Българска Академия на Науките Институт по океанология "Проф. Фритьоф Нансен"



# Инж. Константин Илиев Щерев

# Дистанционно управляем апарат за подводно изследване на шелфа

**АВТОРЕФЕРАТ** на **ДИСЕРТАЦИЯ** за придобиване на научна степен

# "ДОКТОР"

Област на висше образование: шифър 4. "Природни науки, Математика и Информатика". Професионално направление: шифър 4.4. "Науки за земята" Докторска програма "Океанология".

Научен ръководител доц. д-р Димитър Петков Димитров

Декември 2019

Варна

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита на разширен семинар на секция "Морска геология и археология" към Института по океанология "Проф. Фритьоф Нансен" на Българска Академия на Науките, състояло се на 29 Ноември 2019г. Дисертацията е разработена в рамките на външна докторантура в секция "Морска геология и археология" към Институт по океанология-БАН. Представеният дисертационен труд е с обем от 213 страници текст, съдържа 10 глави, 157 фигури, 24 таблици и 6 приложения. Списъкът на цитираната литература включва 123 заглавия.

Защитата на дисертационният труд ще се състои на 24.03.2020 г. от 14.00ч. в заседателната зала на Института по океанология при БАН на ул. "Първи май" No 40, на открито заседание на петчленно научно жури в състав:

- 1. проф. д-р инж. Атанас Василев Палазов
- 2. проф. д-р инж. Румен Здравков Кишев
- 3. проф. дтн инж. Николай Филев Джагаров
- 4. доц. д-р Христо Панчев Смоленов
- 5. доц. д-р Пейчо Христов Попов

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в библиотеката на Института по океанология "Проф. Фритьоф Нансен", Варна, ул. "Първи май" No 40. Bulgarian Academy of Science Institute of Oceanology "Prof. Fridtjof Nansen"



# Eng. Konstantin Iliev Chterev MSc.

# Remotely Operated Vehicle for a continental shelf research

Summary of a doctoral thesis for the degree of "Philosophiae Doctor"

High education code: 4. "Natural science, Mathematics and computer science". Professional area: code 4.4. "Earth science" Doctoral programme "Oceanology".

Doctoral advisor: Dimitar Petkov Dimitrov PhD

December 2019

Varna

## Abstract

This thesis is about the overall architecture and the main components of an observational class Remotely Operated Vehicle (ROV). The research has focused on modelling the ROV as a distributed network system, control protocols and data transfer. In addition, based on the theoretical research, a working ROV has been designed, built, tested and used in several research projects in the Black Sea region.

Currently, ROVs are very popular and intrinsic part of any underwater activities. Numerous academic institutions even have departments, dedicated to do underwater vehicle research. Despite that, the author could not find many articles on the overall ROV design, component interconnection and networking. Most of the papers are related to navigation, autopilots, hydrodynamics, stability, trajectory tracking and terrain following. Few papers address the overall design, but the theory in them is out of context and sketchy.

This thesis fills the gap in the research in various areas. First, it introduces a concept of a ROV, based on the 7 layer OSI model. Second, a new protocol for minimising the control lag is introduced and a new method for the video stream transfer is implemented. The model is analysed for bandwidth and verified measuring the real network traffic in the built ROV. Third, a ROV system power supply is designed and created. It is analysed for stability and tested in the real operation. Fourth, the thruster system is created and optimised for the specific needs of the ROV. The thrusters are designed, built and tested for efficiency. Fifth, the camera-lights system is analysed for optimum colour temperature. The most suitable LEDs for ROV use are found.

In addition the thesis proposes a practical solutions for the key parts of the observational ROV - tether, camera and thruster, where the thruster itself is divided into three parts - controller, motor and propeller, which are analysed separately as well.

The performance of all components in the scope is measured and recorded. Finally the overall ROV behaviour, as observed in the field test, is analysed. The methodology and the results are presented in the relevant sections.

# Абстракт

Този дисертационен труд е относно цялостната архитектура и основните компоненти на система Подводен Апарат с Дистанционно Управление (ПАДУ). Изследването е фокусирано върху подсистемите за захранване, задвижване и комуникации. Изследван е също модел на ПАДУ като дистрибутирана информационна мрежа, с иновативен команден протокол. ПАДУ система е изработена на базата резултатите от теоретичното изследване и реално използвана в няколко проекта в акваторията на Черно Море. Понастоящем ПАДУ са много популярни и съществена част от каквито и да е подводни изследвания. Много академични институции имат секции, занимаващи се изключително с изследвания на подводни апарати. Въпреки това, наличните статии по цялостни ПАДУ система дизайн и комуникации между подсистемите и са много малко. Повечето публикации са за навигация, хидродинамични характеристики, стабилност и автопилоти. Няколко публикации засягат цялостния дизайн, но теорията в тях е повърхностна и непълна. Този труд запълва тази празнина в няколко области ня изследванията. Първо, предложена е мрежова концепция на ПАДУ, базирана на 7 слойния OSI модел. Моделът включва само минималната конфигурация от компоненти -Конзола за Дистанционно Управление (КДУ), тетер, тръстери и камера, но всяко допълнително устройсво може да бъде добавено към модела. Второ, иновативен протокол е създаден с цел минимизиране на закъснението в управлението и синхронизация между отделните компоненти. Моделът е изследван за изисквания към пропусквателна способност на мрежовите канали и проверен на практика с реално работеща ПАДУ система. Трето, създаден е модел на захранването на ПАДУ, което се оказва нетривиален проблем. То е изследвано за стабилност, изработено и тествано в лабораторен и реален проект. Четвърто, системата за задвижване е изследвана и оптимизирана за конкретните цели на ПАДУ. Тръстерите са моделирани, изработени и тествани за ефективност. Ефективността на отделните компоненти е измерена и записана. Поведението на цялата ПАДУ система е наблюдавана в реален експеримент и анализирана. Методологията на изследванията е дадена в съответните секции.

# Глава 1 Увод

# 1.1 Дефиниции

ПАДУ - Подводен Апарат с Дистанционно управление - е безпилотен подводен апарат, контролиран по кабел - тетер, който позволява на оператора да е в безопасни условия, докато апаратът извършва различни операции под вода.

Тетер - механично подсилен кабел който пренася захранване и предава данни между ПАДУ и КДУ.

КДУ - Конзола за Дистанционно Управление - компютър, морско изпълнение, който чрез клавиатура, джойстик и подходящи хардуерни интерфейси позволява на оператора да управлява ПАДУ и визуализира и записва получените видео и телеметрични данни.

ПАДУ система се състои от ПАДУ, тетер и КДУ. Това е минималният брой компоненти, необходими за нормална работа на апарата.

