



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
KURESSAARE KOLLEDŽ

**PURJEJAHI SAARE 38 ELEKTRISÜSTEEMIDE
ÜLEVAADE**
SAILBOAT SAARE 38 ELECTRICAL SYSTEM OVERVIEW

LÕPUTÖÖ

Üliõpilane: Taavi Tuuling

Üliõpilaskood 178750SDSR

Juhendaja: Kaarel Koppel

Kuressaare 2022

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

"....." 20.....

Autor: Taavi Tuuling
/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 20.....

Juhendaja: Kaarel Koppel
/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees
/ nimi ja allkiri /

ANNOTATSIOON

Käesolev töö käsitleb elektriskeemide koostamist väikelaevaehitusega tegelevale ettevõttele. Skeemide koostamise käigus on võrreldud kahte joonestusprogrammi leidmaks nende seast ettevõtte jaoks parim lahendus. Koostatud on purjejahi elektribilanss, leides selle kaudu, millise mahtuvusega akusid oleks kõige optimaalsem kasutada. Veel on leitud vastavalt paigaldatavate seadmete nõuetele vajaliku suurusega kaitsmed ning vastavalt kaablitrassi pikkusele õige läbimõõduga kaablid. Samaaegselt on pööratud tähelepanu praktilistele vajadustele, andes töös soovitusi, millist akutüüpi kasutada ning alusele paigalda. Erinevate akude mudelite valik on küllaltki lai, seetõttu on keskendutud AGM (*absorbed glass mat*) ja liitiumakude võrdlusele ning nende koos kasutamisele ühes süsteemis. Veel on käsitletud purjejahi elektriseadmete, näiteks põtkurite ja erinevate laadijate paigaldamist ja võrdlust, leidmaks optimaalne lahendus seadmete parameetreid ja paigaldusnõudeid silmas pidades.

Lühendite ja tähiste loetelu

2D	kahemõõtmeline
3D	kolmemõõtmeline
A	Amper
AC	Vahelduvvool
AGM	<i>Absorbent glass mat</i> ehk akuhape on imendatud klaasmatti
Ah	Ampertund
AIS	<i>Automatic identification system</i> , automaatne identifitseerimise süsteem
Beam	Laeva suurim laius
BMS	<i>Battery monitoring system</i> , aku oleku jälgimise seade
DC	Alalisvool
Displacement	Veeväljasurve
DOD	<i>Depth of discharge</i> ehk maha laetavuse tase
Draft	Süvis
GPS	Globaalne positsioneerimissüsteem
I	Voolutugevus
kWh	Kilovatt-tund
l	Kaabltrassi pikkus
LED	Valgusdiod
LOA	Laeva kogupikkus
NMEA2000	Seadmete ühendamiseks mõeldud pistikute lahendus
P	Võimsus vattides
t	Aeg
U	Pinge
V	Volt
VHF	<i>Very high frequency</i> , mereraadio

1. SISSEJUHATUS

Lõputöö teema valik tekkis seoses autori tööga kohalikus väikelaevaehitusega tegelevas ettevõttes Saare Yachts OÜ ning elektrialase huvi ja varasemate õpingutega energeetika valdkonnas. Asudes tööle purjejahte tootvas ettevõttes tutvusin, kuidas toimub purjelaevade tootmine algusest lõpuni. Töökohaga tutvudes ja tööprotsessi käigus selgus, et elektrisüsteemide skeeme on seni valmistatud käsitsi, tehes abijoonised paberile – ettevõttes puudus ühtne süsteem ja skeemide kogum, mida laevaehituses kasutada. Kuna arvutiga koostatud elektriskeemidel on mitmeid eeliseid võrreldes käsitsi valmistatud joonistega, siis tekkis idee luua arvutis jahti jaoks põhised elektriskeemid, mis kliendile koos laeva dokumentatsiooniga kaasa anda. Edaspidi on võimalik neid elektriskeeme kohaldada ka teistele mudelitele ning vajadusel hõlpsasti täiendada ja muuta.

Skeemid on mõeldud kasutamiseks nii töökojas jahti ehitusel, kui klientidele, et neil oleks võimalik vajadusel omal käel vigu tuvastada või lisaseadmete paigaldamist hõlbustada.

Lisaks dimensioneeritakse elektriseadmete toitekaablid. Antud töös koostatakse nimekiri, millise suurusega kaableid ja kaitsmeid süsteemis kasutatavad tarbijad vajavad. See on vajalik, et ei tekiks ohtu kasutajale ega tema varale. Näiteks ülekoormusest tingitud seadmete häving ning sellest tulenev tuleoht, millega võib kaasneda oht inimeste turvalisusele.

Viimane osa tööst käsitleb sobiva mahutavusega akude leidmist elektriseadmete toiteks meresõidul ning võrdleb varasemalt paigaldatud seadmeid, leides nende seast sobivaima lahenduse. Sobivate akude leidmiseks on vajalik purjejahi elektribilansi arvutamine, kus on välja toodud elektriseadmete tarbitavad võimsused. Järgmiseks sammuks on määrata kindlaks sobiv akutüüp. Kuna ettevõttes on kasutatud kahte tüüpi akusid, sai see määravaks akude mudelite valikul. Eesmärk on leida majanduslikult kasumilikum aku mudel. Veel võrreldakse kahte pötkurit ja erinevaid laadija tüüpe selleks, et leida, milline lahendus oleks kõige optimaalsem. Seda nii elektri tarbimise, kaabelduse teostuse nõuete kui ka vajaliku ruuminõuete poolest.

2. PURJELAEVA TUTVUSTUS

Purjelaev, mille elektrisüsteemiga töös tegeletakse on Saare 38.2. Tegu on luksusliku matkapurjekaga, mida valmistatakse Saaremaal Nasval ettevõttes Saare Yachts OÜ.

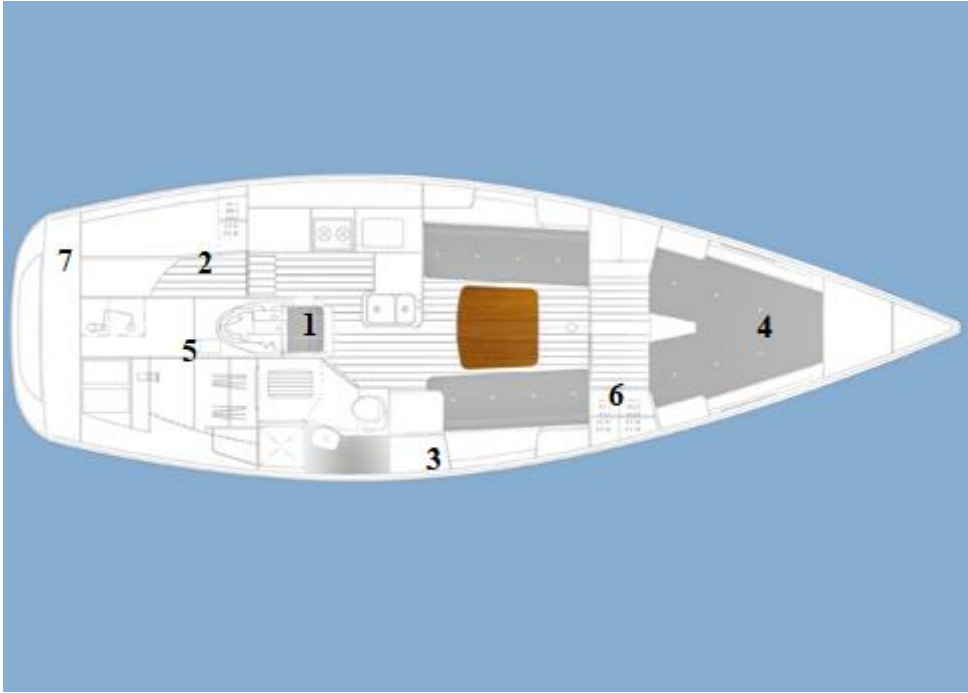
Tegemist on 38- jalase purjelaeva teise versiooniga, mille sisustuse paigutust on muudetud.



Pilt 1 Saare 38.2

Saare 38.2 andmed:

LOA (kogupikkus)	11.4 m
Beam (suurim laius)	3.66 m
Draft (süvis)	1.95 m
Displacement (veeväljasurve)	8.1 t



Pilt 2 Saare 38.2 asetus

Pildile on lisatud numbrid, millele vastavalt asuvad alusel elektri- ja elektroonikaseadmed.

Seadmed:

1. Mootoriruumist vööri poole sissepääsu trepi all asetsevad tarbeakud.
2. Koi all asuvad käivitusaku ning mootori ja tarbevoolu massilülitid koos vajalike kaitsmete ja seadmetega.
3. Kaardilauas asuv lülituspaneel, selle taga asuvad AIS ja VHF raadio.
4. Vööriakude, nende laadija ning pötkuri asukoht, ankruvints asetseb kajutist vööri pool purjekastis.
5. Mootoriruumi taga asuvad kaldavoolu laadija – inverter, galvaaniline isolaator, autopiloodi juhtseade.
6. Vööriakapis asub ITC5, mis on seade tuule-, kaja- ja kiirussensori vastuvõtu seade, muutes nende andmed NMEA2000 võrgule sobilikuks.
7. Autopiloodi kompassi asukoht.

