13: Блокова схема на информационна технология за определяне на електрическите загуби в разпределителната мрежа в корабните електроенергийни системи (КЕЕС)

Изходните сигнали от тези два блока се сумират в бл.4, изхода на който се подава съответно на входовете на бл.5 – коренатор и бл.16 – интегратор. Сигнала от изхода на бл.16 носи информация за пълните загуби, предизвикани от наличието на несиметрии, висши хармоници и фактора на мощност – „ ΔP_{Σ} ”. Сигнала като изход от бл.5 представлява модула на „изобразяващия” вектор на тока “ $\dot{I}(t)$ ”, който се подава на входа на бл.6, представляващ филтър на изхода на който се получава сигнал, пропорционален на модула на „изобразяващия” вектор на тока, съдържащ само първи хармоник в променливотоковата му съставяща. Този сигнал се подава на входовете, съответно бл.7 – представляващ детектор на максимум (I_{max}) и бл.8 – представляващ детектор на минимум (I_{min}). В бл.9 се осъществява полуразликата между (I_{max}) и (I_{min}), което представлява сигнал, пропорционален на обратната последователност на тока “ I_2 ”. Този сигнал, посредством квадратора (бл.11) се подава на входа на интегратора (бл.13), от изхода на който се получава сигнал, пропорционален на електрическите загуби, предизвикани от наличието на несиметрично токово натоварване – „ ΔP_{unb} ”. На входа на бл.10, който представлява суматор се подават сигнали от бл.7 и бл.8. На изхода на блока се формира сигнал, пропорционален на полусумата от (I_{max}) и (I_{min}), който се подава на квадратора (бл.12), от изхода на който през интегратора (бл.14) се формира сигнал, който е пропорционален на електрическите загуби, предизвикани от правата последователност на тока – „ ΔP_1 ”. Бл.15 представлява суматор на сигналите от бл.11 и бл.12. Изходният сигнал на този блок се изважда от сигнала постъпващ от бл.16. Това се осъществява в бл.17, изходният сигнал на който е

пропорционален на електрическите загуби „ ΔP_{harm} ”, породени от наличието на висши хармоници в автономната ЕЕС. На входа на бл.19, който представлява умножител постъпват сигнали от изхода на бл.10 и бл.18. Посредством бл.18 се реализира сигнал, пропорционален на зададения фактор на мощността. От изхода на бл.19 се получава сигнал, пропорционален на корегирания ток по права последователност “ I_{1k} ”, отговарящ на зададения фактор на мощността, който посредством квадратора (бл.20) се подава на входа на интегратора бл.21. Изходният сигнал от този блок е пропорционален на електрическите загуби „ ΔP_{1k} ”, които отговарят на зададения фактор на мощността.

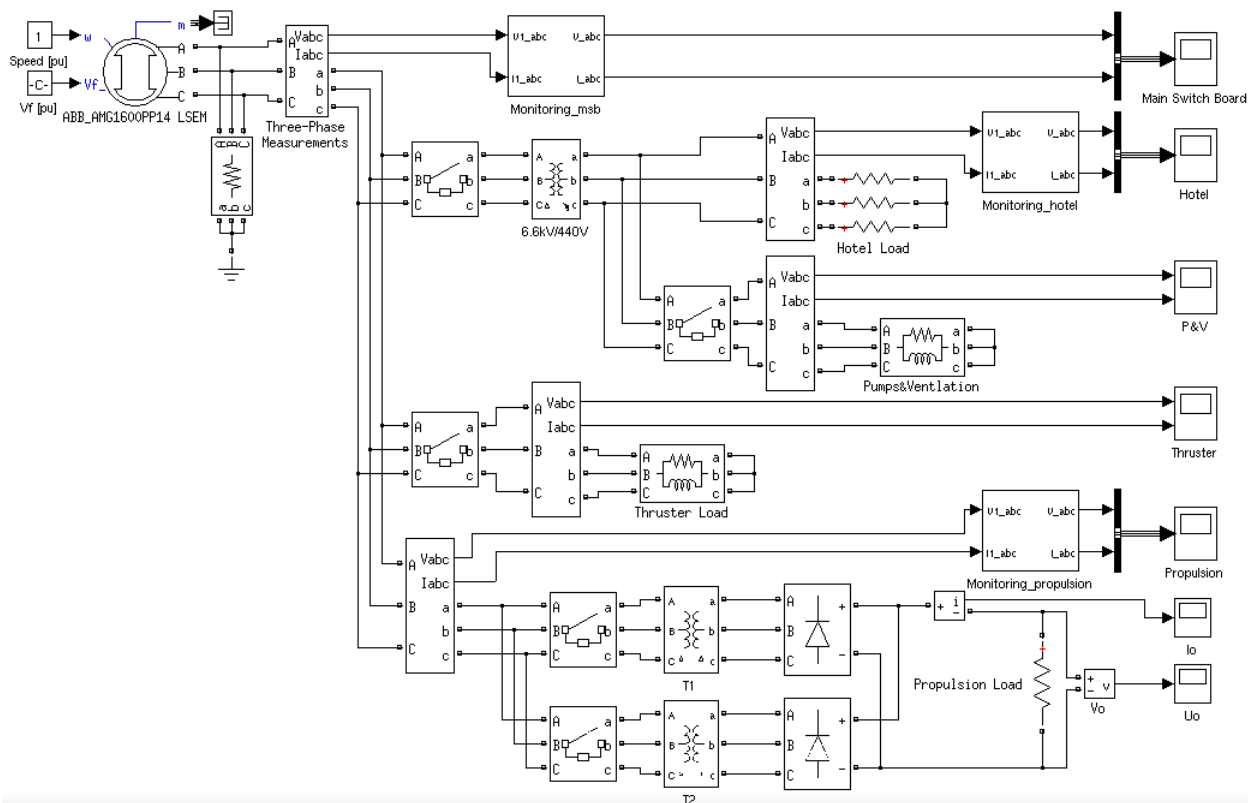
- ΔP_{Σ} – представляват съответно общите (пълните) електрически загуби;
- ΔP_1 – електрически загуби по права последователност на несиметричния трифазен ток;
- ΔP_{unb} – електрически загуби само от токовата несиметрия;
- ΔP_{harm} – електрически загуби от висши хармоници;
- ΔP_{1k} – електрически загуби отговарящи на зададения фактор на мощността.

За изследване на процесите в електроенергийна система на плавателен съд е разработен модел на генераторно поле, запазващо различни компоненти на системата, в среда на Matlab Simulink (фиг.2.15).

Разработеният модел позволява чрез измерване на токовете и напреженията да се оцени състоянието на електроенергийната система на плавателния съд в различни нейни точки, прилагайки разработените информационни технологии за определяне компонентите на пълната мощност, показателите за качеството на електрическата енергия и електрическите загуби в разпределителната мрежа на корабните електроенергийни системи.

За конфигуриране параметрите на разработения модел са използвани данни от техническата документация на круизен кораб „Grandeur of the Seas“ [?].

- Синхронен генератор – $S_n = 16000\text{kVA}$, $U_n = 6600\text{V}$, $f_n = 60\text{Hz}$, $\text{PF} = 0.7$, $X_d = 0.186$;
- Силов трансформатор $S_n = 3000\text{kVA}$, $6,6/0,44\text{kV}$, $f_n = 60\text{Hz}$, $u_k = 7\%$, Дун;
- Хотелска част $P_n = 6000\text{kVA}$;
- Обобщено асинхронно електрозадвижване $S_n = 3000\text{kVA}$, $U_n = 440\text{V}$, $f_n = 60\text{Hz}$;



Фигура 2.15: Модел на част от КЕЕС в среда на Matlab Simulink

- Обобщено асинхронно електрозадвижване $S_n = 8300\text{kVA}$, $U_n = 6600\text{V}$, $f_n = 60\text{Hz}$;
- Пропулсивна електрическа уредба $S_n = 17000\text{kVA}$, $U_n = 6600\text{V}/1840\text{V}$, $f_n = 60\text{Hz}$, $u_k = 9\%$, $D_{yd}0$.

Корабната електроенергийна система е комплексна структура, състояща се от синхронни и асинхронни електрически машини, електрически апарати, силови полупроводникови преобразуватели, свързани посредством съответните фидери, което е предпоставка за възникване на сложни комутационни процеси. Поради факта, че целта на симулационното изследване е да се оценят разработените информационни технологии за определяне компонентите на пълната мощност, показателите за качеството на електрическата енергия и електрическите загуби в разпределителната мрежа на корабните електроенергийни системи в установен режим, за да се минимизира влиянието на преходните процеси върху получените резултати, с цел обективна оценка, симулационното изследване е извършено при следните допускания:

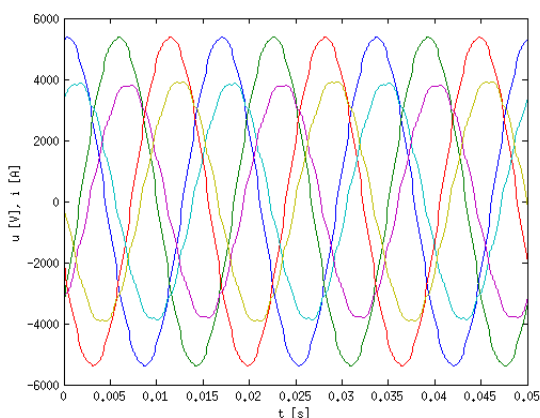
- Три работещи едновременно синхронни генератора;
- Общо натоварване в рамките на 70 – 80 %, съобразено с изискванията на сертифициращите органи;

- Несиметричен товар на ниво 0,44 kV;
- Пропулсивната уредба е представена чрез нелинеен товар със съответната мощност;
- Асинхронните двигатели са представени като обобщени RL товари;

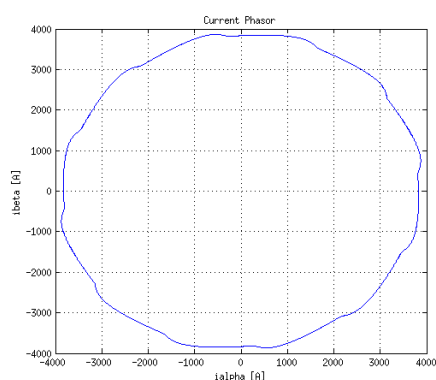
Резултатите, получени при изследване състоянието на електроенергийната система в главно разпределително табло са представени на следващите фигури, както следва:

ГЛАВНО РАЗПРЕДЕЛИТЕЛНО ТАБЛО

Кривите на напреженията и токовете, измерени на шините на главно разпределително табло, имат формите, представени на фиг.2.16. Измененията на моментните стойности на токовете във времето резултират в изменение формата на ходографа на „изобразяващите” им вектори (фиг.2.17б).

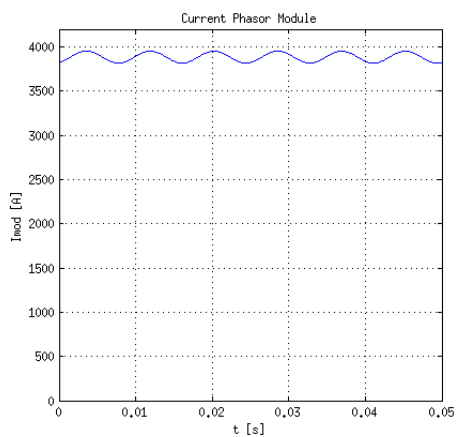


(а) Фиг.2.16

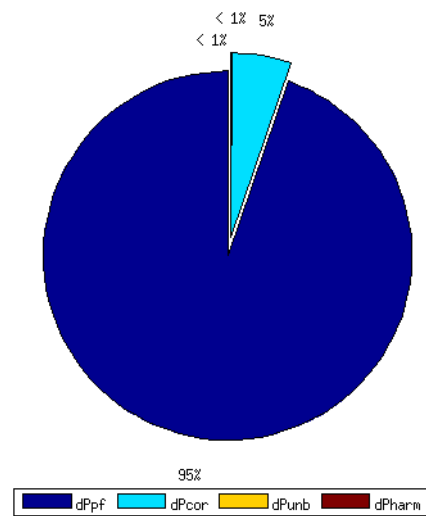


(б) Фиг.2.17б

Изменението на модулите на „изобразяващите” вектори дава възможност да се оцени несиметрията в трифазните величини напрежение и ток, измерени на шините на главно разпределително табло (фиг.2.18б). Графично разпределението на електрическите загуби, отчетени в ГРТ е представено на фиг.2.22а.