#### 1.2 Общи изисквания към проекта

- Възможности на ПАДУ изследване на континенталния шелф в Черно Море
- Цена по-малка от половината на комерсиален еквивалент
- Време 2-3 years

Като комерсиален еквивалент е избран Seaeye Falcon от SAAB. Всички параметри са избрани да бъдат равни или по-добри от комерсиалния еквивалент - Таблица 1.1.

Parameter	Seaeye	Sea Turtle II
Dept rating [m]	300	300
Tether length [m]	450	550
Motors	DC Brushless	DC Brushless
Thrusters	4  x horis., 1  x vert.	4  x horis., 4  x vert.
Max. bollard thrust [kgf]	50	50
Controll system	Distributed	Distributed
Camera	Colour 480 TVL	Colour HD 720p
Lights [lm]	6400	8000
Navigation	Compass, gyro, depth	Compass, gyro, depth
Power	220/240V 2.8 kW	220/240V 2.4 kW
Budget	50,000.00  USD	20,000.00 USD

Таблица 1.1 Сравнение на Seaeye Falcon със Sea Turtle II

# 1.3 Описание на проблема

ПАДУ е сложна система и проектирането, както и изработката му, е сложен интердисциплинарен и оптимизационен проблем. Познания по физика, химия, електроника, електротехника, механика и хидродинамика са необходими за получаване на оптимален резултат. Често, финансови критерии на фирми производителки на ПАДУ не позволяват въвеждане на най-добрите решения. Много от съществуващите продукти са с компоненти, непроменени от десетилетия, поради високите цени на изследователския труд и промените в производствения процес. Този дисертационен труд прави опит да адресира този проблем и да предложи нов подход, базиран на най-модерните за момента технологии, които да позволи създаването на ПАДУ система с високи характеристики, при ограничен бюджет. Трудът прави заявка за редица приноси, в различни сфери на науката, с крайна цел изработка на продукт, който няма аналог в текущия пазар на ПАДУ. Приносите и конкретните проблеми са описани в съответните секции.

# 1.4 Цели и задачи

Най-важната цел на това изследване е създаване на оптимална ПАДУ архитектура, която може да бъде използвана за проектиране на апарат за изследване на черноморския шелф. Втората, произлизащата от първата цел, е изработка и тест на такъв апарат. Тези цели дефинират следните конкретни задачи:

- Проучване на текущите технологии използвани в ПАДУ
- Създаване на списък с изискванията към проекта
- Декомпозиране на ПАДУ система на подсистеми
- Създаване на цялостна ПАДУ системна архитектура
- Проектиране и изработка на отделните компоненти/подсистеми
- Тест и анализ на резултатите от измерванията на ПАДУ системата

#### 1.5 Приноси

1. Глава 2. Създден е захранваш модел на ПАДУ система. Изведено е уравнение за максимално предадена мощност.

2. Глава 2. Изведена е предавателна функция на последователно свързани захранващи блокове (дистрибутирана захранваща система). Системата е изследвана и доказана за стабилна.

3. Глава 3. Създаден е мрежов информационен модел на ПАДУ система. Създаде е иновативен команден протокол за минимизиране на закъснението и синхронизацията а командния поток.

4. Глава 4. Тетер със силова усукана двойка е анализиран за подаване на захранване и комуникации по 2 проводника. HomePlug е изследван и потвърден като ефективна за работа до 650 метра.

5. Глава 5. Иновативен алгоритъм за управление на безчетков постояннотоков двигател е дефиниран и реализиран.

6. Глава 5. Специализиран пропелер за работа с мотори с висок  $K_v$ е проектиран и изработен.

7. Глава 6. LED светлини са изследвани за ефективност във вода. Намерена е най-подходящата цветова температура за ПАДУ.

8. Глава 7. IP камера е тествана за изискване към пропусквателната способност на мрежовия канал. Изведена е минималната пропусквателна способност за камера с HD качество.

9. Глава 8. Изработена е ПАДУ система и е тествана в конкретен проект с кораб Академик (2016).

# Глава 2 Захранване

Базирайки се на простота и цена, за захранващо напрежение е избран европейският стандарт за домакински нужди - Schuko - 220V AC, 50Hz, 16A. Максималната мощност достъпна през такъв контакт е около 3.5kW. От тази мощност, проводниците на тетера и максималната мощност на ПАДУ могат да бъдат изведени.

#### 2.1 Проблемът на дългия кабел

Спрямо захранването, една от най-важните разлики между ПАДУ и битовите електрически апарати е много по-голямата дължина на кабела свърващ ги към захранващия източник. Предаване на мощност на голямо разстояние се оказва нетривиален проблем. Често съпротивлението на кабела е съизмеримо с това на товара. Изведеното уравнение за съпротивлението на тетера е:

$$R_w[\Omega] \approx \frac{3.3 \times 10^{-2} l[\mathrm{m}]}{A[\mathrm{mm}^2]} \tag{2.1}$$

Където,  $R_w$  е съпротивлението на кабела, l е дължината и A е сечението на проводника в mm<sup>2</sup>. Високо съпротивление на кабела води до проблем с максимално предадената мощност по него, което е дефинирано в теоремата за максимално предавана мощност. От тази теорема, максимално предадената мощност се постига при съпротивление на кабела равно на това на товара. Уравнение 2.1 дефинира максималната мощност при дадени сечение и дължина на кабела:

$$P_{max}[W] \approx 7.62 \frac{A[mm^2]U_{in}^2[V]}{l[m]}$$

$$(2.2)$$

Където  $P_{max}$  е максимално възможната предадена мощност и  $U_{in}$  захранващото напрежение на източника. Уравнение 2.2 е изключително полезно при проектиране на тетера и при поддръжка на ПАДУ с различни по дължина тетери. Трите независими променливи  $A, U_{in}$  и l могат да бъдат избрани по такъв начин, че да се постигне желаният

ПАДУ обсег на действие и мощност. Неминуемият ефект от дълъг кабел е високият пад на напрежение върху него, който е точно половината от захранващото напрежение при максимално предаден мощност. Това трябва да бъде взето под внимание при проектирането или избора на захранващ блок за ПАДУ.

#### 2.2 Захранваща система

Поради високият пад на напрежение върху тетера, захранващият блок на ПАДУ трябва или да работи с много широк диапазон на входните напрежения, или източникът на захранване трябва да компенсира този пад. За настоящият проект е избран вторият метод.

#### 2.2.1 Компенсация на пада на напрежение

Следващата фигура показва модел на захранване с компенсация на пада - Фиг. 2.1.



Фигура 2.1 Sea Turtle II модел на захранването.