3. ELEKTRISÜSTEEMIDE PAIGALDUS

Ligi 85% laevade elektrisüsteemide probleemidest on tingitud vigastest ühendustest või valede kaablite kasutamisest. Kasutades seadmete tootjate poolt soovitatud õige suurusega kaableid ja kaitsmeid on võimalik paljusid probleeme vältida. Laevade puhul on lisaks paigaldusest tingitud vigadele üks suurimaid ohte elektrisüsteemidele vesi. Kaitsmaks seadmeid liigniiskuse ja vee eest tuleb seadmed vastavalt tootja soovitatud parameetritele paigaldada ning kasutada võimalikult veekindlaid ühendusi [1]. Elektrilised süsteemid tuleb paigaldada vastavuses kehtivate standardite ja soovitustega.

Väikelaevades kasutatakse peamiselt alalisvoolusüsteeme, vahelduvvoolu kasutatakse üldiselt inverteeri kaudu seadmete toiteks ja sadamas akude laadimiseks. Kõik seadmed vajavad tööks vooluahelat, lihtne vooluahel koosneb pingesallikast, tarbijast ja neid ühendavast kaabeldusest. Vooluahela korrapäraseks tööks tuleb valida õigete suurustega toiteallikas nagu aku, kaablid ja kaitsmed. Õigete parameetritega seadmete valimiseks kasutatakse erinevaid valemid[1]. Näiteks Ohmi seadust, kus pinge on võrdne voolutugevuse ja takistuse korrutisega, võimsus valem, kus vattide leidmiseks korrutame voolutugevuse pingega.

Käesolevas töös on käsitletud 12V alalisvoolu süsteem. See on laialdaselt levinud nii autotööstuses kui ka laevatööstuses, kuna enamuse seadmeid, sealhulgas valgustus, töötavad 12V pingel. Laevades on mitmeid elektrit vajavaid süsteeme, valgustus, navigatsiooniseadmed, jõuajamid, ankrusüsteemid jm. Kaabelduse planeering on tavaliselt esimeseks sammuks. Selleks leitakse, millise suurusega kaableid on vaja seadmete korrapäraseks tööks ning leitakse parimad võimalused kaabelduse korrektseks paigalduseks. Selleks tuleb arvestada läbiviigu võimalusi vaheseinadest ja tekist, et kaablid jääksid terveks ja oleksid korrektselt kinnitatud kaitseks mehaaniliste vigastuste eest, ning seal, kus vaja, oleks tagatud veekindlus[1]. Elektriseadmeid ei tohi paigaldada aladesse, kus on kokkupuude kütusega (diiseli, bensiini, gaasi), ilma vajalike kaitsmeetmeteta. Kaablite paigaldamisel mootoriruumi tuleb arvestada tuleohutusega, kaablite isolatsioon peab omama kõrgemat temperatuuritaluvust ning vastu pidama võimalikele kokkupuudetele kütte, õli või muude vedelikega.

Orienteerumaks paigaldatavas süsteemis on soovitatav kasutada mitmevärvilisi kaableid erinevate süsteemide jaoks või märgistada kaablid püsivärvidega (näiteks numbriga) [1]. Süsteemide korrapäraseks toimimiseks on lisaks korrektsele paigaldusele vajalik ka jälgida süsteemi korrasolekut perioodiliselt vastavalt jahi ja seadmete tootjate nõuetele ning vajadusel viia läbi remonditööd. Võib esineda olukordi, kus mõnede seadmete, näiteks antennid või kompassid, töös võib esile tulla häireid, kuna need asuvad mõnele teisele seadmele liiga lähedal[1]. Näiteks autopiloodi kompass, mis varasemalt ehitatud laevadel

asus kaardilaua juures. Sellega kaasnes võimalus, et seadme läheduses asuv veepump tööle lülitudes muutis kompassi suunda. Selle probleemi lahendamiseks tuli leida autopiloodi kompassile võimalikult kaugel asukoht teistest elektriseadmetest ahtris.

Tekil asuvate GPS antennide paigaldamisel lähtutakse tootja nõuetest, paigaldades antennid üksteisest vähemalt ühe meetri kaugusele[2].

4. ELEKTRIJONISTE PROGRAMMI VALIK

Kuigi laevaehitus kasutatakse projekteerimiseks spetsiaalset insenertehnilist tarkvara, siis elektrijooniste koostamiseks piisab üldkasutatavatest programmidest, mis sobivad kahedimesnionaalsete (2D) jooniste valmistamiseks.

Töö käigus võrreldi kahte programmi:

1. AutoCAD 2021 [3]
2. QElectroTech 0.8 [4]

AutoCAD sai valitud kuna see on väga levinud ning palju insenerid oskavad seda kasutada. QElectroTech tarkvara on vabavarana saadaval ja loodud spetsiaalselt elektriskeemide loomiseks.

Programmi valiku tegemiseks on võetud eeskuju Kristjan Tabri tööst „Väikelaevaehituse kompetentsikeskuse tarkvaravajaduse prognoos ja hinnakalkulatsioon“ [5].

Tarkvarade võrdlemiseks on kasutatud kolme järgnevat kriteeriumit:

1. Tarkvara hinnast.
2. Programmi õppimise keerukusest.
3. Otstarbekuse hindamine.

Igale kriteeriumile jagatakse punkte, parem saab 1 punkti kehvem 0. Lõpptulemusena punktid liidetakse ning sobivaimaks programmiks osutub suurima punkti summaga programm. Tulemused on ära toodud tabelis 1.

Tabel 1. Tarkvara programmide võrdlus

Programm	Hind	Programmi õppimise keerukus	Otstarbekuse hindamine – kasutus mugavus	Punktide summa
AutoCAD 2021	2227 eurot aastas [3]	Keskmine	Mugavam	1
	0	0	1	
QElectroTech 0.8	Tasuta [4]	Lihtsam	Vähem mugavam	2
	1	1	0	

Selle töö käigus konkreetse jahi jaoks said elektriskeemid koostatud QElectroTech programmis, mis pikemal kasutamisel ja kogemuse tekkides on hästitöötav abivahend.

Töö käigus koostati elektriskeemid jahile peale jahi valmimist. Vajab märkimist, et töö käigus tehtud märkmed ja fotod sõlmedest on väga olulised skeemide koostamisel, et saada kokkuvõttes ülevaatlik ja tegelikkusele vastav skeem.

5.KAABLITE RISTLÕIKED

Korrektse suurusega ja õigesti paigaldatud kaablid on vajalikud tagamaks seadmete ohutus ja töökindlus. Seadmete tarbitavate voolutugevuste kaudu saab seadmete kaitseks vajaliku suurusega kaitsmed välja arvutada. Nende kaitsmete suurused on leitud seadmete spetsifikatsioonide kaudu, kui tootja poolset soovitusi pole antud. Tabelis 2 on välja toodud, millised kaitsmed tuleb elektritarbijatele paigaldada ning millise läbimõõduga kaableid paigaldada vastavalt kaablitrassi pikkusele, kaabli ristlõike on ümardatud üles sobiva ristlõikega kaablini. Kaabli ristlõike valikul on aluseks võetud seadmete tootjate ja kaablitootja soovitusi [7] [8]. See on eelkõige mõeldud kasutamiseks abivahendina laeva elektriseadmete paigaldamisel. Tabelis esitatud kaitsmete ja kaablite suuruseid kasutatakse paigaldusel.

Siin kohal on esitatud laevas kasutatava LED ribade kaitsme valik. LED ribad töötavad pingel 12V DC ning voolu tarbimine on 9,6 vatti meetri kohta. Kokku on kasutusel kuus meetrit valgustit. Sobilik kaitse leitud järgnevalt.

$$I = \frac{P}{U} \quad (1)$$

Kus I – voolutugevus (A), P – võimsus (W), U – pinge (V)

$$I = \frac{9,6 * 6}{12} = 4,8 A$$

Seega on valitud LED ribade jaoks 5 amprine kaitse.