(а) Фиг.2.186



(б) Фиг.2.22а

Обобщените резултати за показателите за качество на електрическата енергия и разпределението на електрическите загуби, отчетени в ГРТ са представени в таблица 2.1:

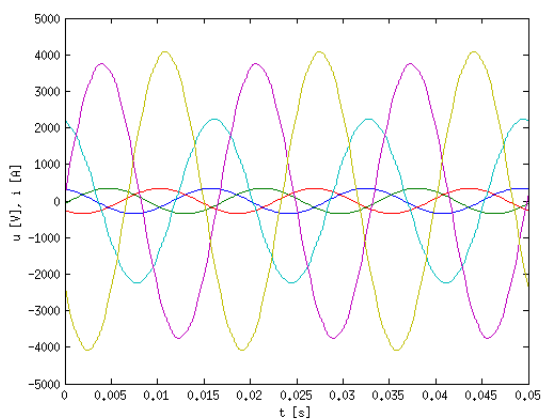
Таблица 2.1: Резултати ГРТ

No	Параметър	Стойност
1	U_a	3799.50 V
2	U_b	3806.17 V
3	U_c	3802.17 V
4	$f1_u$	60 Hz
5	$K_{u_{unb}}$	0.10 %
6	THD_u	2.25 %
7	I_a	2742.54 A
8	I_b	2709.49 A
9	I_c	2792.02 A
10	$f1_i$	60 Hz
11	$K_{i_{unb}}$	1.75 %
12	THD_i	2.65 %
13	S	31351319.71 VA
14	P	28969729.00 W
15	P_{1harm}	28969664.28 W
16	Q	11932382.40 VA _r
17	Q_{1harm}	11924306.32 VA _r
18	N	533041.53 VA
19	D	997078.69 VA
<i>следва продължение</i>		

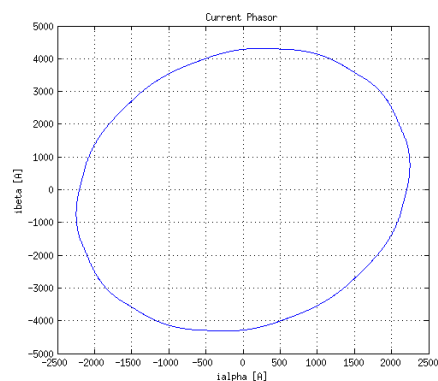
(продължение)		
No	Параметър	Стойност
20	$\cos\varphi$	0.9247
21	$K_{M(unb)}$	0.9245
22	$K_{M(harm)}$	0.9242
23	K_M	0.9240
24	$\cos\varphi(cor)$	0.95
25	ΔP_Σ	100 %
26	ΔP_1	99.9 %
27	ΔP_{pf}	94.66 %
28	ΔP_{cor}	5.24 %
29	ΔP_{unb}	0.03 %
30	ΔP_{harm}	0.07 %

ХОТЕЛСКА ЧАСТ

Кривите на напреженията и токовете, измерени на шините на главно разпределително табло, имат формите, представени на фиг.2.23. Измененията на моментните стойности на токовете във времето резултират в изменение формата на ходографа на „изобразяващите” им вектори (фиг.2.24б).

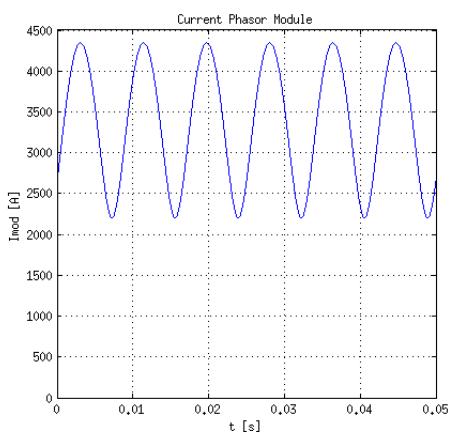


(а) Фиг.2.23

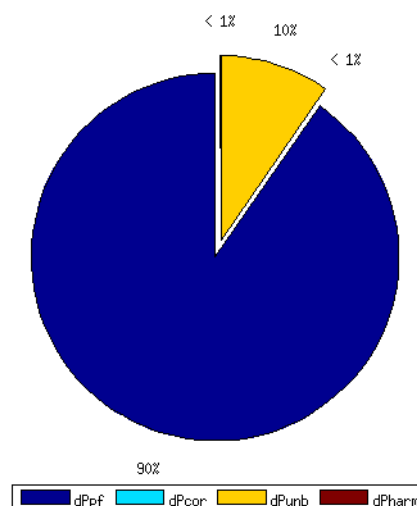


(б) Фиг.2.24б

Изменението на модулите на „изобразяващите” вектори дава възможност да се оцени несиметрията в трифазните величини напрежение и ток, измерени на шините на главно разпределително табло (фиг.2.25б). Графично разпределението на електрическите загуби, отчетени в хотелска част е представено на фиг.2.27а.



(а) Фиг.2.25б



(б) Фиг.2.27

Обобщените резултати за показателите за качество на електрическата енергия и разпределението на електрическите загуби, отчетени в СРТ–Хотел са представени в таблица 2.2:

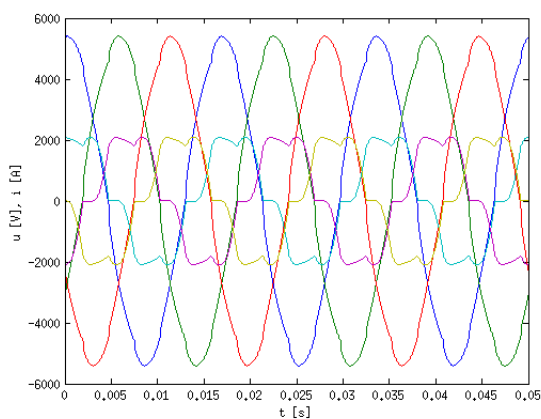
Таблица 2.2: Резултати СРТ–Хотел

No	Параметър	Стойност
1	U_a	244.32 V
2	U_b	247.46 V
3	U_c	242.16 V
4	$f1_u$	60 Hz
5	$K_{u_{unb}}$	1.26 %
6	THD_u	1.58 %
7	I_a	1583.44 A
8	I_b	2649.19 A
9	I_c	2876.26 A
10	$f1_i$	60 Hz
11	$K_{i_{unb}}$	32.66 %
12	THD_i	1.58 %
13	S	1787762.58 VA
14	P	1698653.30 W
15	P_{1harm}	1698306.64 W
16	Q	13914.89 VAr
17	Q_{1harm}	13921.32 VAr
18	N	553166.80 VA
19	D	66969.38 VA
<i>следва продължение</i>		

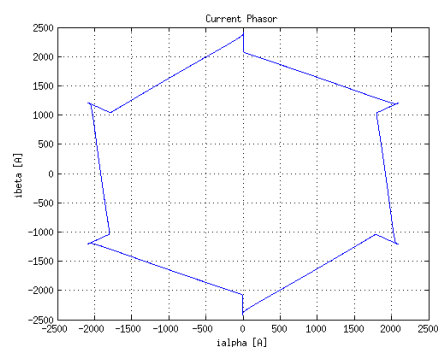
(продължение)		
No	Параметър	Стойност
20	$\cos\varphi$	1.0000
21	$K_{M(unb)}$	0.9508
22	$K_{M(harm)}$	0.9992
23	K_M	0.9502
24	$\cos\varphi(cor)$	1.00
25	ΔP_Σ	100 %
26	ΔP_1	90.35 %
27	ΔP_{pf}	90.34 %
28	ΔP_{cor}	0.01 %
29	ΔP_{unb}	9.63 %
30	ΔP_{harm}	0.02 %

ПРОПУЛСИВНА УРЕДБА

Кривите на напреженията и токовете, измерени на шините на главно разпределително табло, имат формите, представени на фиг.2.33. Измененията на моментните стойности на токовете във времето резултират в изменение формата на ходографа на „изобразяващите” им вектори (фиг.2.34б).

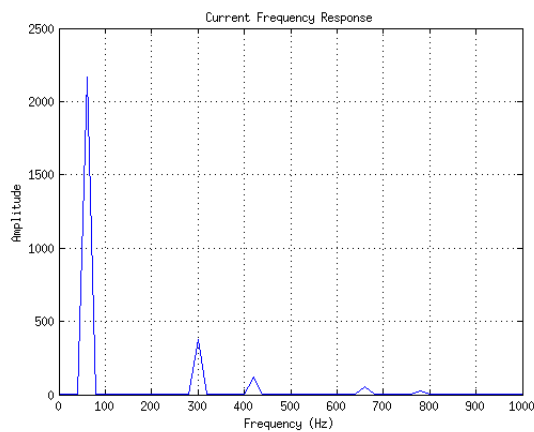


(а) Фиг.2.33

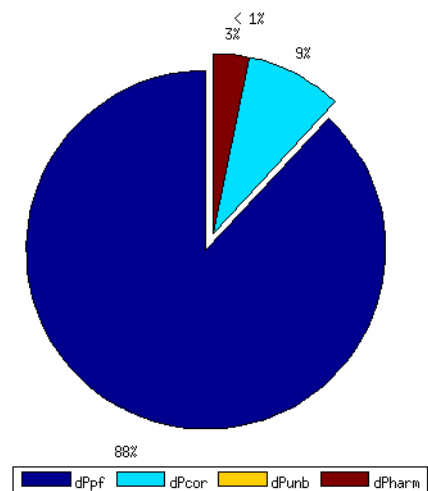


(б) Фиг.2.34б

Информационната технология за мониторинг на електроенергийните процеси в корабните електроенергийни системи дава възможност, чрез развитие в ред на Фурие, да се наблюдава амплитудата на хармоничните съставки в кривите на напрежението и тока, (фиг.2.35б). Графично разпределението на електрическите загуби, отчетени в пропусливна уредба при 6-фазно преобразуване е представено на фиг.2.36.



(а) Фиг.2.35б



(б) Фиг.2.36

В резултат на направените изследвания, свързани с разработените информационни технологии за определяне компонентите на пълната мощност, показателите за качеството на електрическата енергия и електрическите загуби в разпределителната мрежа на корабните електроенергийни системи, могат да бъдат формулирани следните изводи:

1. Уточнено е, че с прилагане теорията на „изобразяващия“ вектор и „моментната“ мощност се създава възможност по един рационален и практично-приложен подход да се извърши оценка на показателите за качеството на електрическата енергия, компонентите на пълната мощност и електрическите загуби, при наличие на смущения от несиметрии и висши хармоници в КЕЕС.
2. Разработен е алгоритъм и съответстваща информационна технология, позволяваща определяне показателите за качеството на електрическата енергия при наличие на несиметрии и висши хармоници в електрическите величини напрежение и ток в КЕЕС.
3. Доказано е, че посредством прилагане теорията на „изобразяващия“ вектор и „моментната“ мощност, на база разработен алгоритъм и съпътстваща информационна технология, могат да се определят от фазни сигнали по напрежение и ток съставките на пълната мощност при наличие на несиметрия и висши хармоници в КЕЕС. При реализираната технология в теоретичен аспект отсъства поява на всякакъв вид методична грешка.
4. Разработен е алгоритъм и информационна технология за определяне на електрическите загуби при наличие на несиметрии и висши хармоници в КЕЕС, реализирани при съответен фактор на мощността на

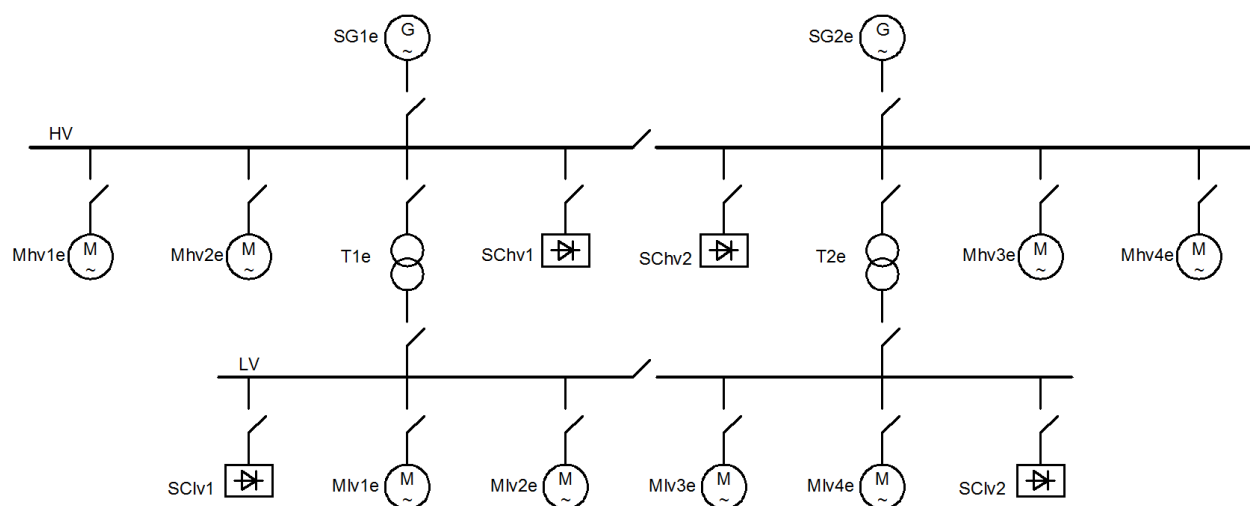
системата. Резултатите се отразяват в процентно отношение за всяка от съставките на пълната мощност, пораждаща загубите, оценени спрямо получените общи загуби.