Поради наличието на избор на различни комерсиални захранващи блокове, такъв е избран за проекта. Компенсацията на пада на напрежение е нестандартно оборудване и трябва да бъде проектирана и изработена. Целейки захранване с $U_s=2U_{nom},$ изведеното Уравнение 2.3 дава законът на който трябва да отговаря източникът на напрежение.

$$U_s = \frac{R_w P_r}{U_{nom}} + U_{nom} \tag{2.3}$$

#### 2.2.2 DC анализ на захранващата система

Постояннотоковият анализ е сравнително лесен. Реактивните товари могат да бъдат игнорирани и еквивалентната схема се състои само от 2 резистора-



Фигура 2.2 Постояннотокова еквивалентна схема.

Постояннотоковият модел на товара  $R_{rov}$  е

$$R_{rov} = \frac{P}{I^2} = \frac{U_{out}^2}{P} \tag{2.4}$$

# 2.2.3 AC анализ на захранващата система

Основната цел на променловотоковият анализ е проверка на стабилността на системата. Променливотоковата еквивалентна схема в **S** домейна е

с предавателна функция:



Фигура 2.3 Променливотокова еквивалентна схема.

$$G(s) = \frac{\frac{1}{R_w C_{rov}}}{s + \frac{1}{R_w C_{rov}} (1 - \frac{R_w}{R_{rov}})}$$
(2.5)

Системата е стабилна коато полюсите на предавателната функця (корените на знаменателя) са в лявата полуравнина на **S** графа. Това условие е изпълнено при

$$\frac{R_w}{R_{rov}} < 1 \tag{2.6}$$

От теоремата за максимално предадена мощност това условие трябва да бъде изпълнено по дизайн, така че системата винаги е стабилна.

# Глава 3 Комуникации

Основната цел на ПАДУ от наблюдателен клас е позиционирането на апарата в определена точка и предаване на видео изображение, телеметрия и сензорна информация към оператора на повърхността. Предаването на информация (данни) от една точка до друга се нарича комуникация и е предмет на тази глава. Два комуникационни потока са необходими за работата на ПАДУ - високоскоростен за видео изображение и нискоскоростен за команди и телеметрия. Оптимизирането на цената на оборудването води до разделянето на тези потоци в две отделни подмрежи, тъй като изискванията към тях са съвсем различни. Крайната топология е дадена на Фиг. 3.1.



Фигура 3.1 Високоскоростна мрежа с нискоскоростна подмрежа.

Нискоскоростната мрежа е проектирана на базата на индустриалния LIN стандарт, с подобрения, необходими за подводни приложения. Иновативен комуникационен протокол е разработен за елиминиране на недостатъците на LIN data layer. Финалната архитектура е наречена LUNA - Lightweight underwater network architecture. LUNA има редица предимства пред съществуващите мрежи, използвани в ПАДУ:

- Висока гъвкавост
- Паралелни високо и нискоскоростна мрежи
- Ниска цена
- Нисък брой необходими проводници

- Нисък брой конектори
- Лесно добавяне на нови устройства към мрежата
- Лесна конфигурация
- Използване на стандартни компоненти



Фигура 3.2 LUNA OSI модел.

# Глава 4 Тетер

Тетерът е кабел, който свързва ПАДУ с КДУ. За постигане на желаната функционалност, тетерът трябва да съдържа: Захранващи проводници, Комуникационни линии, Усилващи механичната якост влакна, Добавка за контрол на плаваемостта и Защитна външна обвивка. Сечение на SAAB Falcon Seaeye тетер е показано на Фиг. 4.1.



Фигура 4.1 Сечение на SAAB Falcon Seaeye тетер.

- А 4х Екранирани усукани двойки
- В 4х Захранващи проводника
- С Vectran усилващи влакна
- D Полимерна пяна
- Е Външна обвивка

## 4.1 Физическа връзка

Тъй като тетерът е неизменна част от всяка ПАДУ система, той и влияе по няколко начина:

Плаваемост. Плаваемостта на тетера се контролира чрез полимерната пяна, чието сечение трябва да отговаря на следното условие за неутрална плаваемост - Уравнение 4.1, където  $SG_A, SG_B, SG_C, SG_D, SG_E$  са специфичните плътности на компонентите на тетера от Фиг. 4.1 а  $S_A, S_B, S_C, S_D, S_E$  са площите на техните сечения.

$$S_D(1-SG_D) = S_A(SG_A-1) + S_B(SG_B-1) + S_C(SG_C-1) + S_E(SG_E-1)$$
(4.1)

Здравина. в повечето ПАДУ системи, тетерът е единствената физическа връзка между апарата и плавателния съд. Това означава че при работа се разчита на тетера да издържи тежестта на апарата и хидродинамичните сили. Площта на сечението на усилващите влакна трябва да отговаря на Уравнение 4.2

$$A_r[\mathrm{mm}]^2 \approx \frac{10k_s W_{ROV}[\mathrm{kg}]}{\sigma[\mathrm{Mpa}]}$$
(4.2)

Драг. Това е един от най-неприятните ефекти на наличието на тетер. ПАДУ трябва да влачи след себе си няколкостотин метра кабел. Този ефект в повечето случаи определя максималната дълбочина и разстояние на което може да рботи ПАДУ.

#### 4.2 Захранване и комуникации

Уравнение 2.2 дефинира сечението на проводника, в зависимост от изискваната мощност. Изолацията на проводника зависи от максималното захранващо напрежение. Знаейки сечението и изолацията, стандартен кабел за захранване може да бъде избран. За примера в Секция 2.2 -A = 2.5mm<sup>2</sup> и  $U_s = 338.5$ V. Избран е кабел сA = 2.5mm<sup>2</sup> и  $U_s = 600$ V. Идеята е този кабел да бъде използван също и за комуникации. Така получената Силова Усукана Двойка (СУД)е показана на Фиг. 4.2:



Фигура 4.2 Силова Усукана Двойка проводници..

Най важният параметър на всяка предавателна линия е вълновото съпротивление  $Z_0$  който зависи от материала и геометрията на линията. Линията трябва да бъде терминирана с резистор, равен на характеристичния импеданс, за минимални загуби - Фиг. 4.3.



Фигура 4.3 Терминиране на предавателна линия.

Вълновото съпротивление е:

$$Z_0 = \frac{120}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{2s}{d} \tag{4.3}$$

Където  $\epsilon_r$  е диелектричната константа на изолацията, *s* е разстоянието между проводниците а *d* е диаметъра на проводника (Fig. 4.2). За избраният по-горе кабел импедансът е  $Z_0 \approx 70\Omega$ .

Използвайки едни и същи проводници за захранване и комуникация прави тетерът изключително лесен за производство и поддръжка. Необходими са само 2 проводника, усилващи влакна и полимерна пяна за регулиране на плаваемостта - Фиг. 4.4.