Tabel 2. Tarbijate kaitsmete suurused I ja paigaldatavate kaablite ristlõiked [7] [8]

TARBIJA	Kaitse I (A)	Kaablistlõige kuni 5m edasi-tagasi (mm ²)	Kaablistlõige 5 kuni 10m edasi-tagasi (mm ²)	Kaablistlõige kuni 20m edasi-tagasi (mm ²)
LED ribad kambüüsis	5	1.5	1.5	2.5
Hämaradi LED ribale salongis	5	1.5	1.5	2.5
Laevalgustid	5	1.5	1.5	2.5
Panipaiga valgustid	2	0.75	1.5	1.5
Seina valgustid	2	0.75	1.5	1.5
Pötkur	500	95	140	Olukorda ei teki
Taglase vints	60	35	50	70
Ankru vints	150	50	70	Olukorda ei teki
Sõidutuled	2	0.75	1.5	1.5
AIS	5	1.5	1.5	2.5
VHF	10	1.5	2.5	4
Andmeside võrk	5	1.5	1.5	2.5
Autopiloot	10	1.5	2.5	4
Plotter	10	1.5	2.5	4
Teki tuli	2	0.75	1.5	1.5
Masti tuli	2	0.75	1.5	1.5
Sõidutuli mastis	2	0.75	1.5	1.5
Ankru tuli	2	0.75	1.5	1.5
Udupasun	5	1.5	1.5	2.5
Kütteseade	25 ja 5(lülitus)	Tehasekimp	Tehasekimp	Tehasekimp
Elektriline tualettpott	25	4	6	Olukorda ei teki
FM raadio	15	2.5	4	6
Gaasi sensor	2	0.75	1.5	1.5
Duši pump	10	1.5	2.5	4
Magevee pump	10	1.5	2.5	4
Pilsipump	5	1.5	1.5	2.5
Külmik	15	2.5	4	6
Inverter	150	70	140	Olukorda ei teki

6. AKU SUURUSE ARVUTUS

Sobiva suurusega akude leidmiseks kasutatakse elektribilansi arvutustabelit. Selle koostamisel lähtutakse kliendi poolt soovitud elektritarbijate valmistajatehaste poolt seadme dokumentatsiooni lisatud andmetest. Selle abil leitakse, kui suuri akusid tuleb jahti paigaldada, et tagada optimaalne elektrivarustus. Optimaalseks elektrivarustuseks on stsenaarium, kus jaht suudab keskmise tarbimise juures vähemalt kaks ööpäeva ilma sadamat küllastamata merel hakkama saada. Elektribilansi koostamisel on eeskujuks võetud „Laevaomaniku illustreeritud käsiraamat“ arvutusi hindamaks päevast elektritarbimist [2].

Järgnevas tabelis on välja toodud kõik laeva elektritarbijad ja nende võimsused. Olukorras, kus tootja andmetes ei leidu mingit parameetrit on puuduvad andmed arvutatud. Sellisteks seadmeteks on näiteks LED (valgusdiod) lambid ja ribad, viimaste puhul on toote pakendil kirjas pinge ja võimsus ühe meetri kohta. Sel juhul tuleb vastavalt valitud LED riba pikkusele arvutada kogu LED riba võimsus.

Seejärel arvestatud kõikide toodete tarbimised kokku ning esitatud tabelis 3. Arvutused tarbimiste osas on tehtud vaid tarbijatega, mis saavad voolud tarbeakudelt. Vööris asuvad põtkur ja ankruvints arvestusse ei lähe, kuna neil on toiteallikaks oma aku. Tabelis on kasutatud järgnevaid valemeid:

1. Valem voolutugevuse arvutamiseks:

$$I = \frac{P}{U} \quad (2)$$

2. Valem ampertunni arvutuseks:

$$Ah = I * t \quad (3)$$

Tabel 3. Elektribilansi tabel

TARBIJA	Elektrivõrk	Tarbimine		Ööpäevas	
		Võimsus P (W)	Voolutugevus I (A)	Kasutusaeg t (h)	Ampertundi (Ah)
LED ribad kambüüsis	12v DC	36.00	3.00	3	9.0
Hämaridi LED ribale salongis	12v DC	38.30	3.19	1.5	4.8
Laevalgustid	12v DC	28.00	2.33	7	16.3
Panipaiga valgustid	12v DC	2.70	0.23	1	0.2
Kajuti valgustid	12v DC	8.50	0.71	2	1.4
Taglase vints	12v DC	700.00	58.33	0.2	11.7
Sõidutuled	12v DC	2.20	0.18	12	2.2
AIS	12v DC	2.00	0.17	24	4.0
VHF	12v DC	22.00	1.83	16	29.3
Andmesidevõrk	12v DC	11.00	0.92	24	22.0
Autopiloot	12v DC	74.00	6.17	2	12.3
Plotter	12v DC	7.34	0.61	6	3.7
Teki tuli	12v DC	5.00	0.42	3	1.3
Masti tuli	12v DC	2.00	0.17	12	2.0
Sõidutuli mastis	12v DC	2.30	0.19	12	2.3
Ankru tuli	12v DC	1.80	0.15	10	1.5
Udupasun	12v DC	29.00	2.42	0.5	1.2
Kütteseade	12v DC	40.00	3.33	3	10.0
Elektriline tualettpott	12v DC	110.00	9.17	0.1	0.9
FM raadio	12v DC	60.00	5.00	3	15.0
Gaasi sensor	12v DC	3.00	0.25	24	6.0
Dušši pump	12v DC	90.00	7.50	0.25	1.9
Magevee pump	12v DC	90.00	7.50	1	7.5
Pilsipump	12v DC	36.00	3.00	0	0.0
Külmik	12v DC	11.29	0.94	24	22.6
Inverter	12v DC	1600.00	150	0.05	7.5
				KOKKU 24h tarbimine	196.6

Kulu arvestatakse ampertundides seetõttu, et nii on andmeid parem võrrelda akude mahtuvusega. Tavaliselt arvestatakse väikelaeva elektritarbimist ühe või kahe päeva kohta. Tabelist 4 selgub, et stsenaariumi kohaselt, kus laev on merel 24 tundi on elektritarbimine keskmise tarbimise juures laevas 196.6 Ah. Ehkki selle stsenaariumi kohaselt elektritarbimise arvestamine on küllaltki oletuslik võib eeldada, et suurusjärg kuhu tarbimine jääb on õige, kuna tulemused olid sarnased ka eeskujuks võetud allikas [2]. Lähim standard aku suurus on 200 Ah. Kaheks ööpäevaks oleks seega vaja kahte akut kokku 400 Ah, mis tagaksid 393.2 Ah tarbimise juures piisava varustatuse. Akude tühjenemise korral on võimalik neid laadida mootori generaatori abil.

7. AGM JA LIITIUMAKUDE VÕRDLUS

Autori töökohal on väikelaevades kõige rohkem kasutusel AGM (*absorbent glass mat* – imav klaasfiibrist matt) akud. Viimasel ajal on järjest enam võetud kasutusele liitiumakusid. Töös tehakse võrdlus nende kahe akutüübi vahel.

Laiemalt kuuluvad AGM akud geelakude gruppi. AGM akudes ei ole akuhape mitte lahtiselt nagu tavatarbijate poolt kasutatud pliiakudes (näiteks autoakud), vaid imendatud klaasfiibrist mati sisse. Sama kasutuse juures on AGM akud võrreldes tavaliste pliiakudega vastupidavamad [10].

Liitiumakud on kasutatavad nii autodes kui ka laevadel. Neid akusid võib paigaldada erinevates asendites – püsti, külili või ka tagurpidi. AGM akusid võib paigaldada püstises või külili asendis. Merel kasutatavad akud peavad olema vastupidavamad maismaa sõidukite omast, kuna maanteedel on tingimused võrreldes mere tingimustega suhteliselt stabiilsed. Paigaldades autoaku laevale, võivad tekkida aku sees või korpuses vigastused [9]. Peale selle on autoakud peamiselt mõeldud auto käivitamiseks, seega on need suutelised väikese aja jooksul välja andma suurt pinget sõiduki käivitamiseks. Seevastu laeva tarbeakud ei pea mootorit käivitama, selleks on eraldi käivitusaku, vaid peavad suutma tagada elektritarbijatele piisav voluhulga.

Selles peatükis püütakse välja selgitada, kas liitiumakud on siiani laialdaselt laevanduses kasutusel olnud AGM akudest paremad. Seda hinnatakse võrreldes eri parameetrid: hind, mahutavus, kaal, eeldatav eluiga ja süsteemi ühendamise lihtsus. Täpsemalt on võrdlusesse kaasatud:

1. Ettevõtte Victron Energy AGM aku
2. Ettevõtte Victron Energy liitiumaku
3. Ettevõtte Liontron liitiumaku

Need on akud, millega autor on varasemalt igapäeva töös kokku puutunud ning oskab hinnata positiivseid ja negatiivseid külgi.

Liitiumakudel on eelis kütusekulule – nad suudavad mootori generaatori kaudu rohkem energiat ammutada (kWh) kui AGM akud [10]. Liitiumaku tööks vajaliku BMS kasutamisel saab generaatorilt tarbida suuremat laadimisvoolu. Sama mahutavuse juures on liitiumakude kaalud kergemad. Liitiumakude miinuseks on kõrgem risk tulekahjule või plahvatusele tulenevalt ülelaadimisest. Selle vastu on liitiumakudel paigaldatud BMS ehk aku oleku jälgimisseade, mis reguleerib ohutut laadimist ega lase akul tühjeneda alla tootja poolt määratud piiri. See on vajalik, et akut oleks võimalik korduvalt laadida, alla lubatud piiri tühjenemist ei ole võimalik akusid täis laadida [11].

AGM akude eeliseks liitiumakude ees on tootmise hind ning nende tootmine on keskkonnasõbralikum.