- Обединяването на горепосочените модули на разработените информационни технологии, създаде възможност за изграждане на единна информационна технология, даваща възможност за цялостна оценка на електроенергийното състояние на КЕЕС, при наличие на смущения от несиметрии и висши хармоници на системата като цяло, или в отделни нейни участъци. Това осигурява предпоставки за осъществяване на обективни оценки при реализиране на планова дейност, свързана с енергийната ефективност на плавателните съдове.

ТРЕТА ГЛАВА

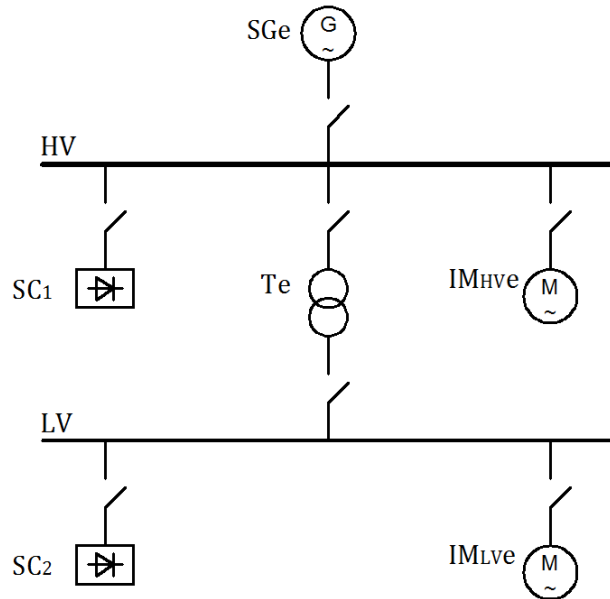
Разработка на практически-приложни методи за оценка и минимизиране влиянието на висшите хармоници в корабните електроенергийни системи

Съществува разнообразие в структурата на електроенергийните системи на плавателните съдове, но ако те бъдат внимателно анализирани по отношение на основните източници и консуматори на електрическа енергия, значителна част от тези системи могат да бъдат представени като производни на тази, изобразена на фиг.3.3.



Фигура 3.3: Корабна електроенергийна система

Съобразявайки се с възприетите допускания за електроенергийните системи, за фрагменти с еднакъв коефициент на трансформация на силовите трансформатори, схемата на електроенергийна система на плавателен съд с еквивалентирани елементи може да се представи, като тази на фиг.3.4.

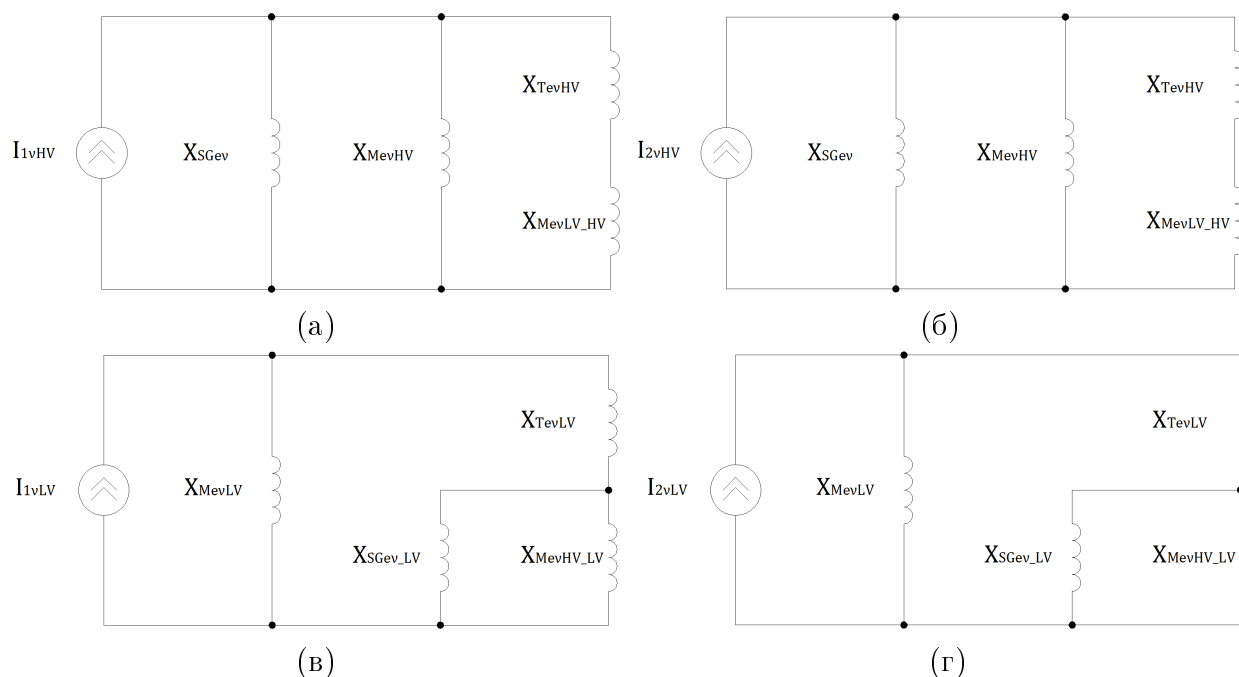


Фигура 3.4: Корабна електроенергийна система с еквивалентирани елементи

На базата на тези разсъждения се съставя заместващата схема, за една фаза, на корабната електроснабдителна система за токовете на висшите хармоници. В заместващата схема всички елементи са представени чрез техните индуктивни съпротивления. Статичните преобразуватели се заместват с източници на ток за генерираните от тях висши хармоници. Ако към една секция на шинната система са включени няколко преобразувателя, те се заместват с еквивалентни източници.

В зависимост от положението на статичните преобразуватели в структурата на електроенергийната система и избора на точки за мониторинг, заместващите схеми на електроразпределителната система имат вида, представен на фиг.3.5. Спрямо статичния преобразувател SC1, свързан към шините на главното разпределително табло, който поражда ток на висши хармоници $I_{1\nu HV}$, заместващата схема на електроразпределителната система има вида, представен на фиг.3.5а. На фиг.3.5б е представена заместващата схема на електроразпределителната система при отчитане влиянието на статичния преобразувател SC2, свързан към шините на силово разпределително табло ниско напрежение, който поражда ток на висши хармоници $I_{2\nu HV}$, върху коефициента на несинусоидалност на напрежението, отчитан на шините на главното разпределително табло. Заместващата схема на фиг.3.5в е съставена спрямо статичния преобразувател SC2 по отношение на шините на силово разпределително табло ниско напрежение. Влиянието на статичния преобразувател SC1, свързан към шините на главното разпределително табло, по отношение на шините на силово разпределително табло ниско напрежение се определя на базата на заместващата схема на

електроразпределителната система, представена на фиг.3.5г.



Фигура 3.5: Заместващи схеми на корабната електрозахранителна система

Елементите от заместващите схеми на електрозахранителната мрежа на плавателния съд имат следните значения:

X_{SGev} –представява еквивалентното индуктивно съпротивление на синхронните генератори;

X_{MevHV} –представява еквивалентното индуктивно съпротивление на асинхронните двигатели, свързани към главно разпределително табло;

X_{MevLV} –представява еквивалентното индуктивно съпротивление на асинхронните двигатели, свързани към силово разпределително табло ниско напрежение;

X_{TevHV} –представява еквивалентното индуктивно съпротивление на силовите трансформатори, по отношение на високото напреженово ниво;

X_{TevLV} –представява еквивалентното индуктивно съпротивление на силовите трансформатори, по отношение на ниското напреженово ниво;

X_{SGev_LV} –представява еквивалентното индуктивно съпротивление на синхронните генератори, приведено към ниво ниско напрежение.

X_{MevHV_LV} –представява еквивалентното индуктивно съпротивление на асинхронните двигатели, свързани към главно разпределително табло, приведено към ниво ниско напрежение.

X_{MevLV_HV} –представява еквивалентното индуктивно съпротивление на асинхронните двигатели, свързани към силово разпределително табло ниско напрежение, приведено към ниво високо напрежение.

На базата на разработеният практически-приложен метод в аналитичен вид за оценка коефициента на несинусоидалност на напрежението в

корабните електроенергийни системи е разработен графичен интерфейс (фиг.3.6). Той позволява бързо и без особени усилия, разполагайки с информация за параметрите на елементите, да се определят коефициентите на несинусоидалност на напрежението в отделни възли на корабната електроенергийна система. Това дава възможност, на етап предпроектно проучване, да се определи необходимостта от инсталиране на допълнителни компенсиращи устройства.

Параметрите на елементите от корабната електроенергийна система, въз основа на които е получен резултатът за коефициентите на несинусоидалност на напрежението, изобразен на (фиг.3.6), са подбрани съгласно тези от модела на част от КЕЕС, представен на (фиг.2.15). Целта е да се сравнят резултатите от двете математически изследвания. Получените, в резултат на разработената информационна технология за мониторинг на електроенергийните процеси в корабните електроенергийни системи резултати относно коефициента на несинусоидалност на напрежението, измерено на шините на главно разпределително табло ($THD_u = 2.25\%$) са много близки до тези, получени в резултат на разработеният практически-приложен метод за оценка коефициента на несинусоидалност на напрежението в корабните електроенергийни системи ($THD_{u_{HV}} = 2.17\%$). Тук трябва да се отбележи, че точността на метода е в превес при информационната технология.

От направените сравнения може да бъде обобщено, че разработеният практически-приложен метод за оценка коефициента на несинусоидалност на напрежението в корабните електроенергийни системи, с достатъчна точност, би могъл да намери приложение в предпроектни проучвания при определяне структурата и конфигурацията на КЕЕС.

За сравнение на (фиг.3.7) са представени резултати от схемно решение с включени допълнителни нелинейни товари без компенсация към секция на страна ниско напрежение и тяхното влияние върху изменението на коефициента на несинусоидалност на напрежението.

Разработка на практически-приложен метод за минимизиране влиянието на висшите хармоници в корабните електроенергийни системи

В стремеж за ограничаване на недостатъците, съпровождащи използването на силовите резонансни и активни филтри е разработена концепцията за хибридна система, която се състои от пасивен резонансен филтър и активно звено. Такова решение елиминира споменатите, по-горе, недостатъци на резонансните филтри при значително по-малка мощност на активното звено, особено по отношение на електроенергийни системи за средни и големи мощности. Резонансните филтри могат да намерят широко приложение като настройващи се елементи в хибридната структура за филтриране на висшите хармоници в корабната електроенергийна система, което би осигу-

рило възможност за значително ограничаване на мощността и стойността на активното звено, което има значителна цена и сложна структура, особено при мощните силови уредби.