- А Усилващи влакна
- В Външна изолация
- С Полимерна пяна
- D СУД



Фигура 4.4 Сечение на СУД тетер.

# Глава 5 Тръстер

Устройството което преобразува електрическата енергия в тяга се нарича тръстер - Фиг. 5.1.

Тръстерът се състои от пропелер, мотор и контролер.

#### 5.1 Motor

За проекта е избран безчетков постояннотоков мотор (BLDC). Моторът се характеризира със скоростна константа  $K_v$  която е равна на обороти в минута за волт захранващо напрежение. Изборът на мотор се определя от 2 основни фактора: Изисквана мощност.



Фигура 5.1 Електромотор и пропелер тръстер.

$$V_m = C_V \ \frac{P_N}{fB_rH_c} \tag{5.1}$$

Където $V_m$  е общия обем на магнитите на мотора,  $P_N$  е максимално възможна изходна мощност,  $B_r$  е остатъчната плътност на магнитния поток,  $H_c$  е коерцитивната сила на магнитите , F ротационната честота и  $C_V$  е коефициент между 0.54 и 3.1. Знаейки търсена мощност, подходящ двигател може да бъде избран. Изисквана скорост на въртене. Скоростта на въртене зависи от  $K_v$  и захранващото напрежение. В зависимост от избраният пропелер, подходящо напрежение и  $K_v$  трябва да бъдат избрани за максимална ефективност на тръстера.

#### 5.2 Контролер

Контролерът е електронно устройство, което по зададена стойност за обороти, управлява мотора чрез последователност от превключвания, необходими за работата на BLDC моторите. Всички контролери имат поне 2 основни блока - силов и управляващ - Фиг. 5.2.

Силовият блок е пълен трифазен мост, управляван с ШИМ - Фиг. 5.3.



Фигура 5.2 Блокова схема на контролер.



Фигура 5.3 Пълен трифазен мост.

Управляващият блок изпълнява поне 3 основни функции - 1. Приема задание по интерфейс за необходимите обороти. 2. Приема обратна връзка от мотора. 3. Генерира необходимата последователност от превключвания и ШИМ.

#### 5.2.1 Алгоритъм на управление

Най-добрият начин за описание на алгоритъма за контрол е чрез диаграмата на Фиг. 5.4 която описва краен автомат с 5 състояния.

- **STOP**. Алгоритъма опитва да спре мотора чрез закъсяване на фазите.
- **STAND BY**. В това състояние алгоритъмът е готов да приеме команда за завъртане.
- ALIGN. При подаване на команда за завъртане, контролерът позиционира ротора на определен електрически ъгъл .



Фигура 5.4 Алгоритъм на управление.

- **RAMP**. Контролерът започва да изпълнява 6-стъпков процес на развъртане.
- **RUN**. В това състояние, моторът е развъртян с необходимата скорост и алгоритъма поддържа въртенето чрез следене на неактивната фаза на мотора.

# 5.2.2 Детекция на спрян двигател

Поради липсата на физическа обратна връзка, един от проблемите на безсензорните BLDC мотори е необходимостта от електронно регистриране на спрял двигател който е под напрежение. Това състояние би повредило мотора и контролера ако не се прекрати своевременно. Предложеният иновативен алгоритъм, който работи в честотният домейн е чрез следенето на честотата на въртене  $\omega_m$  и максималната възможна честота на въртене  $\omega_{mmax}$ .

$$\omega_{mmax} = \frac{1}{6p2T_b} \tag{5.2}$$

Тук p е броят на двойките полюси на мотора а  $T_b$  е времето на изчакване на детекция. Ако измерената честота на въртене е близка до теоретично възможната - Уравнение 5.3, моторът се счита за спрял.

$$\omega_m > \omega_{mmax} - D_f \tag{5.3}$$

 $D_f$  е програмируем коефициент на сигурност.

#### 5.3 Пропелер

Пропелерът се дефинира основно от геометрията на перата, техният брой и ъгълът на атака (и кореспондиращата с него стъпка). Исторически, геометрията се предоставя в безразмерни таблици, от които може да се конструира пропелер с всякакъв размер. Единственият параметър който не се предоставя е ъгълът на атака, който може да бъде избран в зависимост от изискванията - Фиг. 5.5. Обикновено се използва безразмерният коефициент  $P_r = Pitch/D$ . За проекта е избран Карlan пропелер с 2 пера,  $P_r = 1$  поставен в дюза.



Фигура 5.5 Стъпка и ъгъл на атака на пропелер.

# Глава 6 Светлини

LED светлини са избрани за проекта, като най-ефективни и лесни за работа при подводни операции. Два параметъра са изследван - необходима мощност и цвят.

#### 6.1 Мощност

Необходимата мощност на светлините зависи от интензитета на източника, разстоянието до обекта и полето което трябва да бъде осветено (без да се взема под внимание поглъщането на водата). Камерите има дефинирано поле, дадено във вертикални и хоризонтални градуси. Фиг. 6.1 показва опростена диаграма на камера плюс светлини.

Изведеното уравнение за интензитета на източника на светлина е:

$$L_{lm} = C_{lx}\pi d^2(\tan v + \tan h) \quad (6.1)$$

където  $C_{lx}$  е осветеността изисквана от камерата. Уравнение 6.1 е валидно когато средата е абсолютно прозрачна и няма поглъщане или разсейване на светлината.



Фигура 6.1 LED светлини и камера.

#### 6.1.1 Цвят

Загубата на интензитет се дефинира

чрез коефициент <br/>  $\alpha(\lambda).$ който зависи от дължината на вълната <br/>  $\lambda$  - Фиг. 6.2.

Вземайки под внимание поглъщането, крайното уравнение за необходимият интензитет светлини е:

$$L_{lm}(0) = C_{lx}\pi d^2(\tan v + \tan h)e^{\alpha(\lambda)d}$$
(6.2)

За изчисление на необходимият интензитет са нужни:

*d* - дистанция до обекта.

 $C_{lx}$  - осветеност.

v, h - поле на камерата.

 $\alpha(\lambda)$  - коефициент на поглъщане.

## 6.1.2 LED selection

Цветът на LED се определя с цветова температура и се измерва в °K. В индустрията, тези температури се дефинират като "топло бяло" "неутрално бяло" "студено бяло "и т.н. със стойности между 2700 and 6500°K. Очевидният избор за ПАДУ е "студено бяло"тъй като при него поглъщането е най-малко. Цветовата температура не се характеризира с единична дължина на вълната, а с диапазон в спектъра - Фиг. 6.3.



Фигура 6.3 Студено бяло LED спектър.