T.H. Kim artiklis [10] AGM ja liitiumaku võrdlusest sõiduautos, saadi liitiumaku kasutamisel 1,7% parem kütusekulu. Peamiseks kütusekulu vähendavaks asjaoluks oli aku kaal. Testis oli autole paigaldatud seade, mis pidurdamisel võimaldas energiat suunata akusse. AGM aku puhul suunati saadav energia tagasi akusse, kuid liitiumaku puhul paraku pidurdamisel saadud energia ei olnud piisavalt suur, et akusid laadima hakata. Vaatamata sellele kulutasid liitiumakud vaid 2,0% oma laetud tasemest kogu testi vältel. Seevastu AGM akud olid enne taaslaadimiseni, piduritest saadava energia poolt, jõudnud kaotada 5.0% oma laetud tasemest. Sellest võib järeldada, et liitiumakud on efektiivsemad kui AGM akud. Antud töö raames valitakse andmetelt võimalikult sarnaste parameetritega akud, mis on välja toodud järgnevas tabelis 4.

Tabel 4. Võrreldavad akud

Aku mudel	Tootja	Tüüp	Mahtuvus	
BAT412201084	Victron Energy	AGM	220 Ah	
LFPSmart	Victron Energy	Liitium	200 Ah	
Lithium LiFePO4 LX Smart BMS	Liontron	Liitium	200 Ah	

Valiku põhjuseks on liitiumakude mahtuvused, mis on tootjapoolsete andmete kohaselt võrdsed ning neile kõige lähedasema mahtuvusega AGM akuks on Victron Energy 220 Ah.

Akude võrdlemisel lähtutakse järgnevatest parameetritest:

1. Mahtuvus

AGM akud loodi algselt auto mootorite startakudena, aga need on laialdast kasutust leidnud laevades tarbeakudena. AGM akude eelis tavaliste pliikude ees on laadimiskiirus, paraku on nende akude mahalaadimise ulatus kuni 50% (DOD-*Depth of Discharge*) [2]. Liitiumakud on küll kallimad kui AGM akud, aga nende mahalaadimise ulatus on kuni 80% (DOD) [11]. See tähendab, et kasutatav energia kogus on suurem kui AGM akul.

Näiteks oleks Victron Energy poolne arvutuskäik [11]:

- Liitiumaku Victron 12 V 200Ah
Üks akuelement on 3,3 V, see 12,8 V aku koosneb kaheksat elemendist. Seega võimalik energia on $12,8 * 200 = 2,56 \text{ kWh}$, millest 80% realselt kasutatav energia on $2,56 * 0,8 = 2,05 \text{ kWh}$
- Kaks AGM akut Victron 12 v 220 Ah
Võimalik saadav energia on $12 * 220 = 2,64 \text{ kWh}$, millest 50% kasutatav energia on $2,64 * 0,5 = 1,32 \text{ kWh}$

Tabel 5. Erinevatest akutüüpidest saadav energia

Akud	Teoreetiline energia	Reaalne energia
Victron 12V 200 Ah liitium	2,56 kWh	2,05 kWh
Victron 12V 220 Ah AGM	2,64 kWh	1,32 kWh
Erinevus esimesest akust	3,1%	35,6%

2. Kaal

Liitiumakudel on AGM akude ees märgatav kaalueelis. AGM akud võivad olla koguni neli korda raskemad kui liitiumakud.

3. Mõõtmed

Kaalueelisest tulenevalt võib eeldada, et mõõtmeteltki on liitiumakud väiksemad. See on kindlalt märgatav võrreldes Victron Energy AGM ja liitiumakusid. Võrreldes neid aga Liontroni akuga on see Victroni liitiumakust kaks korda suurem, ehki kaal jääb samasse klassi. Kaalud ja mõõtmed on välja toodud tabelis 6.

4. Hind

Turuanalüüsi käigus selgus, et liitiumakude hind kõrgem, nende akude ehitamisel on kasutatud kallimaid komponente. Hinnaerinevus võib olla kuni neli korda.

5. Mahalaadimine

Suurem mahalaadimine pikema aja vältel võimaldab tagada suuremate tarbijate töö. Näiteks pötkurid, autori kogemusel võivad liiga väikse võimsusega akud pötkurite käitamisel ostuta ebapiisavaks.

6. Eeldatav eluiga (laadimistsüklite arv)

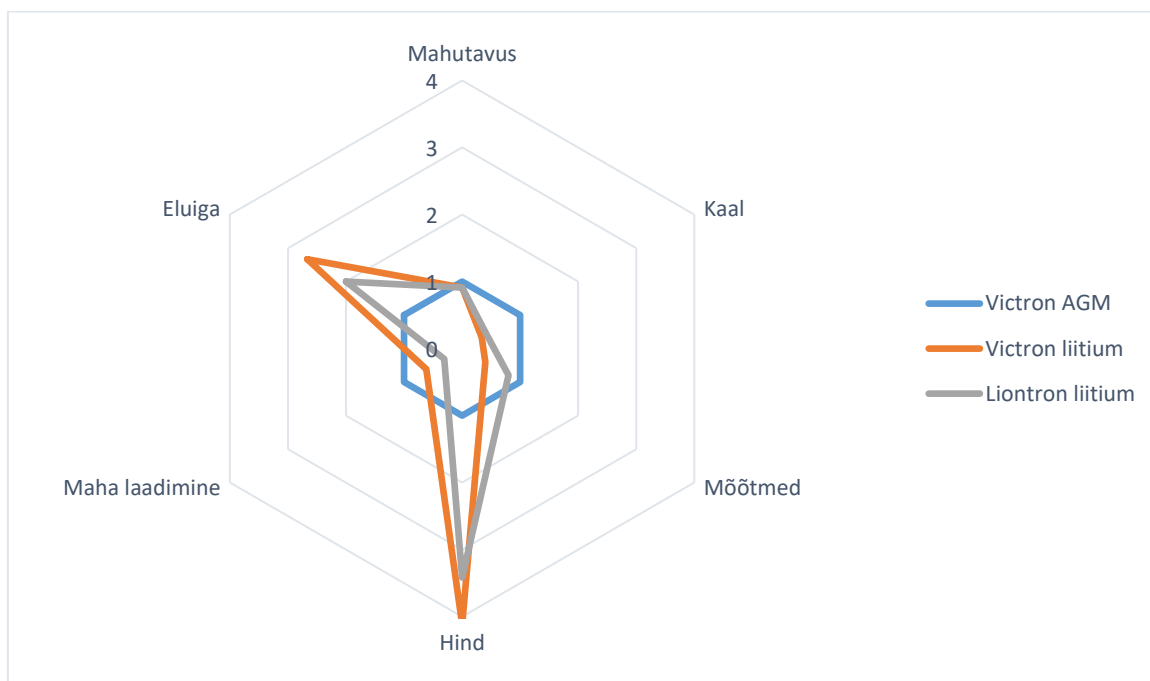
Liitiumakude eluiga on pikem kui AMG akudel, koguni kaks korda.

Järgnevas tabelis 6 on ülevaatlikult esitatud AGM ja liitiumakude võrdluse tulemused.

Tabel 6. Akude võrdlus

Kriteerium	Victron AGM	Victron liitium	Liontron liitium
Mahtuvus (Ah)	220	200	200
Kaal (kg)	65	22	27.5
Mõõtmed (PxLxK) (mm)	522x238x240 (0,30m ³)	237x321x152 (0,12m ³)	390x260x232 (0,24m ³)
Hind (€)	520	2140*	1776*
Maksimaalne maha laadimine lühiajaliselt (A)	650	400	200
Eeldatav eluiga (laadimistsüklite arv)	400-1500	2000-4000	≥3000
*Tööks vajalike lisaseadmete hinnad (€)	0	665	785

Tabelis kasutatavad andmed on pärit tootjate poolsetest allikatest. [12] [13]



Joonis 1. Akude võrdlus AGM aku suhtes

Lisaks akude omahinnale tuleb arvestada aku lisaseadmete kuludega. Mootori käivitusaku laadimine, mis enamasti AGM toimub generaatorilt otse. Generaatori voolu võib suunata läbi diodibloki jagades nii voolu mitmele akupangale ilma, et eri aku vahel voolu liikumist toimuks.

Kui tarbeakudeks on AGM tüüpi akud, siis toimib nende laadimine analoogselt käivitusakule – otse generaatorilt läbi diodibloki.

Liitiumakude puhul tuleb aga kasutada seadet, mis kontrollib ja piirab generaatorilt saadavat voolu, selle maksumus lisaks akude maksumusele on töö kirjutamise hetkel 665 eurot pluss vajalikud kaitsmed ja kaabeldus[12]. Selleks seadmeks on Victron Energy Buck-Boost DC-DC konverter. See on vajalik eelkõige generaatori kaitseks, kuna tühja aku korral nõuab BMS suurt hulka voolu, mis väikese tootlikkusega generaatori puhul võib generaator üle kuumendada ja kasutuskõlbmatuks muuta[14].