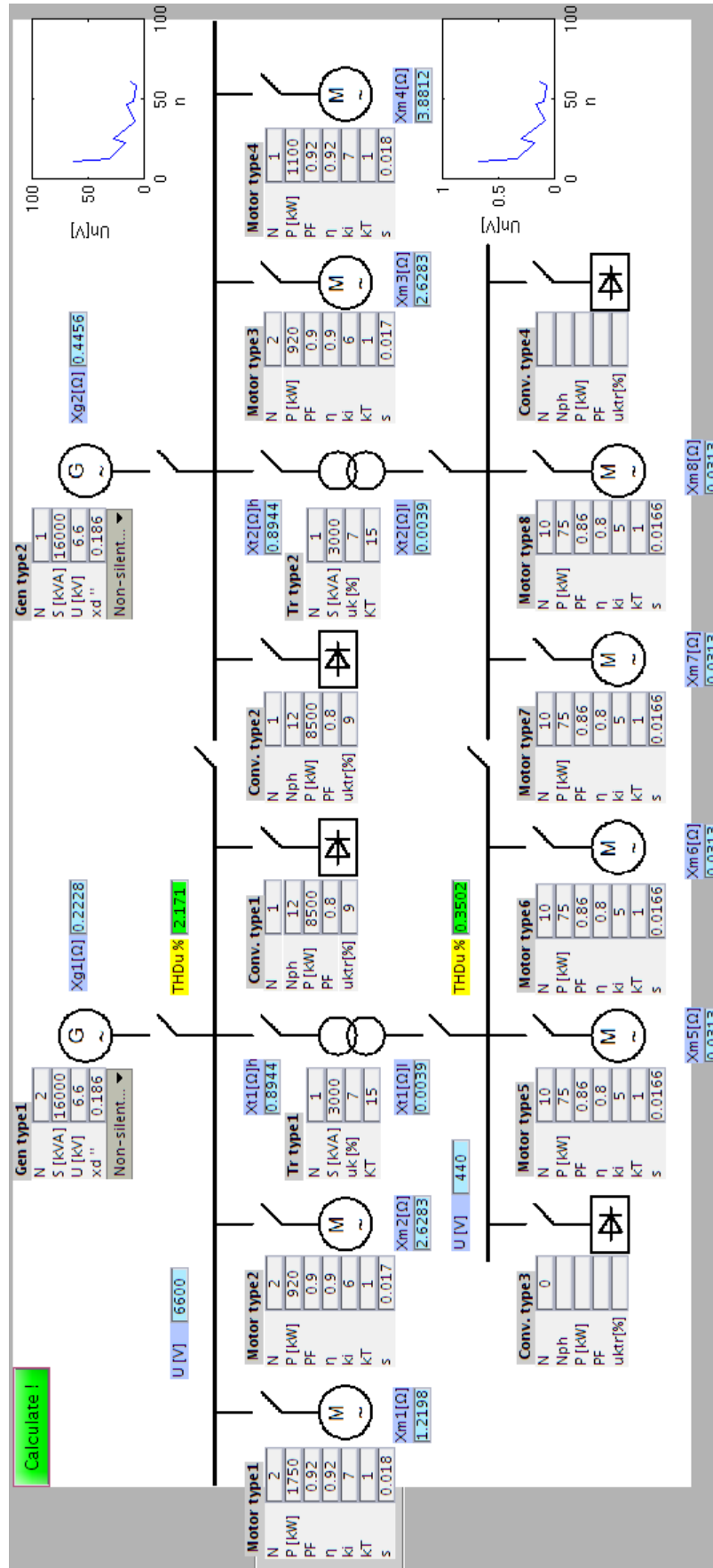
За целта на изследването, с оглед на възможността за точна оценка на получените резултати, разглеждаме опростена система, състояща се от трифазен източник на електрическа енергия, захранващ трифазен нелинеен консуматор, който е съставен от мостов изправител и активен товар, (фиг.3.15).

Отчитайки спецификата на автономната електроенергийна система с ограничена мощност, каквато е тази на плавателния съд, където честотата е динамична величина, променяйки се при промяна на мрежовата конфигурация можем да се базираме на нормативните изисквания на регулаторните органи. Съобразно това, при изменение на честотата на генерираното напрежение в рамките на допустимите стойности $\Delta f = \pm 5\%$, или $47.5\text{Hz} \leq f \leq 52.5\text{Hz}$, за изменението на коефициента на несинусоидалност на напрежението и тока получаваме следните резултати, (фиг.3.13) и (фиг.3.14):

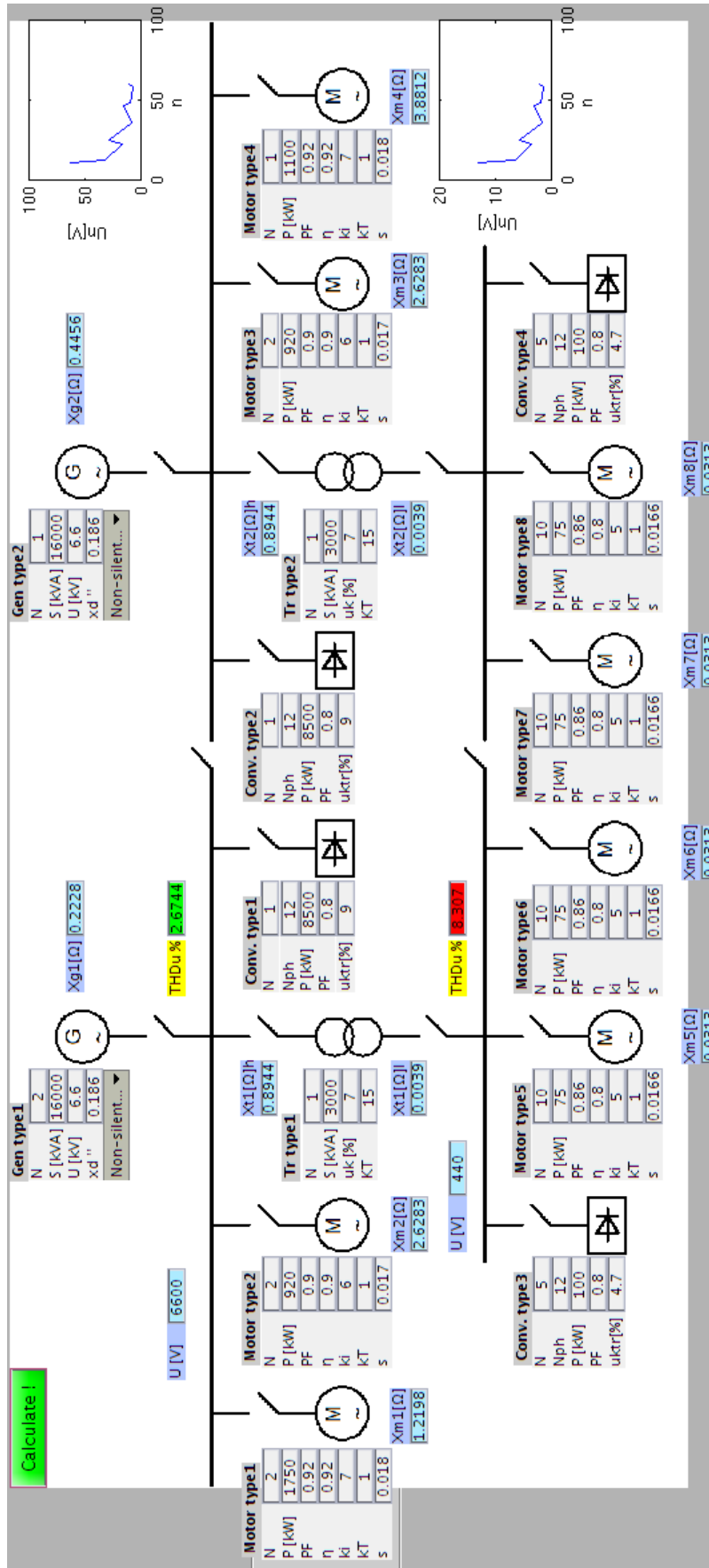
Получените резултати свидетелстват за значително нарастване на коефициентите на несинусоидалност на напрежението и тока, независимо, че колебанието на честотата е в допустими, от гледна точка на стандартите, стойности, което резултира във влошаване формата на кривите на величините.

От направените изследвания може да се направи и още един извод, а именно че изменението на честотата под номиналната води до по-значителни изменения в коефициентите на несинусоидалност. Причина за това се явява импедансът на силовия филтър, който за тези честоти има капацитивен характер и е предпоставка за образуване на паралелни резонанси с имащия индуктивен характер импеданс на електроразпределителната мрежа.

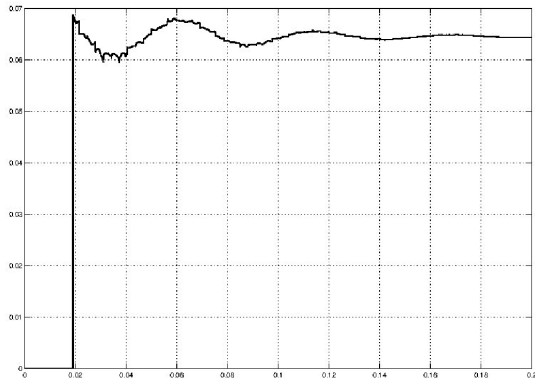
За да се избегнат тези негативни явления, които съществено ограничават приложението на силовите резонансни филтри в корабните електроенергийни системи, е разработена концепция за хибриден филтър, на базата на изследването, досега, схемно решение, (фиг.3.16).



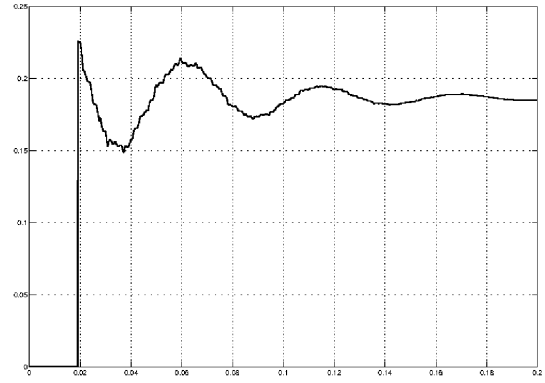
Фигура 3.6: Графичен интерфейс на разработеният практически-приложен метод за оценка коефициента на несинусоидалност на напрежението в корабните електроенергийни системи



Фигура 3.7: Резултати от схемно решение с включени допълнителни нелинейни товари без компенсация към секция на страна ниско напрежение

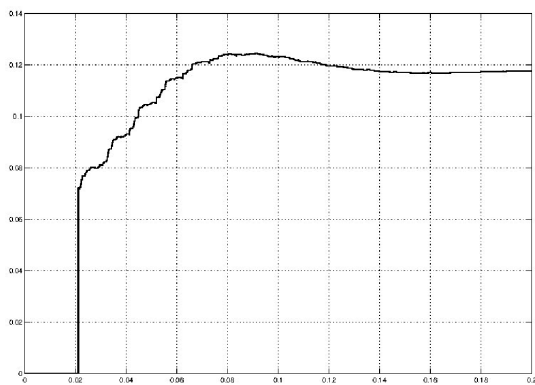


(a) THDu

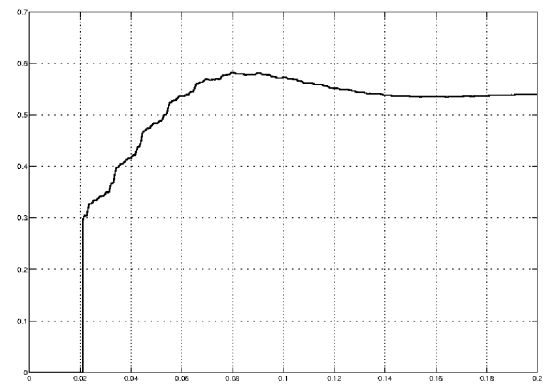


(б) THDi

Фигура 3.13: Коефициент на несинусоидалност на напрежението и тока при гранична честота 52.5 [Hz]