Фигура 6.2 Коефициент на поглъщане  $\alpha(\lambda)$ .

# Глава 7 Камера

За предаване на видео избражение в реално време по мрежов канал, необходимо е да се знае честотната лента на видео потока, както и пропусквателната способност на канала. Очевидно, честотната лента на сигнала е - Уравнение 7.1.

$$B_{vid}[bps] = R_i \times C_i \times C_d \times FR[FPS]$$
(7.1)

Където  $R_i$  и  $C_i$  са редовете и колоните на изображението,  $C_d$  е дълбочината на цвета и FR са кадри в секунда. Например, единично изображение от HD телевизия е 1920х1080 пиксела х 24 бита. При 30 кадъра в секунда -

$$B_{vid}[\text{bps}] = 1920 \times 1080 \times 24 \times 30 \text{FPS} = 1500 \text{Mpbs}$$
 (7.2)

Това е твърде широка честотна лента, имайки предвид че една от най-популярните мрежи е базирана на 100 Mbps 100BASE Ethernet. Решението на този проблем е компресиране на видеосигнала, което се прави във всички съвременни видеокамери. Методите на компресия са различни, като едни от най-популярните са MPEG1-4 и H.264. Компресионните стандарти не са предмет на тази дисертация, но като пример, HD видеосигналът който има сурова честотна лента от 1500Mpbs, при компресиране с H.264 алгоритъм изисква 200 пъти по-тесен честотен канал - около 7 Mbps.

# Глава 8 Резултати и изводи

#### 8.1 Захранване

#### 8.1.1 Предварителни условия

Няколко захранващи компонента са избрани за удовлетворяване на изискванията от Глава 1: **Tether**. 500m кабел със сечение 2.5mm<sup>2</sup>. **Роwer**. 2400W ПАДУ захранване. **Voltage**. 220V европейски Шуко стандарт. От този избор са изведени следните параметри:

Съпротивление на тетера  $R_w$ . От Уравнение 2.1

$$R_w[\Omega] \approx \frac{3.3 \times 10^{-2} \times 500 \text{m}}{2.5[\text{mm}^2]} \approx 6.6\Omega$$
 (8.1)

Измереното с омметър съпротивление на кабела е  $6.72\Omega$ , което е много близко до теоретичното. Мощност. 2400W ROV - Уравнение 2.2 -

$$P_{max}[W] \approx 7.62 \frac{2.5 \text{mm}^2 \times 220 \text{V}^2}{500 \text{m}} \approx 1844 \text{W}$$
 (8.2)

Тази мощност е по-малка от исканата, така че е необходимо повишаване на напрежението на източника-

$$U_{in} \approx \sqrt{\frac{P_{max}l}{7.62A}} \approx 250 \text{V}$$
 (8.3)

Това напрежение е много близо до максималното позволено за PSU (264V), така че е необходима компенсация - Глава 2. Компенсираното захранване е изследвано с установката на Фиг. 8.1.



Фигура 8.1 Установка за тест на компенсирано захранване.

#### 8.1.2 Методология и резултати

Целта на измерванията е да се покаже че захранващият блок може да предостави исканата мощност, при което да не се излиза извън рамките на позволеното напрежение от 180-264V. Програмируем товар е използван за симулация на ПАДУ системите. При експеримента товарът е променян от 200W до 2000W. Записвани са 5 параметъра. От тях са изчислени  $P_{in}, P_r$  и  $P_{load}$ . Най-интересната величина е  $U_{out}$  - напрежението върху захранващият блок на ПАДУ. Той е в границите на допустимото - Фиг. 8.2.



Фигура 8.2 Графика на компенсацията на напрежение.

Ясно се вижда, че когато мощността на товара достига 1200W, компенсацията сработва и напрежението се покачва с около 45V. Напрежението върху ПАДУ става около 228V, което е в диапазона на допустимото. Алгоритъма и захранващият блок работят както се очаква и компенсацията позволява да се постигне исканата мощност без излизане извън диапазона на допустимите входни за ПАДУ напрежения.

## 8.2 Камера

## 8.2.1 Установка

Избраната камера - Vivotek FD8169A - има вградена компресия, но в техническите и данни няма сведения за честотна лента. Следната установка е използвана за измерване на този параметър - Фиг. 8.3.



Фигура 8.3 Измерване на честотна лента на видео сигнал.

#### 8.2.2 Методология и резултати

Камерата е конфигурирана на видео с параметри - full HD 1080p, 30 fps. На компютър е стартиран софтуер за следене на трафика и измерване на честотната лента. Камерата е насочена към случаен обект с много детайли, и постоянно придвижвана с помощта на серво. Този случай генерира видео изображение с най-голяма честотна лента - Фиг. 8.4.

Трафикът е измерен с и без включена камера. Разликата в трафика, дължащ се само на камерата е измерен на около 3.3 Mbps.

# 8.3 Тетер

За целите на комуникация е необходимо да се измери вълновото съпротивление на линията. Терминирането с екви-



Фигура 8.4 Кадър от тестваното видео изображение.

валентна стойност резистор дава максимална пропусквателна способност.

# 8.3.1 Методология и резултати

Най-лесният начин за измерване на вълново съпротивление е с векторен мрежов анализатор. Параметърът който се измерва е S11 и показва отношението на отразения към излъченият сигнал. Целта е да се подбере такъв терминиращ резистор, при който S11 да е минимално. Тетерът е терминиран с променлив резистор със стойност 0-100  $\Omega$ . Честотната лента е избрана от 1 до 100MHz - където работи HomePlug технологията. Измерванията са правени през 10  $\Omega$ . S11 графиките са дадени на Фиг. 8.5.



Фигура 8.5 S11 plots.

10-те графики се припокриват, което означава че няма специфично вълново съпротивление което да характеризира линията. S11 параметъра е твърде висок - около 2-3dB, което означава лоша линия. С следващата секция тетерът е тестван за лента на пропускане, с очакване HomePlug да се справя с недостатъците на тази линия.

# 8.4 Кумуникации

Най-важната цел на теста е да се провери дали некачествената линия на тетера може да предостави достатъчна честотна лента на HomePlug за видео сигнала.

#### 8.4.1 Установка

Един от популярните методи за измерване на трафик е с Terminal Access Point (TAP). TAP е устройство, свързано към съществуваща мрежа, управлявано от специфичен софтуер. 2 устройства са необходими - Фиг. 8.6.



Фигура 8.6 ТАР установка.

Направени са 4 измервания със съответни канали -

-Директна връзка през LAN.

-HomePlug свързани на един и същи контакт.

-HomePlug свързани през 500m СУД, без товар.

-HomePlug свързани през 500m СУД, 2400W товар.