Akude laadimisel sadamas läbi kaldavoolu on vaja esmalt korrektse võimsusega laadijat. AGM akude puhul ühendatakse laadija otse akuga, kasutades vajadusel õige suurusega kaitsmeid. Liitiumakude puhul võib asi olla veidi keerulisem. Antud töös võrreldud Liontroni akudel on BMS sisse ehitatud ning laadija võib samuti otse akudega ühendada. BMS kontrollib kuidas voolu jagab. Victroni liitiumakud see vastu on küll väiksemad, kuid vajavad lisaseadmeid. Vaja on liitiumakude laadijat, mis on konkreetset seadistatud vastavalt paigaldatud akusid laadima ning lisaks tuleb paigaldada väline BMS (hind 120 eurot [12]), mis jälgib akude olekut ja lülitab vajadusel laadimise välja.

Võrdluses selgus, et ideaalseks liitium tarbeakuks oleks Liontroni akud millel BMS sisse ehitatud – seega on seda lihtsam paigaldada ning seadistada. Kasvõi soovikorral vanade AGM akude väljavahetamisel liitiumakude vastu ei tule teha muud, kui AGM akud süsteemist eemaldada ning uued Liontroni omad asemele ühendada. Kuna need akud ei vaja muud seadistamist ega laadija vahetamist, on need selleks ideaalsed. Silmas tuleb pidada, et mootori generaatori eluea seisukohalt oleks vajalik paigaldada generaatori ja aku laadimise vahele lisaseade, mis kontrollib voolu tarbimist aku poolt.

Arvestades eelkõige liitiumakude hinda tuleb tõdeda, et tänasel päeval näiteks matkapurjeka puhul, millega kavas paaripäevaseid retki teha, ei tasu liitiumakude kasutus rahaliselt ära. Esiteks on akud ise kuni neli korda kallimad kui AGM akud ning on vaja lisada elektroonikat tagamaks liitiumakude töö, mis lisab veelgi väljaminekuid.

Liitiumakude kaalueelis võib kasu anda rohkem näiteks võistlusspordiga tegelevatele alustele. Tabelist 6 võib järeldada, et liitiumakude eluiga on kolm, maksimaalselt neli pikem kui AGM akudel. Seega tavakasutuse juures ei ole liitiumaku ära tasuv isegi, kui vahepeal neli korda akusid vahetada. Kuna generaatori voolu kontrolliva seadme maksumust arvestades jääks ikkagi miinusesse.

8. SEADMETE VÕRDLUS

Purjejahti paigaldatakse erinevaid seadmeid, siinkohal on välja toodud suuremate seadmete võrdlus. Võrdlus viiakse läbi põtkuri ja laadija valikul ning võrdluse all on tooted, mida on varasemalt jahtidele paigaldatud.

8.1 Põtkurite võrdlus

Põtkurite valik tehakse kahe tootja vahel, milleks on Sleipner Side-Power ja MaxPower:

1. Sleipner Side-Power SRV100 retractable thruster 12V
2. Max-Power Compact Retract thruster 12V

Neid põtkureid on jahtidele paigaldatud, siinkohal leitakse kumb põtkur on otstarbekam paigaldada. Järgnevas tabelis on välja toodud põtkurite parameetrite võrdlus:

Tabel 7. Põtkurite võrdlus

Kriteerium	Side-Power SRV100	Max-Power Compact Retract
Kogu võimsus (kW)	6,3	4,79
Põtkumis jõud (kg)	100	70
Minimaalne aku suurus (CCA)	750	800
Kaabeldus (mm ²)	95	95
Hind (€)	6963	7069
Paigaldatavate seadmete arv	3	6

Põtkurite hinnad on sarnased, üheks Max-Poweri eeliseks on tema suletud korpus. Seega vastupidiselt Side-Powerile, mille korpus on avatud ning mille tõttu võib sattuda mootori harjaste tolmu laeva sisse, Max-Power laeva sisemust ei määri.

Võimsuse poolest on Side-Power võimsam, kuid igapäevases kasutuses merel praktikas ei ole kahe võrreldava põtkursüsteemi mõju aluse meresõiduomadustele juhi poolt olulisel määral eristatav. Kõige suuremaks eeliseks Side-Poweril on laeva paigaldatavate seadmete arv: põtkur, automaatne massilüliti koos kaitsmega ja paneel. Max-Poweril seevastu: põtkur, automaatne massilüliti, kaitse, relee mootori käitamiseks (Side-Poweril põtkuri küljes), paneel ja paneeli kontrollid (Side-Poweril põtkuri küljes). Kuna seadmeid on rohkem ja need on suurte mõõtmetega, kulub tööaega ja ruumi rohkem. Vaba ruumi jääb kliendile panipaigana alles. Side-Powerile kulub vähem kaablit, kuna vajalikud kontrollid on juba põtkuri küljes ja kaabeldus tehases tehtud. Samuti on parem ka lülitusahel, mis kasutab NMEA2000 tüüpi ühendust.

Kuna hinnavahe suuresti ei erine, siis tehniliste näitajate ja paigaldusel kokku hoitavate töö ja materjali näol on otstarbekam paigaldada Side-Poweri põtkurit.

8.2 Laadijate võrdlus

Kaldavooluga akude laadimiseks on vaja AC-DC laadijat. Sellist lahendust võib kasutada kõigi laeva akupankade laadimiseks. Kuid mitmete akupankade laadimiseks on ka teine võimalus. Kasutada ühte AC-DC laadijat ühe akupanga laadimiseks ja teiste väiksemate akupankade laadimiseks kasutada DC-DC laadijat.

AC-DC ehk vahelduvvoolu laadijaid kasutatakse laevades üldjuhul peamise akude laadimisvõimalusena lisaks mootori generaatorile. Sel juhul muudetakse vahelduvvool trafo abil sobivaks alalisvooluks. Mitme akupanga kasutamisel tuleks valida, kas üks laadija, millel on mitme akupanga laadimise võimalus või mitu AC-DC laadijat – igale pangale oma laadija [14].

Lisaks vahelduvvoolu laadijale on võimalik kasutada DC-DC, alalisvoolu laadijaid. Selliseid laadijaid on võimalik kasutada nii, et sisendpinge tuleneb akult, mida laeb generaator või alalisvoolu laadija [14]. DC-DC laadijat on võimalik seadistada vastavalt akutüübile, sel viisil on tagatud õige programmi järgi akude laadimine. Alalisvoolu laadijal on eelis, kui üht akupanka laetakse eraldiseisva generaatori või päikeseenergia abil. Sel juhul esimese akupanga täitumisel oleks DC-DC laadijaga võimalik merel olles teisi akupanku laadida. See on ideaalne olukordades, kus läbitakse suuri vahemaid või asutakse eraldatud asukohas, kus puudub kaldavoolu võimekus.

KOKKUVÕTE

Lõputöö tulemusena sai leitud soovituslik programm, millega luua purjejahi elektriskeemid. Erinevaid parameetreid hinnates osutus parimaks programmiks QElectroTech, mis on spetsiaalselt elektriskeemide jaoks loodud vabavara programm. Veel koostati nimekiri jahis kasutatavatest elektritarbijatest ning leiti vajalikud kaitsmete suurused, sobiliku ristlõikega kaablid ning tarbitavad võimsused. Nende andmetega koostati laeva elektribilanss, mille kaudu leiti laeva jaoks vajaliku suurusega akud. Akude valiku jaoks anti ülevaade AGM ja liitiumakudest lihtsustamaks valikut. Kokkuvõttes võib öelda, et majanduslikult on otstarbekam paigaldada AGM akud, samas aga kaht akutüüpi süsteemis kombineerides võib saada pikkadeks merereisideks sobiliku lahenduse.

Põtkurite võrdluse tulemusena saab öelda, et Sleipner Side-Power süsteem omab märgatavaid eeliseid, kuna sarnaste parameetrite juures on see võimsam ja odavam. Ning tema paigalduseks kulub vähem ruumi, mis on eriti oluline aspekt just väikelaeva puhul. Teiste akupankade laadimiseks, olgu selleks käivitusaku või põtkurite toiteks mõeldud akud, on mõistlik kasutada alalisvoolu laadijat. Selline lahendus tagaks võimaluse pikemalt sadamat küllastamata laadida erinevaid akusid tarbeakude kaudu. See annab suurema eelise, eriti, kui laevale on paigaldatud lisaks generaator, päikesepaneelid või mõni muu seade, mis laeb tarbeakusid. Nende täitumisel, ilma sadamat küllastamata, hakkaksid alalisvoolu laadijad laadima teisi akupanku.

Valminud elektriskeemide edasiarendusena tuleks luua esmalt kaablitele nummerdussüsteem. See võimaldaks kaablite nummerdused tuua elektriskeemidesse. Täiendavalt võiks juurde uurida AGM ja liitiumakude käitumist, luues reaalne testmudel – võrreldes näiteks akude kestust ning laadimist. Lisaks nimetatud akutüüpidele võiks võrdlusesse tuua teisigi akutüüpe laiema pildi saamiseks. Pikkade merereiside juures on alusel väga oluline elektriga varustus, selle jaoks on abi alternatiivsetest laadimisallikatest nagu päikesepatareid, hüdrogeneraator või tuulegeneraator. Uurides eri akutüüpide laadimist oleks võimalik öelda, millise aku puhul oleks alternatiivsete energia allikate kasutamine kõige optimaalsem.