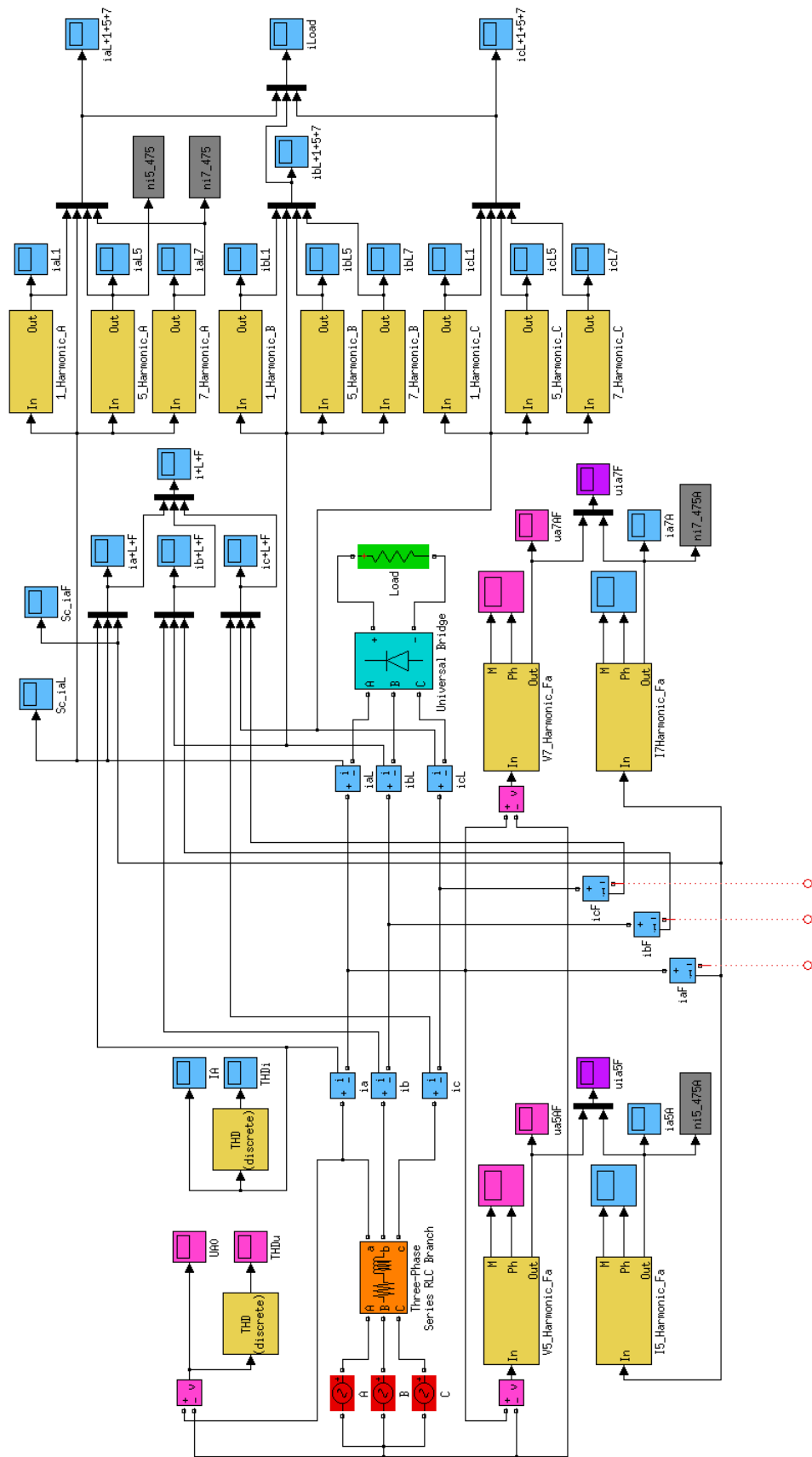


(a) THDu

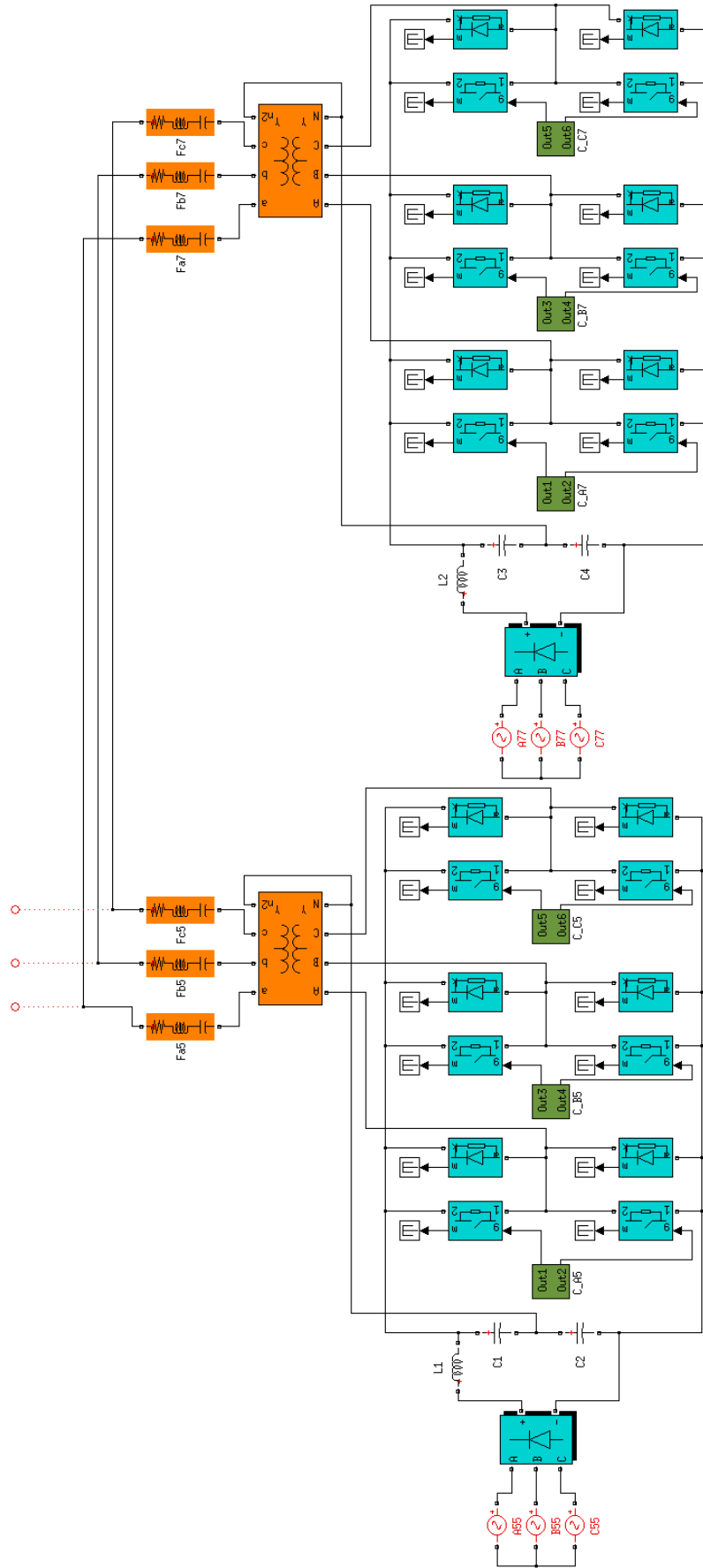


(б) THDi

Фигура 3.14: Коефициент на несинусоидалност на напрежението и тока при гранична честота 47.5 [Hz]



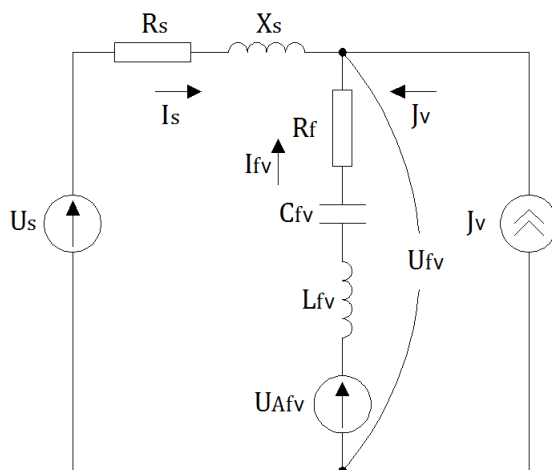
Фигура 3.15: Модел за разработка и изследване на хибриден филтър, приложим в условията на работа на корабна електроенергийна система



Фигура 3.16: Модел на хибриден филтър, приложим в условията на работа на корабна електроенергийна система

За да се определят параметрите на активната съставка на хибридният филтър разглеждаме заместваща схема за една от фазите на изследваната опростена система с включен към нея резонансен филтър.

При промяна в честотата условието за резонанс за съответния хармоник се нарушава, в резултат на което заместващата схема с включен вече хибриден филтър добива вида от (фиг.3.19), където U_{Afv} представлява активната съставка на хибридният филтър.



Фигура 3.19: Заместваща схема за една от фазите при липса на условие за резонанс с включен хибриден филтър

Очевидно, активното звено на хибридният филтър трябва да осигури условия токът, протичащ през филтъра, да има амплитуда максимално близка с тази, на хармоничната съставка на тока, генериран от нелинейния товар за съответния хармоник, и противоположна фаза, т.е. $I_{fv} = -J_v$.

Активното звено е реализирано чрез източник на напрежение, амплитудата на което е определена чрез измерване на стойностите на напрежението и тока на филтъра, за съответния хармоник, както и хармоничната съставка на тока, генериран от нелинейния товар за съответния хармоник, т.е.:

$$Z_{fv} = \frac{U_{fv}}{I_{fv}} \quad (3.56)$$

$$U_{Afv} = J_v Z_{fv} \quad (3.57)$$

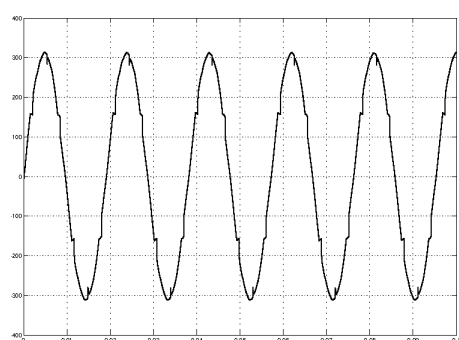
Фазата на напрежението, генерирано от активното звено на хибридният филтър, е определена, сравнявайки фазата на тока през филтъра и противофазата на напрежението, за съответния хармоник, базирайки се на условието за резонанс, при което напрежението върху филтъра и тока през него са във фаза.

Изследването на схемното решение с включен разработеният хибриден

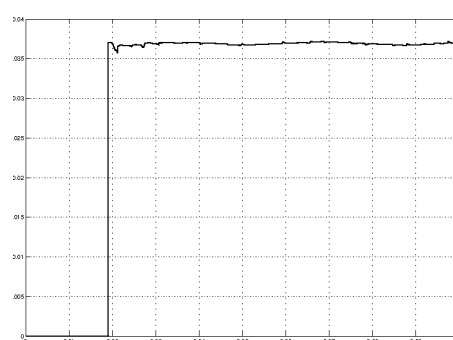
филтър, базирайки се на горе-изложената методика дава следните резултати, изобразени на (фиг.3.20) и (фиг.3.21). В резултат на анализа, определените параметри на активното звено са поместени в таблица 3.1.