#### 8.4.2 Методология и резултати

За всеки канал е измерена максималната пропусквателна способност. Директната LAN връзка дава най-висока лента от около 100Mbps в двете посоки. НоmePlug с директна връзка дава също добри резултати -  $\approx 75 {\rm Mbps}$  в едната и  $\approx 35 {\rm Mbps}$  в другата посока. Дългата СУД очевидно влошава сигнала и постигната лента е  $\approx 8.5 {\rm Mbps}$  и  $\approx 12 {\rm Mbps}$ . Неочаквано, натоварената СУД дава малко по-добри резултати -  $\approx 42 {\rm Mbps}$  и  $\approx 65 {\rm Mbps}$  съответно. Това най-вероятно се дължи на по-доброто съгласуване на линията с НоmePlug адаптера. В най-лошия случай, минималната честотна лента е  $\approx 8.5 {\rm Mbps}$ , което е повече от два пъти от необходимото за предаване на full HD видео сигнал.

# 8.5 Тръстер

Две цели са поставени - намиране на най-подходящия тип пропелер за ПАДУ и скалирането му за постигане на зададената в изискванията тяга. 60mm диаметър пропелери са изработени и тествани за ефективност.

#### 8.5.1 Предварителни условия и установка

Селекция от пропелери е изработена или закупена - Таблица 8.1.

Propeller	Diameter [mm]	Blade number	EAR	P/D
Ka2-35-0.5-60	60	2	35	0.5
Ka2-35-0.6-60	60	2	35	0.6
Ka2-35-0.7-60	60	2	35	0.7
Ka3-52.5-0.5-60	60	3	52.5	0.5
Ka3-52.5-0.6-60	60	3	52.5	0.6
Ka3-52.5-0.7-60	60	3	52.5	0.7
Ka2-35-0.6-1.0-60	60	2	35	0.6-1.0
Ka2-35-1.0-60	60	2	35	1
Groupner 3-60	60	3	NA	NA
Groupner 2-60	60	2	NA	NA

Таблица 8.1 Пропелери.

Изработена на 3D принтер е Rice дюза със закрепваща скоба. Тестовете са направени в басейн с установка, дадена на Фиг. 8.7.



Фигура 8.7 Тестова установка.

Тестовият тръстер е закрепен на подвижно рамо, което е свързано с динамометър, отчитащ тягата. Избраният BLDC мотор е с  $K_v = 750$ , захранващо напрежение 11.1V.

#### 8.5.2 Методология и резултати

Първата цел е намиране на "най-добрия"пропелер.За всеки пропелер са направени няколко измервания и са записани ротационната честота  $f_t$ , консумирания ток  $I_t$  и получената тяга  $F_t$ . Критерия за селекция е очевиден - пропелерът, генериращ май-голяма тяга при най-ниска електрическа мощност е най-добър. Измервателната процедура е следната: Контролерът е конфигуриран да развърта мотора на опредени обороти, при което токът и тягата се измерват. Резултатите са представени в Таблици 8.2, 8.3 и 8.4. Даните са представени на графика - Фиг.

		Propeller:	Ka2-35- 0.5	- 60	Propeller:	Ka2 -35- 0.6	- 60	Propeller:	Ka2 -35- 0.7	- 60
ft		Voltage:	11.1		Voltage:	11.1		Voltage:	11.1	
Hz	RPM	I [A]	F [kg]	P [W]	I [A]	F [kg]	P [W]	I [A]	F [kg]	P [W]
58	500	0.17	0	1.887	0.16	0	1.776	0.16	0	1.776
116	1000	0.27	0	2.997	0.24	0.05	2.664	0.25	0.05	2.775
175	1500	0.41	0.08	4.551	0.45	0.12	4.995	0.46	0.13	5.106
233	2000	0.69	0.16	7.659	0.82	0.26	9.102	0.85	0.27	9.435
291	2500	1.07	0.25	11.877	1.4	0.4	15.54	1.6	0.47	17.76
350	3000	1.65	0.37	18.315	2.25	0.6	24.975	2.45	0.67	27.195
408	3500	2.6	0.54	28.86	3.25	0.85	36.075	3.9	0.93	43.29
466	4000	3.3	0.73	36.63	4.6	1.1	51.06	5.6	1.3	62.16
525	4500	4.6	0.9	51.06	6.4	1.4	71.04	8	1.6	88.8
583	5000	6.4	1.15	71.04	8.4	1.8	93.24	10.2	2.1	113.22
641	5500	8.1	1.35	89.91	11.2	2.3	124.32	13.5	2.7	149.85
700	6000	10.25	1.6	113.775	14.4	2.7	159.84	16	3.1	177.6
758	6500	12.5	1.7							

Таблица 8.2 Тяга vs. ел. мощност.

Таблица 8.3 Тяга vs. ел. мощност.

		Propeller:	Ka3-52.5 - 0	.5 - 60	Propeller:	Ka3-52.5 - 0	.6 - 60	Propeller:	Ka3 -52.5- 0	.7 - 60
ft		Voltage:	11.1	v	Voltage:	11.1	v	Voltage:	11.1	v
Hz	RPM	I [A]	F [kg]	P [W]	I [A]	F [kg]	P [W]	I [A]	F [kg]	P [W]
58	500	0.16	0	1.776	0.13	0	1.443	0.16	0	1.776
116	1000	0.21	0	2.331	0.22	0.05	2.442	0.25	0.07	2.775
175	1500	0.41	0.08	4.551	0.45	0.13	4.995	0.51	0.16	5.661
233	2000	0.78	0.18	8.658	0.79	0.23	8.769	0.92	0.31	10.212
291	2500	1.24	0.25	13.764	1.39	0.38	15.429	1.75	0.52	19.425
350	3000	2.08	0.33	23.088	2.15	0.5	23.865	2.7	0.75	29.97
408	3500	3.1	0.5	34.41	3.25	0.8	36.075	4	1	44.4
466	4000	4.45	0.7	49.395	4.5	1	49.95	6.2	1.4	68.82
525	4500	6.35	0.8	70.485	7.5	1.25	83.25	8.5	1.8	94.35
583	5000	9	0.95	99.9	10.3	1.55	114.33	11.5	2.25	127.65
641	5500	12.2	1.05	135.42	12.7	1.94	140.97	14	2.65	155.4
700	6000	15.9	1.08	176.49	15.3	2.13	169.83	17	2.9	188.7
758	6500									