ABSTRACT

The choice of the topic of this thesis came from author's work in a local shipbuilding company Saare Yachts OÜ and his interests towards electricity. For drawing sailboats electrical system suitable program was chosen – QelectroTech. Next list of consumers was given with appropriate fuse sizes and cabling. With this data electrical balance was made in order to find suitable batteries for vessel.

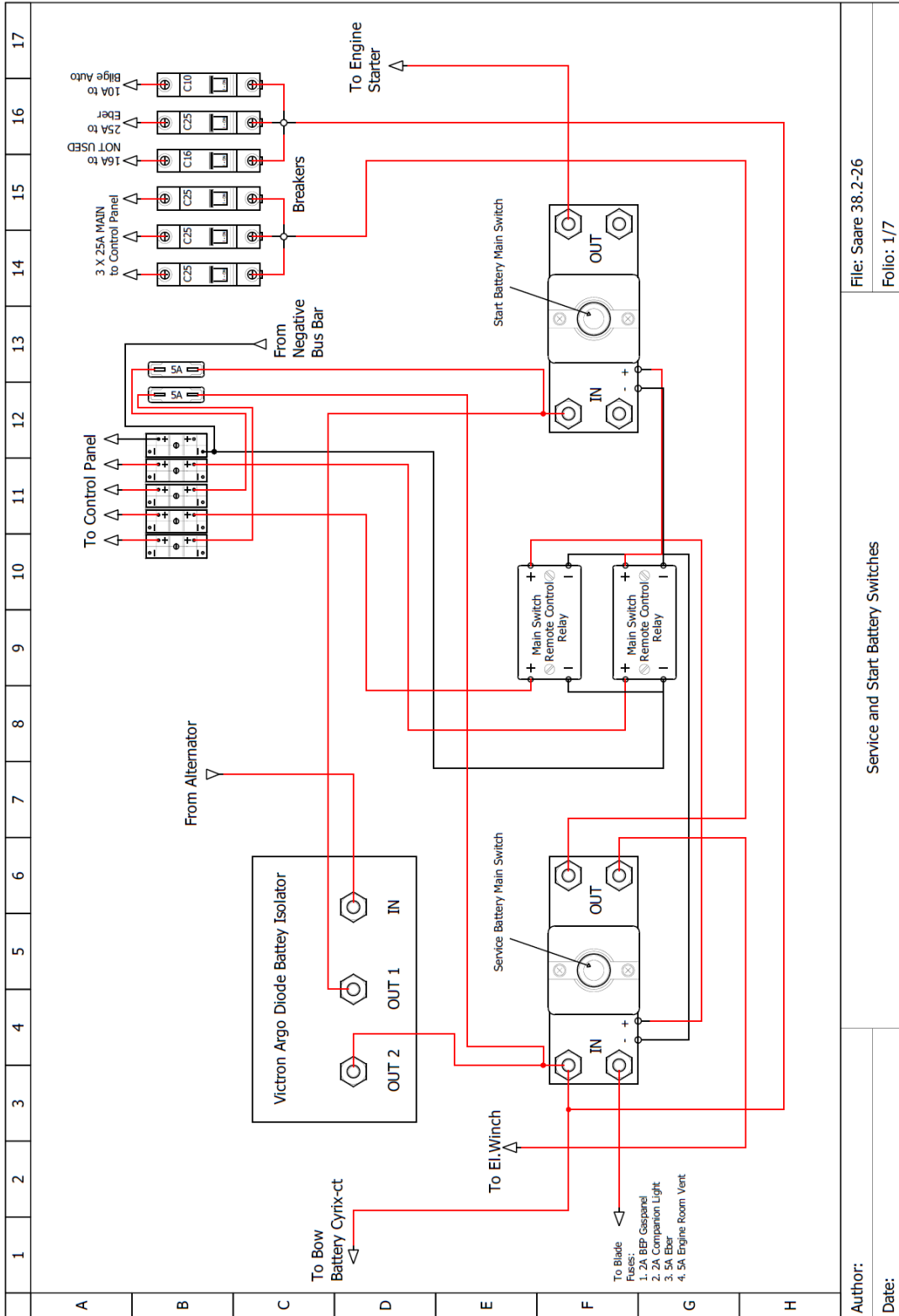
It turned out Sleipner Side-Power thruster has noticeable advantages, because it is more powerful and cheaper compared to other thrusters with similar parameters. And it had fewer and less equipment to install, which in small boat can save a lot of space.

Also AC-DC and DC-DC chargers were compared to find out which solution is best to use in our case.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] J. C. Payne, *Understanding Boat Wiring*, New York: Sheridan House, 2003.
- [2] C. Wing, *Boatowner's Illustrated Electrical Handbook*, International Marine/ McGraw-Hill, 2006.
- [3] Autodesk, „<https://www.autodesk.com/products/autocad/overview?term=1-YEAR>,” 2021.
- [4] QElectroTech, „QElectroTech,” <https://qelectrotech.org/>, 2021.
- [5] K. Tabri, „Väikelaevaehituse kompetentsikeskuse tarkvaravajaduse prognoos ja hinna kalkulatsioon”.
- [6] E. Sherman, *Powerboater's Guide to Electrical Systems*, The McGraw-Hill Companies, Inc, 2007.
- [7] Blueseas, „Blueseas systems,” 19 05 2010. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.blueseas.com/support/articles/Circuit_Protection/1437/Part_1%3A_Choosing_the_Correct_Wire_Size_for_a_DC_Circuit. [Kasutatud 27 12 2021].
- [8] A. Cabels, *Automarine Cables*, 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.automarinecables.com/amc-product-catalogue-2018-2021-brand-update.pdf>. [Kasutatud 07 12 2021].
- [9] S. Khillar, „Difference Between Car Battery and Marine Battery,” 06 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.differencebetween.net/object/difference-between-car-battery-and-marine-battery/>. [Kasutatud 07 12 2021].
- [10] T.-H. J. J.-B. S. H.-S. S. S.-M. D.-H. L. B. K. Kim, „Study on Performance of Vehicle with Different Types of 12 V Starter Batteries Using HILS,” *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2019.
- [11] J. Rushworth, „Batteries: Lithium-ion vs AGM,” *Victron Energy*, 2015.
- [12] V. Energy, „Pricelist,” %1 https://www.victronenergy.com/media/pricelist/WEB_Pricelist_Victron_2021-Q2_Euro_C_23EPhav.pdf, 2021.
- [13] Liontron, „Pricelist,” %1 https://liontron.com/download/Preisliste_Liontron.pdf, 2021.
- [14] J. C. Payne, *Understanding Boats Batteries and Battery Charging*, Sheridan House Inc, 2003.
- [15] E. Skjong, E. Rødskar, M. Molinas, T. A. Johansen ja J. Cunningham, „The Marine Vessel's Electrical Power System: From its Birth to Present Day,” *Proceedings of the IEEE vol. 103, No. 12*, 2015.
- [16] M. S. Whittingham, „Electrical Energy Storage and Intercalation Chemistry,” *Science*, kd. 192, 1976.
- [17] IEA, „Global EV Outlook 2020,” 2020.

