

CONCEPT STUDIES OF VESSEL ELECTRICAL POWER TRANSMISSION UNIT

I. V. Sorokin¹, D. S. Semenov^{1,2}, S. V. Sharashkin^{1,2}

¹ — Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russian Federation

² — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

Power supply of remote from the main communications objects is a one of the main problem in the Arctic area reclamation. Due to the fact that offline power sources have a limited power value, it is necessary to solve the problem of forced power supply to the high-power consumers (industrial installations, localities, etc.). For this purpose, floating power units based on the nuclear power plant are developed and used. At studying the various mooring systems for a floating power unit, the most appropriate option is single point mooring (SPM) with internal vessel turret system. The system allows fixing a vessel position and providing uninterrupted power supply of consumer through the mooring unit. The main part of the system is electrical energy reception and transmission device. It represents slip-ring contact for connecting cables of object and electrical system of the floating power unit. Creation of ship electrical power system consists of converters and commutation equipment is required for realizing transmission and distribution of electrical energy. The analysis results of electrical energy transmission system options from the floating power unit to the object (consumer) are presented in the paper. The various construction options of the electrical energy reception and transmission device for direct docking with the mooring unit are developed. According to the criteria of reliability, manufacturability, weight and volume, a comparison of transmission system options for voltages levels of 10.5, 35 and 110 kV is made. Parameter of ship's and underwater transmission lines such us numbers and section of cables as well as power and voltage losses have been estimated. Based on the study results, the possibility and feasibility of using such systems are assessed.

Keywords: electrical power system, electrical energy transmission, slip-ring contact, floating power unit, single point mooring, electrical energy reception and transmission device, modeling.

For citation:

Sorokin, Ilya V., Dmitrii S. Semenov, and Sergei V. Sharashkin. "Concept studies of vessel electrical power transmission unit." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.2 (2021): 278–289. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-278-289.

УДК 621.3.05

АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ КОМПЛЕКСА СУДОВОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ВЫДАЧИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

И. В. Сорокин¹, Д. С. Семенов^{1,2}, С. В. Шарашкин^{1,2}

¹ — ФГУП «Крыловский государственный научный центр»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

² — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

В работе рассмотрен вариант решения одной из основных проблем при освоении Арктической зоны Российской Федерации, которая состоит в обеспечении электроэнергией объектов, удаленных от магистральных коммуникаций. Отмечается, что ограниченность мощности автономных источников приводит к необходимости постановки задачи принудительного (внешнего) обеспечения электроэнергией высокоэнергетических потребителей (промышленные установки, населенные пункты и др.). Для решения этой задачи отечественные и зарубежные компании занимаются разработкой, изготовлением и вводом в эксплуатацию плавучих энергоблоков на основе ядерной энергетической установки. При рассмотрении различных систем швартовки плавучего энергоблока целесообразным оказывается применение варианта с одноточечным причалом, расположенным в определенной секции судна, поскольку данная система позволяет осуществить надежную фиксацию судна в месте швартовки, обеспечивая при этом бесперебойную подачу питания от источника электроэнергии на объект через швартовное устройство. Подчеркивается,

что ключевым элементом электрооборудования данной системы является устройство приема-передачи электроэнергии, которое представляет собой конструкцию, включающую скользящий электрический контакт, и служит для соединения приемных кабелей объекта с электроэнергетической системой плавучего энергоблока. Для организации передачи и распределения энергии требуется разработка судовой электроэнергетической системы, включающей элементы преобразовательного и коммутационного оборудования. В статье проанализированы результаты расчета возможных систем передачи электроэнергии от плавучего энергоблока к объекту снабжения. Приведены возможные варианты конструкции устройства приема-передачи электроэнергии для непосредственной стыковки плавучего энергоблока со специальным швартовным устройством. Выполнено сравнение по критериям технологичности, надежности, массы и габаритов вариантов систем передачи на уровнях напряжения 10,5, 35 и 110 кВ. Определены параметры судовых и подводных кабельных трасс: число и сечение кабелей, а также дана предварительная оценка потерь напряжения и мощности. На основании результатов анализа определены возможность и целесообразность реализации подобных систем.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, передача электроэнергии, скользящий контакт, плавучий энергоблок, одноточечный причал, устройство приема-передачи, моделирование.