Таблица 3.1

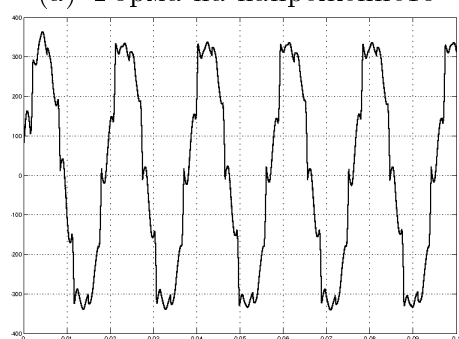
Честота [Hz]	47.5	47.5	52.5	52.5
Хармоник	5	7	5	7
Амплитуда [V]	12	6	25	7
Фаза [rad]	2.39	1.46	3.14	2.62



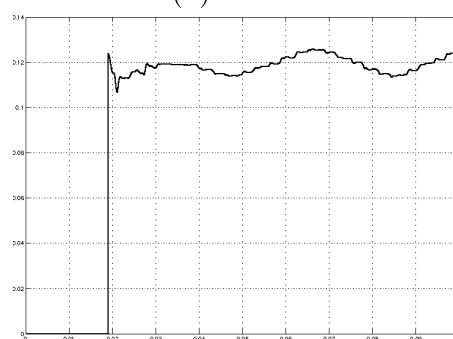
(а) Форма на напрежението



(б) THDu



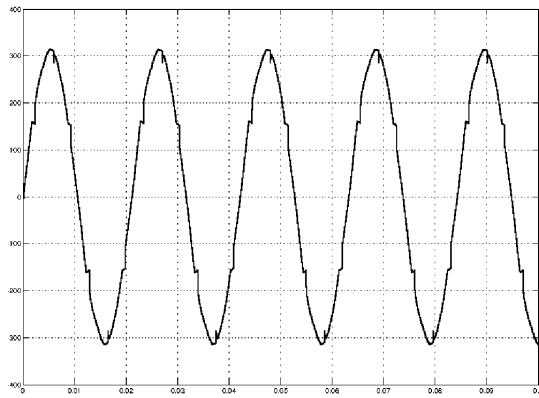
(в) Форма на тока



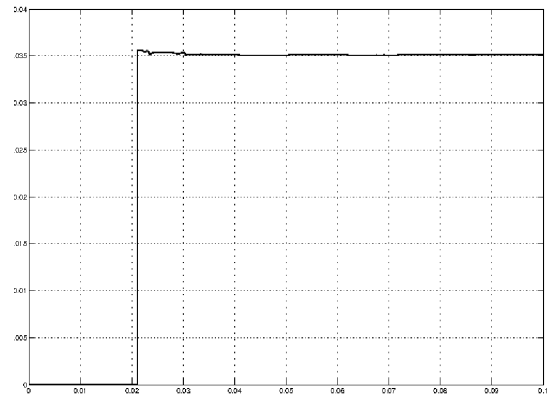
(г) THDi

Фигура 3.20: Резултати за напрежението и тока на една от фазите, при използване на силови хибридни филтри за компенсация на 5-ти и 7-ми хармоник, при гранична честота 52.5 [Hz]

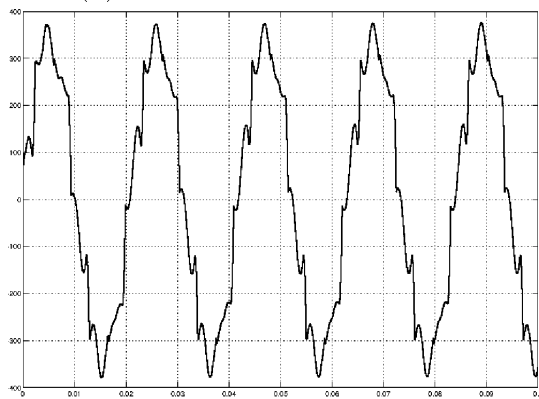
Анализирайки резултатите бихме могли да обобщим: с допълнителна инсталирана мощност в рамките на 10% от мощността на нелинейния товар, необходима за реализация на активния компонент от разработения хибриден филтър, за гранично-допустимите от стандартите честоти 47.5 Hz и 52.5 Hz, коефициентът на несинусоидалност на тока бива коригиран съответно от 19% до 11.5% за честота 52.5 Hz и от 53% до 13.2% за честота 47.5 Hz. По този начин коефициентът на несинусоидалност на напрежението, чиято величина е нормирана от стандартите на регулаторните органи,



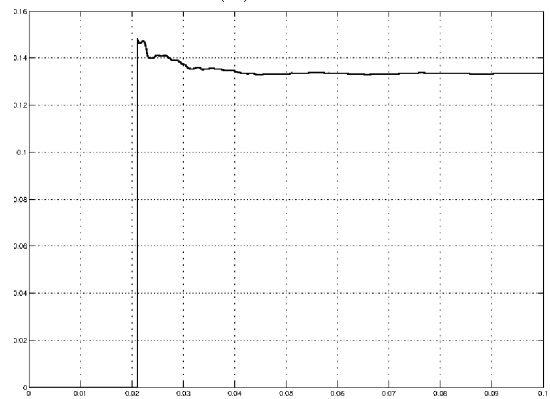
(а) Форма на напрежението



(б) THDu



(в) Форма на тока



(г) THDi

Фигура 3.21: Резултати за напрежението и тока на една от фазите, при използване на силови хибридни филтри за компенсация на 5-ти и 7-ми хармоник, при гранична честота 47.5 [Hz]

бива поддържана около 3.5%, което удовлетворява всички нормативни документи.

Освен функционалност, разработеният хибриден филтър има още едно съществено предимство в конструктивно отношение. Активното звено на филтъра, проектирано като източник на напрежение е моделно реализирано като инвертор, преобразуващ изправеното мрежово напрежение в напрежение със съответната честота, в зависимост от хармоника, и с подходяща амплитуда и фаза. Инверторът е реализиран с набор от електронни ключове, чието управление се осъществява чрез поредица от еднополярни правоъгълни импулси с еднаква честота и амплитуда.

В резултат на направените изследвания, свързани с разработените практически-приложни методи за оценка и минимизиране влиянието на висшите хармоници в корабните електроенергийни системи, представени в настоящата глава от дисертационния труд, могат да бъдат формулирани следните изводи:

1. Разработен е подход, свързан с осъществяване на практично-

приложим анализ за определяне коефициента на несинусоидалност на напрежението в проектантска фаза при комплектоване на силовите елементи в корабната електроенергийна система.

2. Реализираният подход се характеризира с удобство и достъпност, както и с достигане на достатъчна инженерна точност при оценка на коефициента на несинусоидалност на напрежението. Това се постига чрез непосредствено въвеждане параметрите на генериращите, преобразуващите и потребляващи мощности в корабната електроенергийна система.
3. Разработена е структура на силов хибриден филтър, съвместно със системата му за управление, предназначен за работа в корабни условия, включващ звена само за пети и седми хармоник.
4. Доказана е работоспособността на силовия хибриден филтър в условията на корабната електроенергийна система. Проведените изследвания показват неговата функционална годност при изменение на захранващата честота в нормативно-установените граници от 47,5 до 52,5 Hz, при номинална честота 50 Hz.
5. Изяснено е, че мощността на активната съставяща на филтъра не превишава 10% от мощността на смутителя, за който е предназначен. Това прави хибридният филтър технико-икономически пригоден за използване в корабни условия, с цел подобряване на електроенергийната ефективност в плавателните съдове.

ЧЕТВЪРТА ГЛАВА

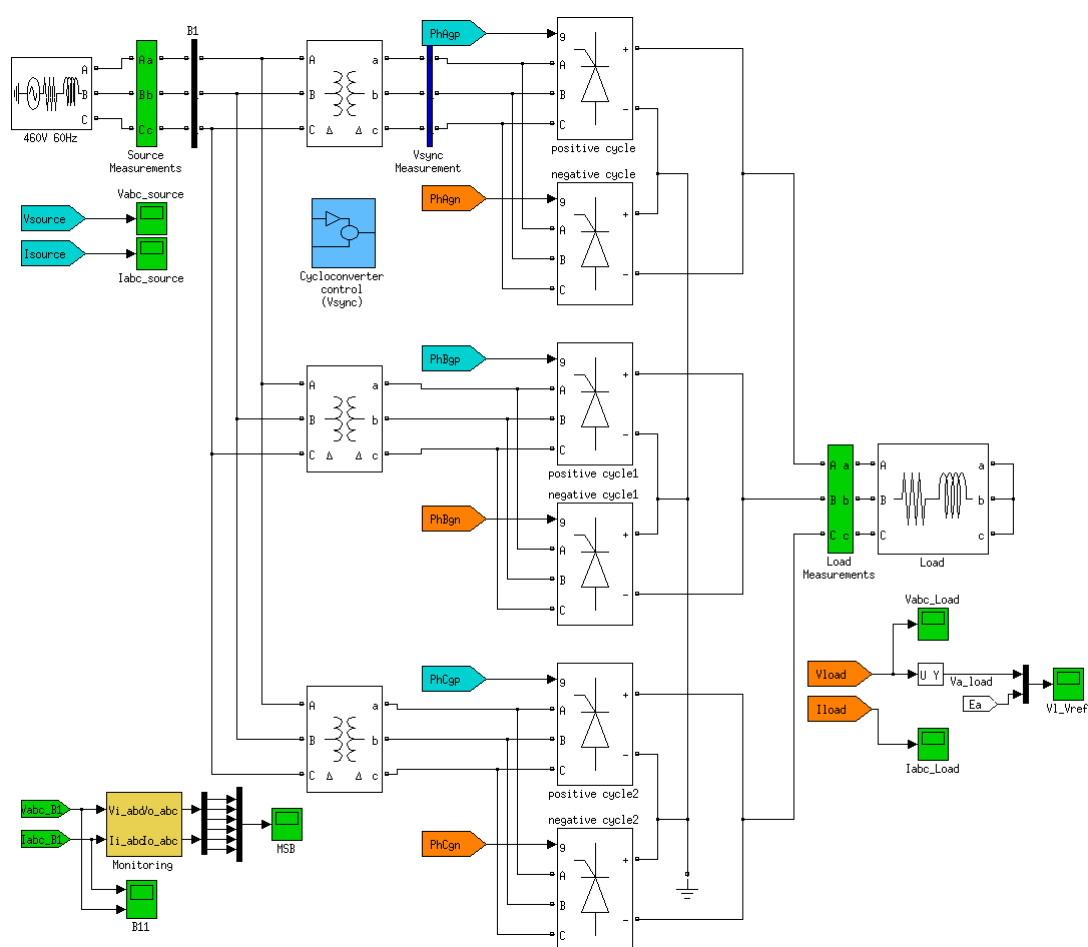
Оценка на съвременните корабни електрозадвижвания от гледна точка на концепцията за енергийна ефективност

От направеният анализ на технологиите, използвани за реализиране на променливотокови управляеми електрозадвижвания бихме могли да направим следните изводи:

- В съвременните интегрирани електроенергийни системи на плавателните съдове за регулиране скоростта на силовите електрозадвижвания, практически са се наложили циклоконверторните системи и тези със звено за постоянен ток, като при тях предимството в реализациите е на страната на инверторните системи, работещи като източник на напрежение.
- Векторно управление и пряко управление на момента се налагат като водещи технологии за реализиране управлението на инверторните системи.

На базата на тези заключения, най-използваните схемни реализации са изследвани относно електрическите загуби, които предизвикват в корабната електроенергийна система като за целта е използвана, разработената и представена в Глава 2 на настоящата дисертационна работа, информационна технология за мониторинг на електроенергийните процеси в корабните електроенергийни системи.

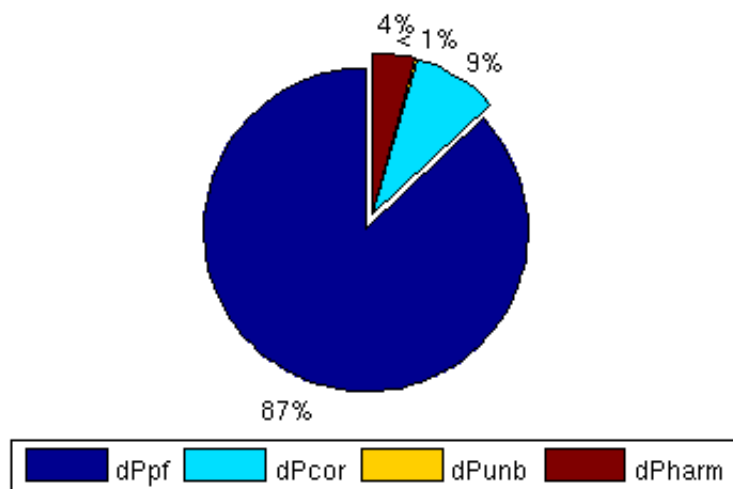
Изследването на електрическите загуби, предизвикани от работата на циклоконверторна система за захранване и инверторна система със звено за постоянен ток, са реализирани в среда на Matlab Simulink, като за целта са използвани модифицирани модели от библиотеките на програмния продукт, (фиг.4.6), (фиг.4.13).