		Propeller:	Groupner 3	-60	Propeller:	Groupner 2-	-60	Propeller:	Ka2-35-0.6-	1.0-60	Propeller:	K2-35-1.0-60	)
ft		Voltage:	11.1	v	Voltage:	11.1	v	Voltage:	11.1	v	Voltage:	11.1	V
Hz	RPM	I [A]	F [kg]	P [W]	I [A]	F [kg]	P [W]	I [A]	F [kg]	P [W]	I [A]	F [kg]	P [W]
58	500	0.16	0	1.776	0.14	0	1.554	0.19	0	2.109	0.19	0	2.109
116	1000	0.23	0.05	2.553	0.24	0.06	2.664	0.31	0.08	3.441	0.31	0.12	3.441
175	1500	0.46	0.12	5.106	0.44	0.13	4.884	0.69	0.25	7.659	0.74	0.28	8.214
233	2000	0.84	0.24	9.324	0.85	0.25	9.435	1.3	0.49	14.43	1.4	0.51	15.54
291	2500	1.34	0.4	14.874	1.35	0.4	14.985	2.45	0.8	27.195	2.45	0.81	27.195
350	3000	2.2	0.57	24.42	2.3	0.6	25.53	4	1.15	44.4	3.95	1.2	43.845
408	3500	3.25	0.72	36.075	3.25	0.82	36.075	6	1.5	66.6	6	1.65	66.6
466	4000	4.7	1.1	52.17	5	1.15	55.5	9	2.09	99.9	9	2.05	99.9
525	4500	6.4	1.35	71.04	6.6	1.5	73.26	13	2.79	144.3	12.5	2.65	138.75
583	5000	9	1.65	99.9	8.7	1.7	96.57	16	3	177.6	17.2	3.25	190.92
641	5500	11.2	2	124.32	12.2	2.2	135.42						
700	6000	14	2.35	155.4	15.5	2.5	172.05						
758	6500												

Таблица 8.4 Тяга vs. ел. мощност.

8.8. (За простота, графиката използва ток вместо мощност, което е



Фигура 8.8 Тяга vs. ток.

еквивалентно при константно напрежение.) Два са очевидните "победители Ка2-35-0.6-1.0-60 and Ка2-35-1.0-60. Ка2-35-1.0-60 е избран поради по-простия си дизайн. Втората цел е намирането на тяговия коефициент на тръстера  $K_{th}$ . Уравнение 8.12 може да бъде записано като

$$F_t = K_{th0} \times f_t^2 \tag{8.4}$$

където

$$K_{th0} = K_{th} \times \rho_w \times D^4 \tag{8.5}$$

От Таблица 8.4 може да бъде направена графика която показва квадратичната връзка между  $F_t$  и  $f_t$  - Фиг. 8.9. Графиката показва ясна зависимост и описващото уравнение е

$$F_t \approx 0.0046 f_t^2 , K_{th0} \approx 0.0046$$
 (8.6)



Фигура 8.9 Тяга vs. честота на въртене.

Линейният член може да бъде игнориран поради малкия коефициент.  $K_{th}$  може да бъде изчислен -

$$K_{th} = \frac{K_{th0}}{\rho_w \times D^4} \tag{8.7}$$

$$K_{th} \approx \frac{0.0046}{1000 \times 0.06^4} \approx 0.35 \tag{8.8}$$

 $K_{th}$  позволява изчисляването на диаметъра реалния пропелер. Общата тяга е избрана 50 kgf. Тя трябва да бъде постигната от 4 хоризонтални тръстера. 4-те тръстера са под 45 градуса спрямо X/Y координатите на ПАДУ. По този начин, максималната тяга по всяка координата е умножена по  $cos(\pi/4) \approx 0.7$ . Оттук, максималната тяга за всеки тръстер може да бъде изчислена.

$$F_{tot} = N_t \times F_t \times \cos(\pi/4) \tag{8.9}$$

Където $F_{tot}$ е общата ПАДУ тяга, <br/>  $F_t$ е тягата на индивидуалния тръстер $N_t$ е броят <br/>тръстери. Индивидуалният тръст<br/> е -

$$F_t = \frac{F_{tot}}{N_t \times \cos(\pi/4)} \tag{8.10}$$

$$F_t = \frac{50 \text{kgf}}{4 \times \cos(\pi/4)} \approx 17.7 \text{kgf} \approx 173.4 \text{N}$$
(8.11)

Статичната тяга на тръстера е -

$$F_t = K_{th} \times \rho_w \times D^4 \times f_t^2 \tag{8.12}$$

където  $K_{th} \approx .35$  е тяговия коефициент,  $\rho_w \approx 1000 \text{Kg/m}^3$  е плътността на водата и  $f_t$  е ротационната честота. Избраният мотор е с максимална

мощност при около 2500 RPM, или 42Hz, така че диаметърът може да бъде изчислен:

$$D = \sqrt[4]{\frac{F_t}{K_{th} \times \rho_w \times f_t^2}}$$
(8.13)

$$D \approx \sqrt[4]{rac{173.4 \mathrm{N}}{0.35 \times 1000 \mathrm{Kg/m}^3 \times 42^2 \mathrm{Hz}}} \approx 0.129 \mathrm{m}$$
 (8.14)

Отчитайки че това е идеален случай, за диаметър е избран D = 0.135m. Още една проверка е необходима за максималната електрическа мощност която е необходима за постигането на желаната тяга.

$$F_t^{1.5} = W_p \sqrt{2\rho A_p}$$
 (8.15)

Където $W_p$  е входната мощност,  $\rho$  е плътността на водата и  $A_p$  е площта на пропелера.

$$W_p = \frac{F_t^{1.5}}{\sqrt{2\rho A_p}}$$
(8.16)

$$W_p[W] \approx \frac{173.4[N]^{1.5}}{\sqrt{2 \times 1000[kg/m^3] \times \pi \times 0.0675[m]^2}} \approx 426.7[W]$$
 (8.17)

 $W_p$ е общата входна механична мощност, която може да бъде трансферирана в електрическа -  $P_{rov}$ използвайки

$$P_{rov} = \frac{N_t \times W_p}{\eta_p \eta_m} \tag{8.18}$$

Където  $\eta_p$  и  $\eta_m$  са коефициентите на полезно действи на захранването и на BLDC мотора. Ефективността на захранването е дадено в данните от производителя -  $\eta_p = 89\%$ , на мотора е прието да е около 90%. Необходимата електрическа мощност е-

$$P_{rov}[W] = \frac{4 \times 426.7W}{89\% \times 90\%} \approx 2130.8W$$
(8.19)

 $P_{rov}$ е по-малка от наличната - 2400W, така че изискването за 50kgf обща тяга от Глава 1 може да бъде изпълнено.

#### 8.6 Светлини

Графиката на Фиг. 6.2 показва че синята светлина прониква по-добре във вода от другите части на спектъра. Студено бяло LED е избран за проекта. В тази секция, три различни цветови температури са тествани за поглъщане. Критерият е максимална осветеност при еднаква електрическа мощност на източника.