LISA 1 SAARE 38.2-26 ELEKTRISKEEMID



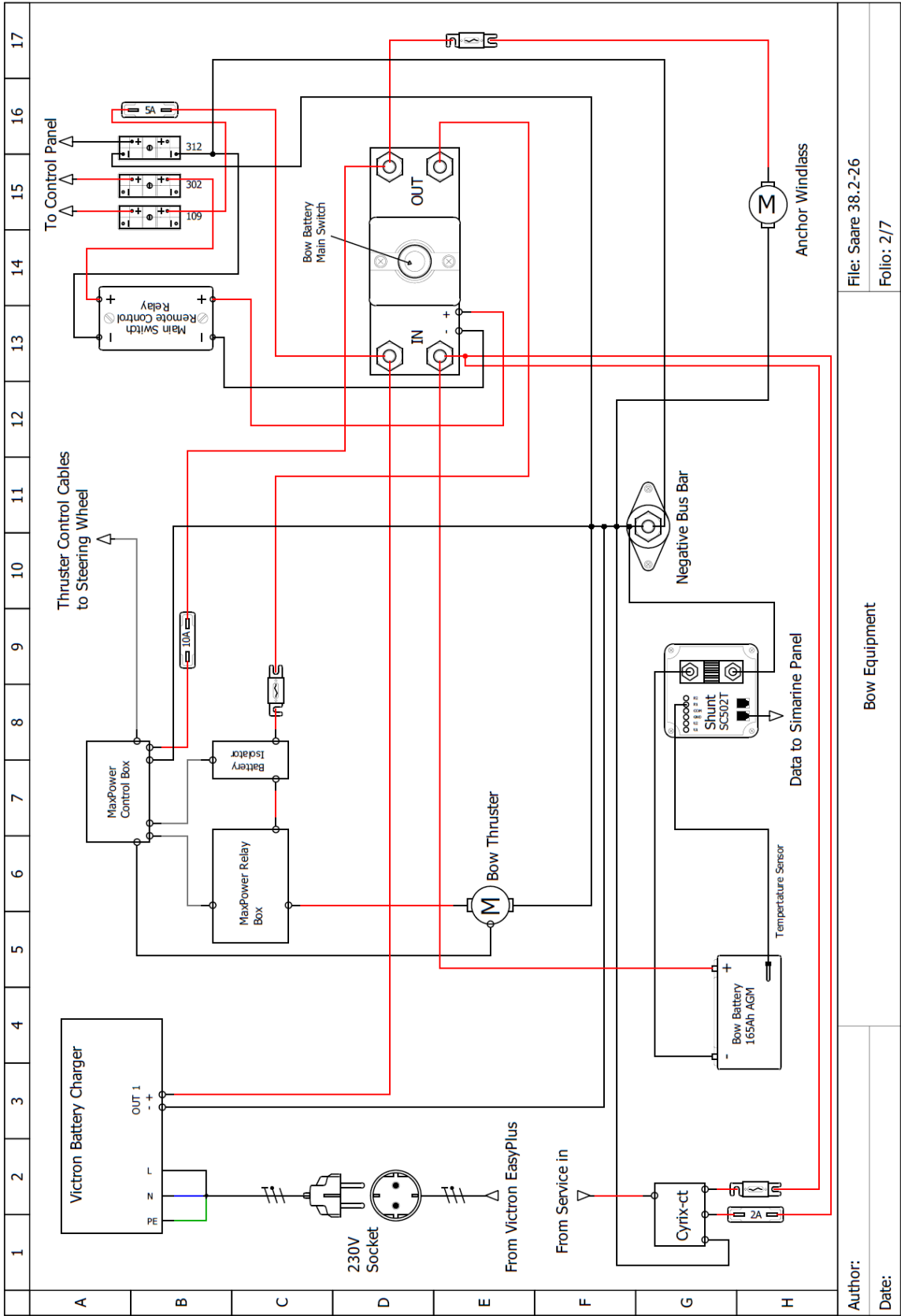
File: Saare 38.2-26

Folio: 1/7

Service and Start Battery Switches

Author:

Date:



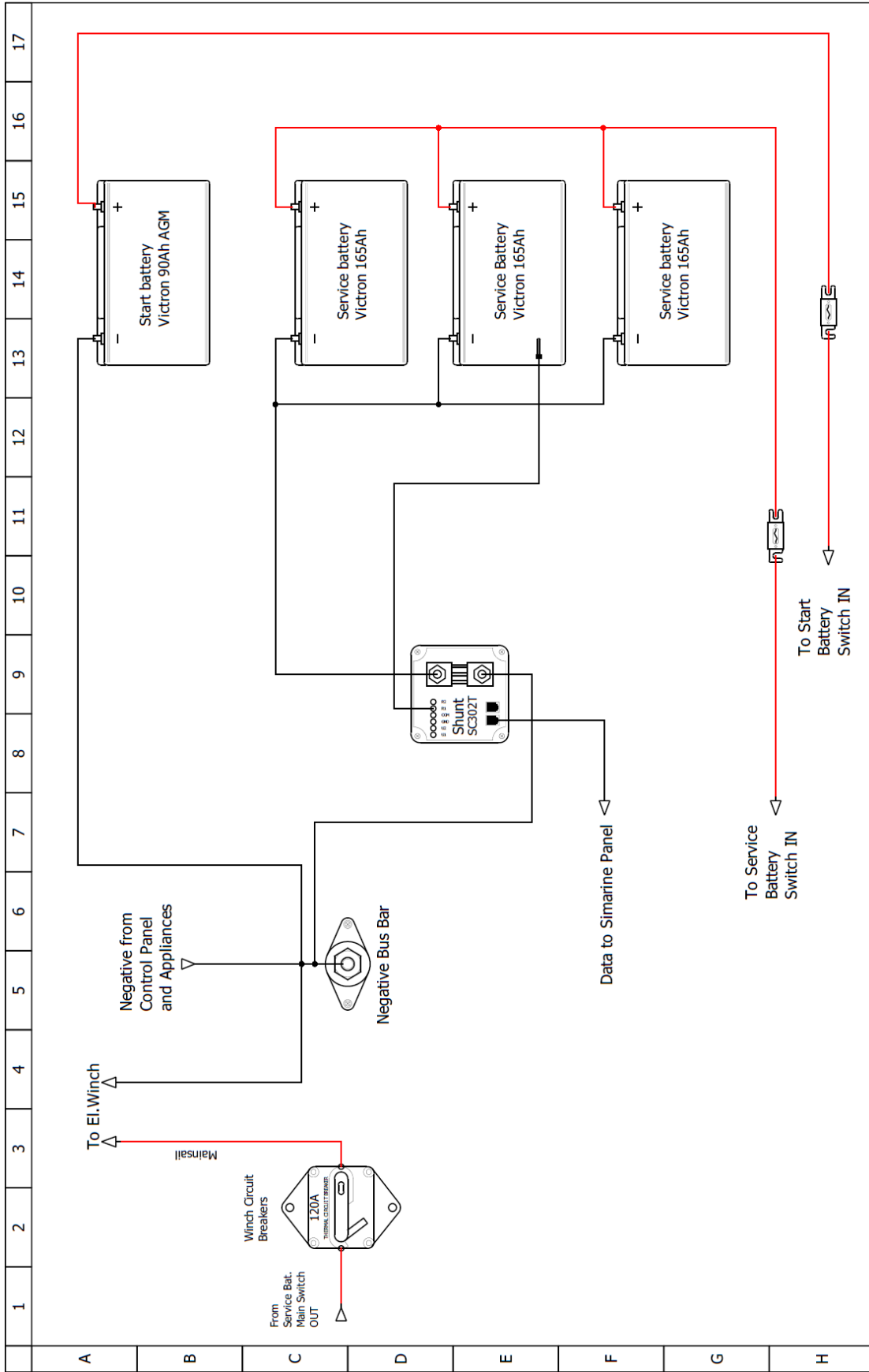
File: Saare 38.2-26

Folio: 2/7

Bow Equipment

Author:

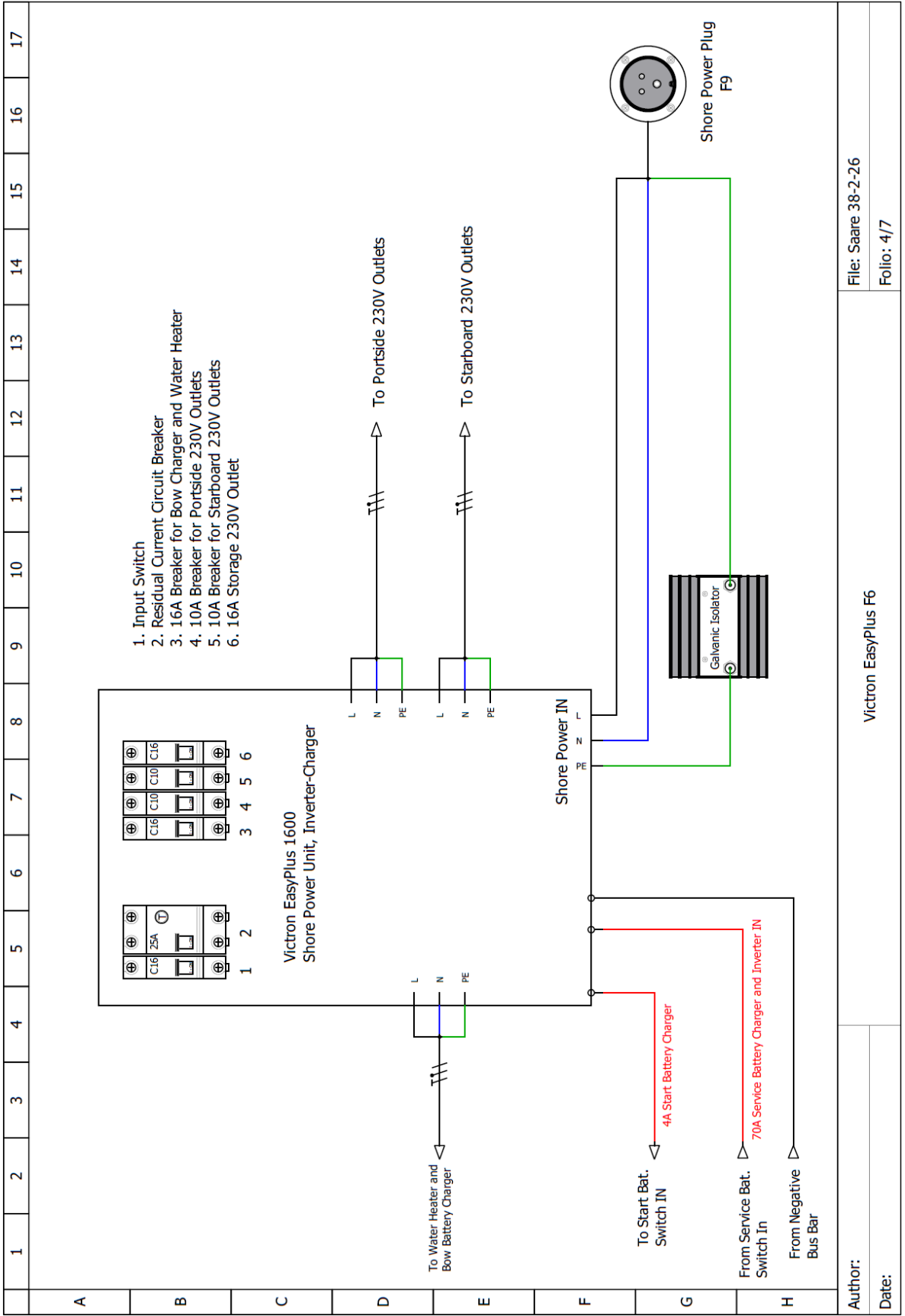
Date:

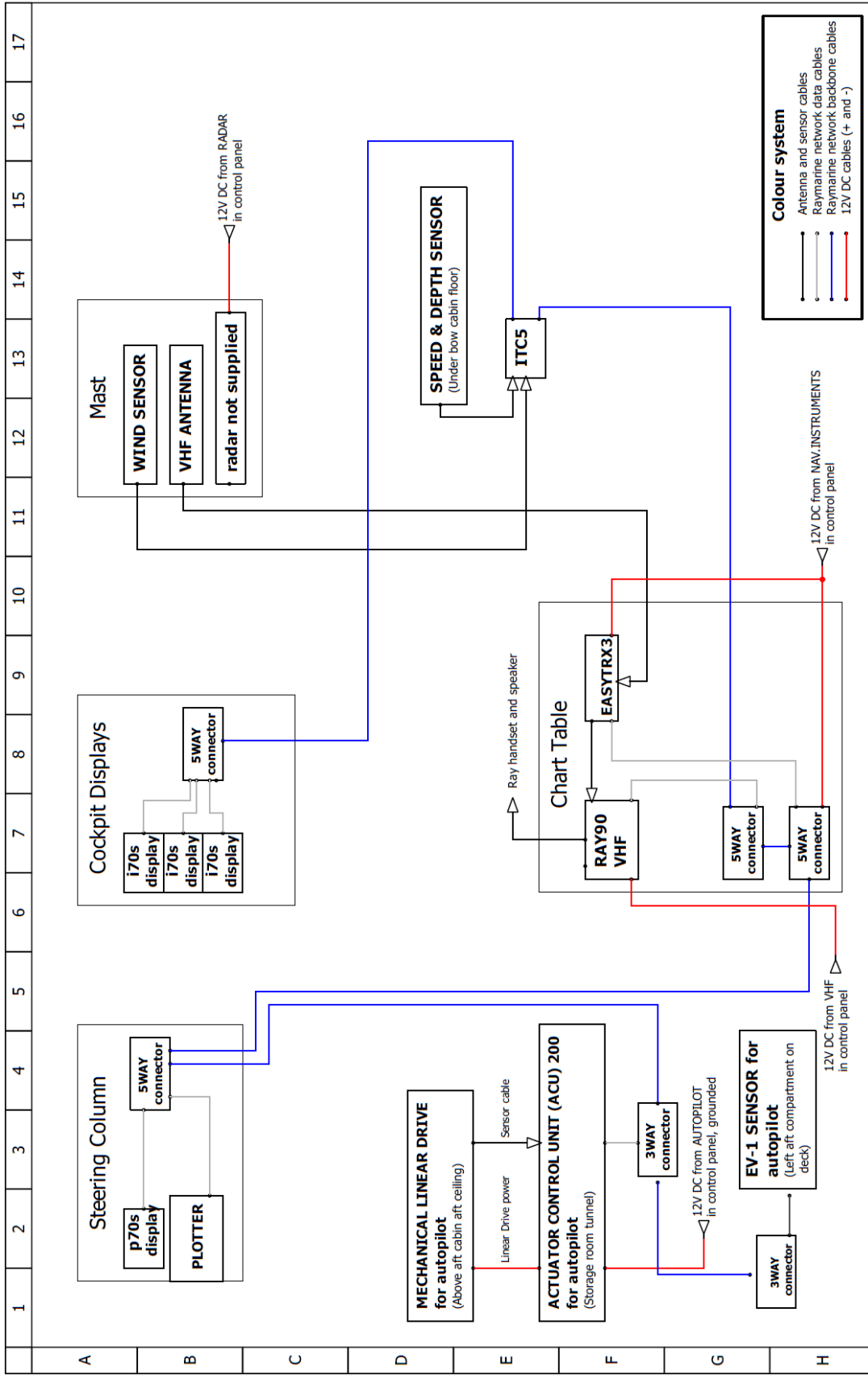


Author:
Date:

Service and Start Batteries

File: Saare 38.2-26
Folio: 3/7





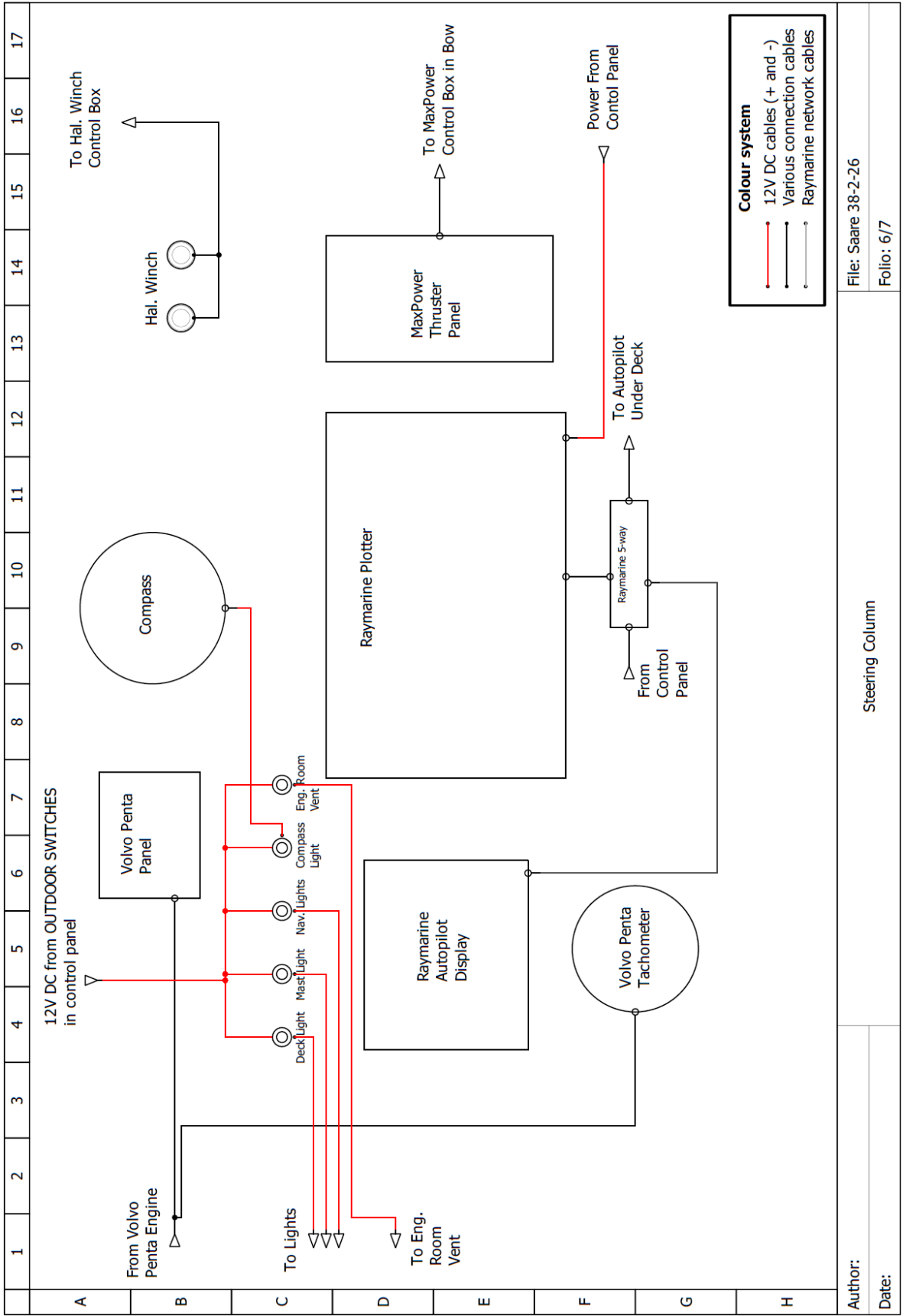
File: Saare 38-2-26

Folio: 5/7

Raymarine Network

Author:

Date:



LISA 2 LIHTLITSENTS

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Taavi Tuuling

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose
Purjejahi Saare 38 elektrisüsteemide ülevaade,

mille juhendaja on Kaarel Koppel,

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna
Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja
lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu,
sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse
kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka
autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega
isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

02.01.2022

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.