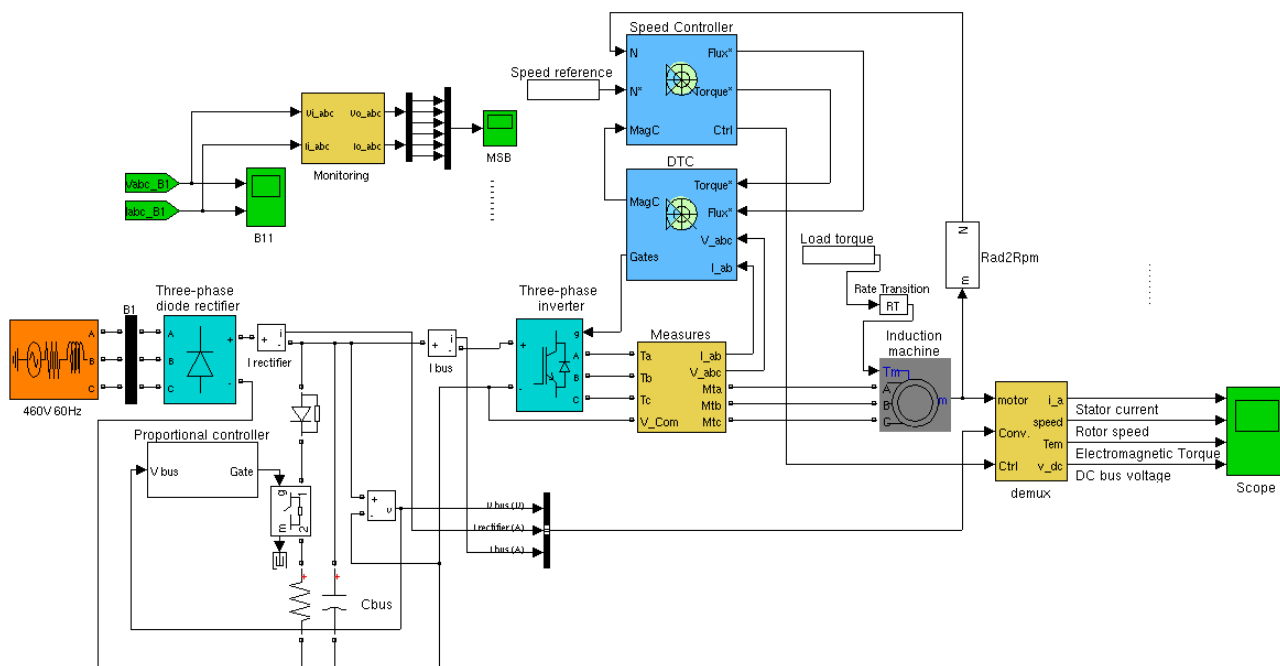
Фигура 4.6: Модел на циклоконверторна система за захранване

Графичната интерпретация на разпределението на електрическите загуби в електроразпределителната мрежа, захранваща циклоконверторна система за управление е представена на фиг.4.12.

Графичната интерпретация на разпределението на електрическите загуби в електроразпределителната мрежа, захранваща инверторна система с пряко управление на момента на електрическия двигател е представена на фиг.4.18.



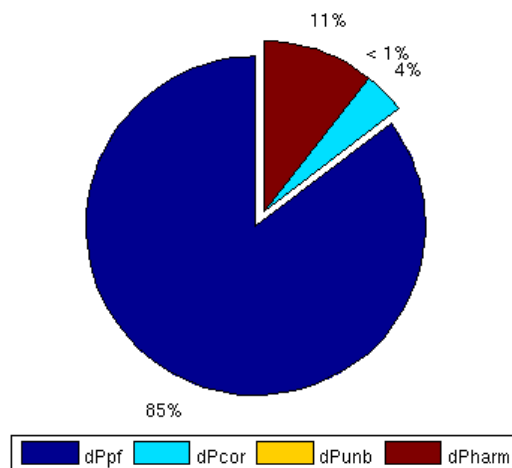
Фигура 4.12: Графично разпределение на загубите в захранващата мрежа на циклоконверторна система



Фигура 4.13: Модел на инверторна система със звено за постоянен ток

В резултат на направените изследвания, свързани с анализа и оценка влиянието на съвременните методи за управление корабни електрозадвижвания върху електроразпределителните мрежи на корабните електроенергийни системи, представени в настоящата глава от дисертационния труд, могат да бъдат формулирани следните изводи:

1. Изяснено е, че в съвременните плавателни съдове, от функционални и енергетични съображения, най-широко приложение в пропульсивните



Фигура 4.18: Графично разпределение на загубите в захранващата мрежа на инверторна система със звено за постоянен ток

и подрулващи уредби са намерили електрозадвижвания с непосредствена връзка – циклоконверторни и такива с преобразуватели със звено за постоянен ток (инверторни честотопреобразуватели).

2. Реализираното изследване на гребни електрически уредби показва, че при различните изпълнения използваните честотно-регулируеми електрозадвижвания се характеризират с определени предимства и недостатъци, от гледна точка на концепцията за енергийна ефективност на кораба.
3. Обосновано доказано е, че циклоконверторните електрозадвижвания имат по-нисък коефициент на несинусоидалност по ток, по-ниски загуби от висши хармоници и по-висок резултативен фактор на мощността в сравнение с тези, със звено за постоянен ток.
4. Изяснено е, че независимо от съществуването на известни различия в качествените и енергетични показатели, които се получават при експлоатация на електрозадвижванията, в зависимост от конкретните функционални характеристики на плавателните съдове при използването на гребни електрически уредби, се отчитат и следните особености на електрозадвижванията:
 - при гребни електрически уредби с циклоконвертори на изхода блока за преобразуване на честота стойностите не падат под 40% от основната честота, т.е. честотното регулиране е ограничено. В областта на ниските натоварвания силно се завишава неси-

нусоидалността в захранващото напрежение на електрическият двигател;

- при гребни електрически уредби с преобразуватели на честота със звено за постоянен ток се осъществява възможност за голяма дълбочина на регулиране на честотата на захранване на електрозадвижването. Тя може да достигне до няколко херца, като диапазона на регулиране надхвърля 1:100.

5. Приложението на двете основно анализирани електрозадвижвания, в качеството на гребни електрически уредби, се обосновава от технико-икономически съображения при изграждането на плавателните съдове с отчитане на мореходните им характеристики и акватория на плаване.

ПЕТА ГЛАВА

Експериментално изследване на разработената информационна технология за определяне компонентите на пълната мощност, показателите за качеството на електрическата енергия и електрическите загуби при нелинеен и несиметричен товар

В тази глава са представени резултатите от експерименталните изследвания на разработената информационна технология за определяне компонентите на пълната мощност, показателите за качеството на електрическата енергия и електрическите загуби в автономна електроенергийна система.

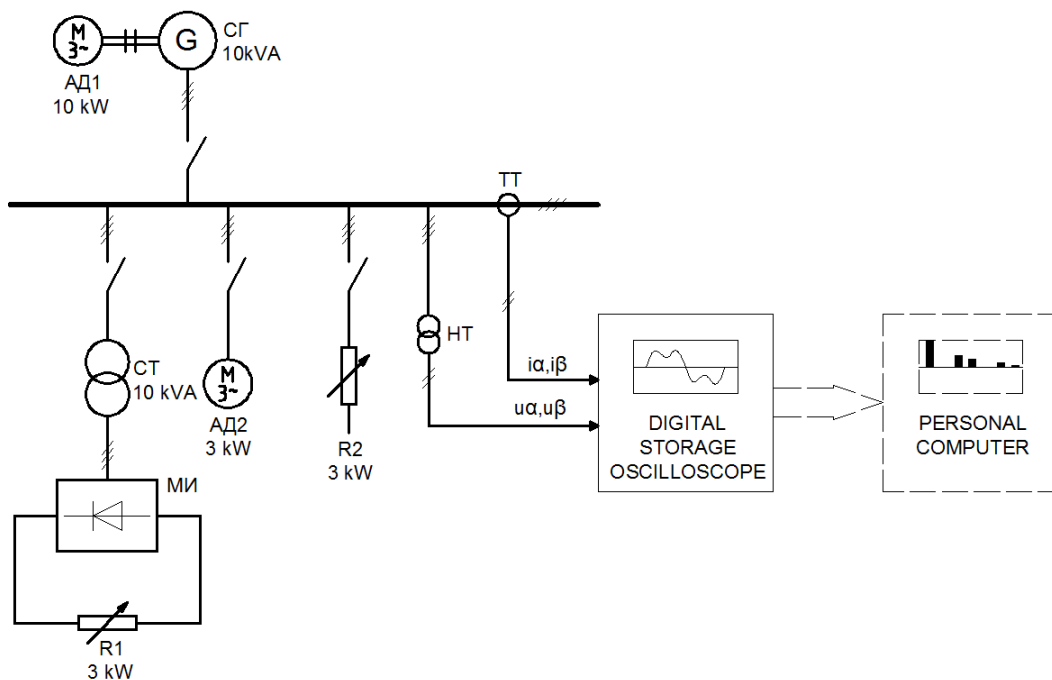
Изследваната автономна електроенергийна система симулира фрагмент от корабна електроенергийна система, реализирана в лабораторни условия, (фиг.5.1).

Първичният двигател, представляващ асинхронен двигател АД1, задвижва безчетков синхронен генератор с номинална мощност $S_G = 10kVA$, който захранва главно разпределително табло. Към главното разпределително табло, посредством секционирани трансформатор с мощност $S_T = 10kVA$, е свързан неуправляем мостов изправител, който захранва управляем активен товар R_1 . Към шините на генератора, в процеса на изследване, се включват асинхронен двигател АД2, с номинална мощност $3kW$ и трифазен активен товар R_2 , чиято мощност може да бъде пофазно регулирана.

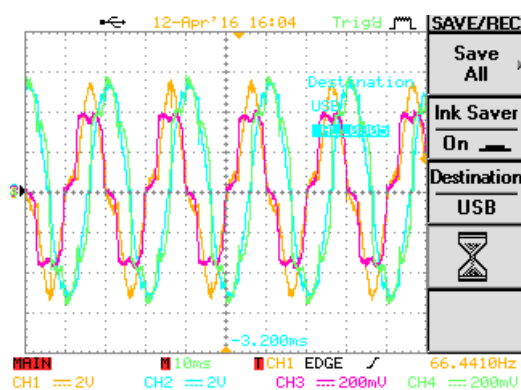
Формите на напреженията и токовете, в $\alpha\beta$ координатна система, измерени от цифровия осцилоскоп, са представени на фиг.5.21.

Ходографите, описани от изобразяващите вектори на напрежението и тока, са представени на фиг.5.8.