#### 8.6.1 Установка

Използвана е стандартен цифров фотоапарат, черна PVC тръба с прозрачен капак от едната страна и матов екран от другата - Фиг. 8.10. PVC тръбата е водоустойчива и може да бъде напълнена с вода. Фото-



Фигура 8.10 LED установка.

апаратът и източникът на светлина са оптически изолирани от средата. Фотоапаратът е настроен на ръчен режим с диафрагма f8, скорот 1/60 сек, без цветова корекция- RAW, ISO 400. Обективът е 35mm (50mm еквивалент) поставен на безкрайност. Трите LEDa са CREE -PN-CXA1507-0000-000N00G430G, Warm White, 840lm, 200mA, 3000<sup>0</sup>K PN-CXA1507-0000-000N0HG440G, Neutral White,840lm, 200mA, 4000<sup>0</sup>K PN-CXA1507-0000-000N0HG450G, Cool White, 840lm, 200mA, 5000<sup>0</sup>K

#### 8.6.2 Методология и резултати

Целта на теста е измерване на осветеността на матовия екран при всеки един от светодиодите при тръба пълна с въздух и впоследствие - с вода. Лабораторното захранване е конфигурирано на 36.35V с получен ток през LEDa -220mA. Направени са снимки за всеки диод без вода -Фиг. 8.11 и с вода в тръбата Фиг. 8.12. Има очевидно намаляване на осветеността при наличие на вода. За всяка снимка е направено средна осветеност за пиксел. Резултатите са показани в Таблица 8.5. Този

	3000K-air	4000K-air	5000K-air	3000K-water	4000K-water	5000K-water
R	176	161	133	134	123	98
G	150	165	160	122	142	146
В	95	143	170	76	122	161
Total illum.	421	469	463	332	387	405
Total loss				89	82	58

Таблица 8.5 Средна осветеност.

метод на измервания не дава абсолютни стойности на осветеността, но

може да бъде използван за сравнителен анализ. Първото наблюдение е че 4000<sup>0</sup>K и 5000<sup>0</sup>K LED са почти еднакви във въздух, докато 3000<sup>0</sup>K предоставя по-малка осветеност. Най-важният резултат обаче е общата загуба на осветеност при наличие на вода в тръбата. Тук 5000<sup>0</sup>K студено бяло LED е с очевидно предимство с тотална загуба от 58 единици при 82 за 4000<sup>0</sup>K. Резултатите валидират изчислените. Дистанцията *d* е 1.0m и коефициента на поглъщане е взет от Фиг. 6.2. Резултатите са показани в Таблица 8.6.



(a) Топло бяло 3000<sup>0</sup>К. (б) Неутр. бяло 4000<sup>0</sup>К. (в) Студено бяло 5000<sup>0</sup>К.

Фигура 8.11 LED снимки без вода в тръбата.





(а) Топло бяло  $3000^{0}$ К. (б) Неутр. бяло  $4000^{0}$ К. (в) Студено бяло  $5000^{0}$ К.

Фигура 8.12 LED снимки с вода в тръбата.

Таблица 8.6 LED изчислен интензитет  $L_{lm}(1)$ .

	α(λ)[m-1]	3000K-water	4000K-water	5000K-water
R - Lim 640nm	0.35	124	113	94
G - Lim 580nm	0.15	129	142	138
B - LIm 460nm	0.01	94	142	168

Теоретичните изчисления са близки то практически измерените, с разлики дължащи се вероятно на избраните коефициенти на поглъщане и неизвестните характеристики на цифровия фотоапарат.

## 8.7 Заключение

Възможностите на ПАДУ системата са тествани в реален проект на борда на кораб Академик през 2016. ПАДУ беше потопен на 70м дълбочина и показа добра управляемост и качествено видео изображение Фиг. 8.13.



Фигура 8.13 Снимки на шелфа заснети от ПАДУ - Sea Turtle II.

По-голямата част от работата по проекта е завършена между 2013-2016г, но апаратът е постоянно обновяван и усъвършенстван от тогава досега. За основните модули може да се каже че работата е отнела по-малко от 3 год., което отговаря на изискванията. Изчисляването на изразходваните средства е нелек проблем, но оценка на досегашните разходи показва цена около \$13 000, включително цена за проектиране и изработка на компоненти от подизпълнители. С начална оценка от \$20 000, апаратът е почти на половината от очакваните разходи. В следващите секции са анализирани резултатите от отделните компоненти на ПАДУ.

# 8.7.1 Захранване

Архитектурата на ПАДУ е базирана на захранване с компенсация на пада на напрежение. Компенсацията е реализиран с контролиране на подаваното напрежение в зависимост от консумираната мощност. Системата е стабилна и този метод може да се използва при всякакви проекти, които имат проблем с предаване на мощност по дълъг кабел. Като недостатък може да се спомене оскъпяването на оборудването, което обаче е минимално в сравнение с другите методи.

# 8.7.2 Тетер и комуникации

Един от най-важните резултати от това изследване е потвърждението на хипотезата че единична силова усукана двойка може да бъде използвана за предаване н захранване и комуникации. СУД е изключително лесна за производство, поддръжка и поправка. Ако не се изисква неутрална плаваемост, такива кабели могат да бъдат закупени от всеки магазин за електрически материали. Честотната лента от около минимум 13Mbps е напълно достатъчна за предаване на видео и телеметрия чрез използването на HomePlug технологията. Предложената LUNA архитектура решава проблема с отделянето на високоскоростната от нискоскоростната мрежи, минимизирайки броя на конектори и кабели.

# 8.7.3 Тръстер

Два от компонентите на тръстера - пропелер и контролер са проектирано специално за целта на проекта. Изработеният Каплан пропелер показва много добри характеристики при статична тяга и работа със стандартни BLDC мотори. Контролерът използва иновативен алгоритъм за управление, пригоден за работа на мотора във "вентилаторен" режим - какъвто е необходим при ПАДУ системи.

# 8.7.4 Светлини

Водата поглъща повече червената част на спектъра на светлината. Тъй като LED светлините имат сложен спектър, не е очевидно как различните цветови температури се поглъщат от водата. Тестовете с различни LED показват че студено бяло цветовата температура -5000<sup>0</sup>К и повече, е най-удачна за ПАДУ светлини поради най-малкото поглъщане.

# 8.7.5 Камера

Изборът на камера, при използване на СУД, е предопределен - IP камера с компресия на видео сигнала. Избраната за проекта камера не е от най-висок клас, но въпреки това произвежда изключително добро видео изображение при минимално закъснени и изисква малка честотна лента.