От формата на ходографите на изобразяващите вектори на напрежението и тока лесно може да се установи наличието на несиметрия и висши



Фигура 5.1: Еднолинейна схема на експерименталната постановка

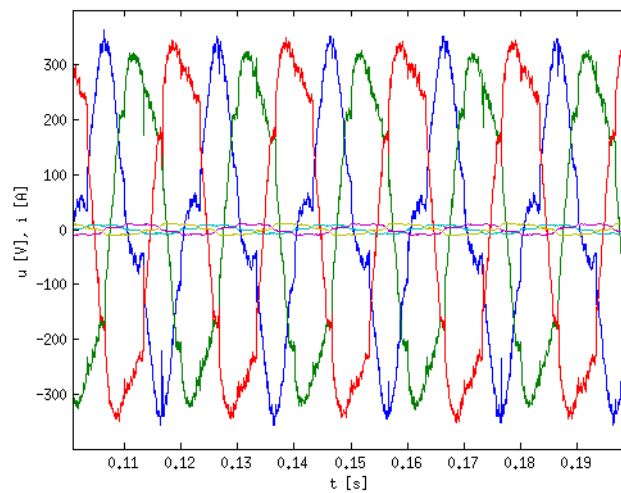


Фигура 5.21: Форми на напреженията и токовете, в $\alpha\beta$ координатна система, цифров осцилоскоп

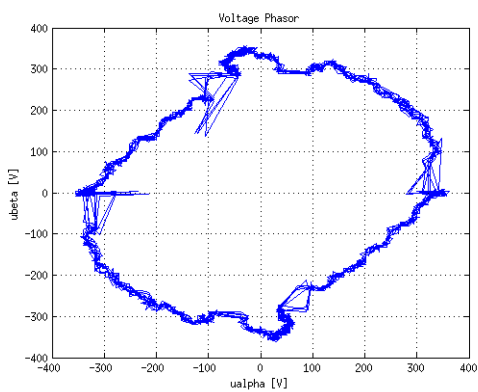
хармоници във формите на електрическите величини, доказателство за което е хармоничния анализ, представен на фиг.5.27.

Модулите на изобразяващите вектори на напрежението и тока са представени на фиг.5.28.

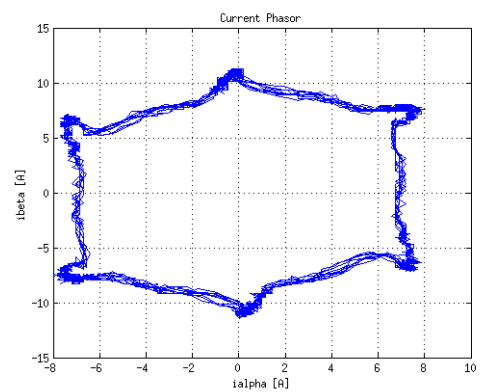
Графично разпределението на електрическите загуби е представено на фиг.5.29.



Фигура 5.24: Форми на напреженията и токовете, в *abc* координатна система

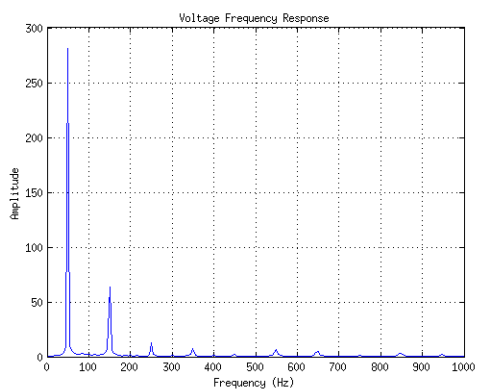


(а) На напрежението

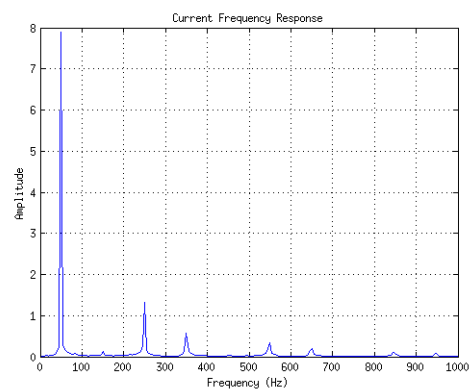


(б) На тока

Фигура 5.26: Ходографи на изображаващите вектори

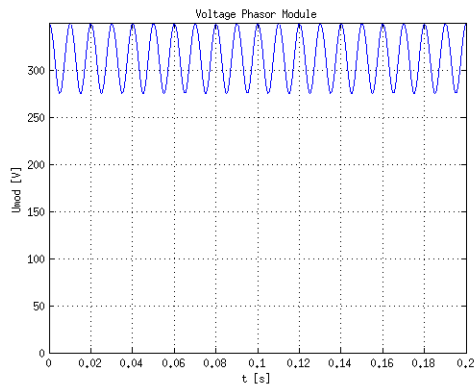


(а) На напрежението

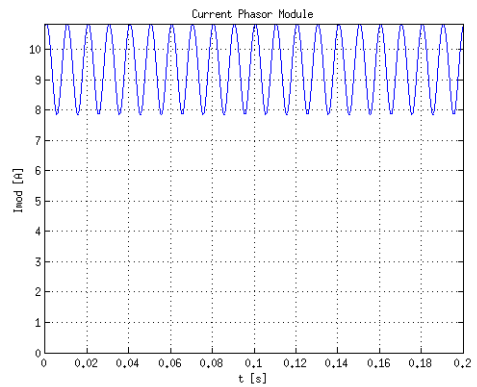


(б) На тока

Фигура 5.27: Хармоничен анализ

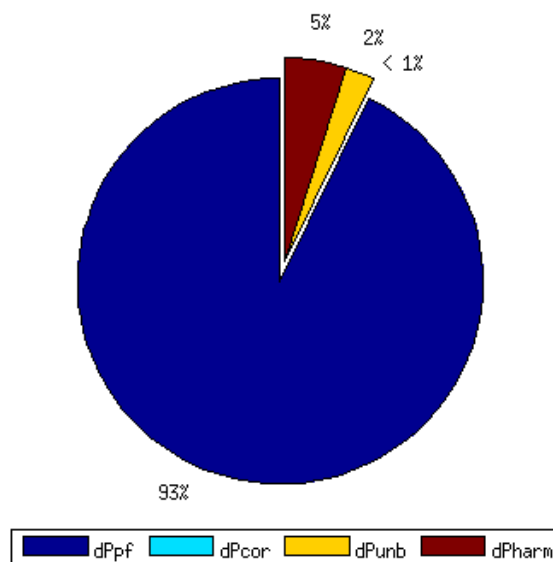


(a) На напрежението



(б) На тока

Фигура 5.28: Модули на изобразяващите вектори



Фигура 5.29: Разпределение на електрическите загуби при смесен товар

Където:

- ΔP_{Σ} – представляват съответно общите (пълните) електрически загуби;
- ΔP_1 – електрически загуби по права последователност на несиметричния трифазен ток;
- ΔP_{unb} – електрически загуби само от токовата несиметрия;
- ΔP_{harm} – електрически загуби от висши хармоници;
- ΔP_{1k} – електрически загуби отговарящи на зададения фактор на мощността.

В резултат на проведените експериментални изследвания, в лабораторни условия, могат да бъдат направени следните изводи:

1. Доказано е експериментално, че несиметричното натоварване в автономните системи води до възникване на токова и напреженова несиметрия и поява на безкраен ред от висши хармоници. Значителната част от корабните електроенергийни системи са трифазни, с изолиран звезден център, но въпреки това в тях се появява и трети хармоник.
2. Извършените експерименти с лабораторна автономна електроенергийна система с несиметричен и нелинеен товар доказват появата на неактивни мощности, като пулсираща и деформационна, съизмерими с останалите компоненти на пълната мощност. Това предизвиква влошаване на резултативният фактор на мощността и увеличаване на електрическите загуби в електроенергийната система.
3. Прилагане теорията на „изобразяващия вектор“ за изследване влиянието на несиметричните и нелинейни товари, както и възможностите за подобряване енергийната ефективност в автономните електроенергийни системи дава възможност по един обозрим и целесъобразен начин да се осъществи анализ и оценка на постиганите резултати.
4. Получените резултати от проведените експериментални изследвания в автономна електроенергийна система свързани с възможността за оценка и повишаване на енергийната ефективност в нея, потвърждават достоверността на извършените теоретични изследвания в тази насока.

В резюме могат да бъдат посочени следните **научни и научно-приложни приноси**, получени в дисертационния труд, а именно:

1. Разработена е информационна технология, позволяваща да се определят показателите за качеството на електрическата енергия и компонентите на пълната мощност в корабните електроенергийни системи (КЕЕС) при наличие на смущения от несиметрия и висши хармоници.
2. Доказано е, че на база теорията на изобразяващия вектор могат да се определят електрическите загуби в електропреносните линии на КЕЕС и се детерминират електрическите загуби, в резултат на смущения от несиметрии, висши хармоници и лош фактор на мощността, като проценти от общите електрически загуби, приети за 100%.
3. Разработен е подход, свързан с осъществяване на практично-приложен анализ за определяне коефициента на несинусоидалност

на напрежението, при комплектоване на силовите елементи на КЕ-ЕС. Това се постига чрез непосредствено въвеждане параметрите на генериращите, преобразуващите и потребяващи мощности.

4. Разработена е структура на силов хибриден филтър, съвместно със системата му за управление, предназначен за работа в корабни условия, включващ звена само за пети и седми хармоник.
5. Доказана е работоспособността на силовия хибриден филтър в условия на КЕЕС. Проведените изследвания показват неговата функционална годност при изменение на захранващата честота в границите от 47.5 до 52.5 Hz, при номинална честота 50 Hz. Мощността на активната част за корекция режима на филтъра е по-малка от 10% от мощността на смутителя. Това прави бъдещото приложение на този филтър много перспективно, от гледна точка повишаване на енергийната ефективност при решаване на проблемите с минимизиране на висшите хармоници в корабните електроенергийни системи.
6. Обосновано доказано е, че циклоконверторните гребни електрически уредби имат по-нисък коефициент на несинусоидалност по ток, пониски загуби от висши хармоници и по-висок резултативен фактор на мощността в сравнение с гребни електрически уредби с честотни преобразуватели, съдържащи звено за постоянен ток.
7. Изяснено е, че въпреки съществуващите малки различия в експлоатационните характеристики на двата вида честотопреобразуватели, те намират приложение при реализиране на пропульсивните гребни електрически уредби. Това се дължи на технико-икономически съображения при изграждане на плавателните съдове, с отчитане на мореходните им характеристики и акватория на плаване.
8. Извършените експерименти с лабораторна автономна електроенергийна система с несиметричен и нелинеен товар доказват появата на неактивни мощности, като пулсираща и деформационна, съизмерими с останалите компоненти на пълната мощност. Това предизвиква влошаване на резултативния фактор на мощността и завишаване на електрическите загуби в електроенергийната система.
9. Получените резултати от проведените лабораторни изследвания върху автономна електроенергийна система, свързани с възможността за оценка на енергийната ефективност в нея, потвърждават теоретичните изследвания в тази насока.

Публикации по дисертационния труд

1. *Dimitrov D.M.*, “Present State of the Energy Efficiency Problem in Marine Power Systems with Predominance of Nonlinear and Unbalanced Loads”, International Scientific Symposium "Electrical Power Engineering 2014 11-13.09.2014, Varna, Bulgaria, (с.116-120).
2. *Dimitrov D.M., Petkov P.D.*, “Method for Assessing Disturbing Effects of Nonlinear Loads and Asymmetrical Loading in Vessel Electric Power Systems”, International Scientific Symposium "Electrical Power Engineering 2014 11-13.09.2014, Varna, Bulgaria, (с.112-115).
3. *Dimitrov D.M., Petkov P.D.*, “Study of a Possibility To Monitor The Energy Efficiency In Marine Power Systems”, Proceedings of the XIV-th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems ELMA 2015, October 2015, Varna, Bulgaria, (с.157-161).
4. *Петков П., Димитров Д.*, “Оценка компонентите на пълната мощност и електрическите загуби в електроенергийните системи при наличие на смущения от несиметрии и висши хармоници”, Годишник на Технически университет–София, Том 66, Книга 1, 2016г, (с.83-92).
5. *Петков П., Димитров Д.*, “Информационна технология за определяне компонентите на пълната мощност, показателите за качество на електрическата енергия и фактора на мощността в автономни електроенергийни системи при наличие на несиметрии и висши хармоници”, Агенция за защита, оценки и трансфер на интелектуална собственост Патент Сервиз, Сертификат No.12052014-02, 2014г.
6. *Петков П., Димитров Д., Георгиев Г.*, “Информационна технология за детерминиране електрическите загуби в електроразпределителните мрежи на автономни електроенергийни системи при наличие на смущения от несиметрии, висши хармоници и влошен фактор на мощността”, Агенция за защита, оценки и трансфер на интелектуална собственост Патент Сервиз, Сертификат No.13052014-02, 2014г.