Для цитирования:

Сорокин И. В. Анализ вариантов комплекса судового электрооборудования для выдачи электроэнергии / И. В. Сорокин, Д. С. Семенов, С. В. Шарашкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 2. — С. 278–289. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-278-289.

Введение (Introduction)

В последнее десятилетие (начиная с 80–90 гг. XX в.) приоритетными являются задачи развития Арктической зоны за счет разработки месторождений природных ресурсов и усовершенствования технологий их освоения, что нашло отражение в соответствующих указах Президента Российской Федерации и государственной программе «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации». Одной из ключевых задач в части освоения данной территории служит энергообеспечение населенных пунктов, производственных сооружений и промышленных установок, являющихся высококомпонентными потребителями электроэнергии.

Применение автономных источников зачастую не может обеспечить необходимый уровень энергопотребления, поэтому остро встает вопрос принудительного (внешнего) энергоснабжения объектов. При условии высокой удаленности объекта от магистральных линий электроснабжения (прибрежные зоны, морские объекты) целесообразно применение передвижных (плавучих) электростанций (ПЭС) [1]. ПЭС представляет собой судно с ядерной энергетической установкой и единой электроэнергетической системой, осуществляющими распределение и преобразование энергии для передачи к потребителю.

Важной задачей в процессе реализации подобных систем является обеспечение надежной конструкции устройства выдачи (УВ). Наиболее простым вариантом исполнения УВ может служить обычная кабельная линия с использованием соединительных муфт. Основным недостатком такого варианта исполнения является отсутствие фиксации отводящих кабелей и возможные их повреждения в процессе перемещения судна при качке. Для исключения этого недостатка возможно использование варианта совмещения швартовного устройства (буя) и устройства приема-передачи (УПП) электроэнергии в единую конструкцию. Подобное решение нашло применение при добыче полезных ископаемых [2], [3], однако реализация его для передачи электроэнергии требует фундаментальной проработки.

Очевидно, что при реализации системы передачи на берег требуется разработка обособленной электроэнергетической системы судна, способной осуществлять распределение и преобразование электроэнергии, а также контроль состояния процесса передачи. Основные принципы построения подобных систем подробно описаны в источниках [4]–[6] и могут быть использованы при качественном сравнении вариантов компоновки оборудования.

Основные цели работы:

- проработка возможных структур систем передачи с учетом требуемой мощности;

- сравнение вариантов систем передачи;
- определение облика основных конструктивных узлов.

Результаты настоящего исследования могут найти применение при разработке новых судов обеспечения электроэнергией или ПЭС, а также при оснащении имеющихся судов оборудованием приема-передачи.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В процессе исследования предполагается рассмотрение трех основных схем передачи электроэнергии с различными уровнями напряжения $U_{\text{д}}$: 10,5, 35 и 110 кВ. Диапазон мощности потребителей может быть достаточно велик (от 0,5 до 80 МВт и более). При этом необходимо учитывать выходную мощность имеющихся образцов судовых ядерных энергетических установок (СЯЭУ). Для СЯЭУ с реакторами типа «Ритм-100» и «Ритм-200» целесообразно выполнять расчет для мощности $P = 100$ МВт. При этом следует полагать, что коэффициент мощности нагрузки $\cos \varphi = 0,98$ находится на уровне электростанции объекта снабжения. Диапазон возможных расстояний до объекта составляет 1–15 км.

В рассматриваемой системе (рис. 1) следует выделить три основных узла:

- электроэнергетическую систему для выдачи электроэнергии;
- УПП электроэнергии;
- устройство стыковки (УС) судового и подводного кабеля.

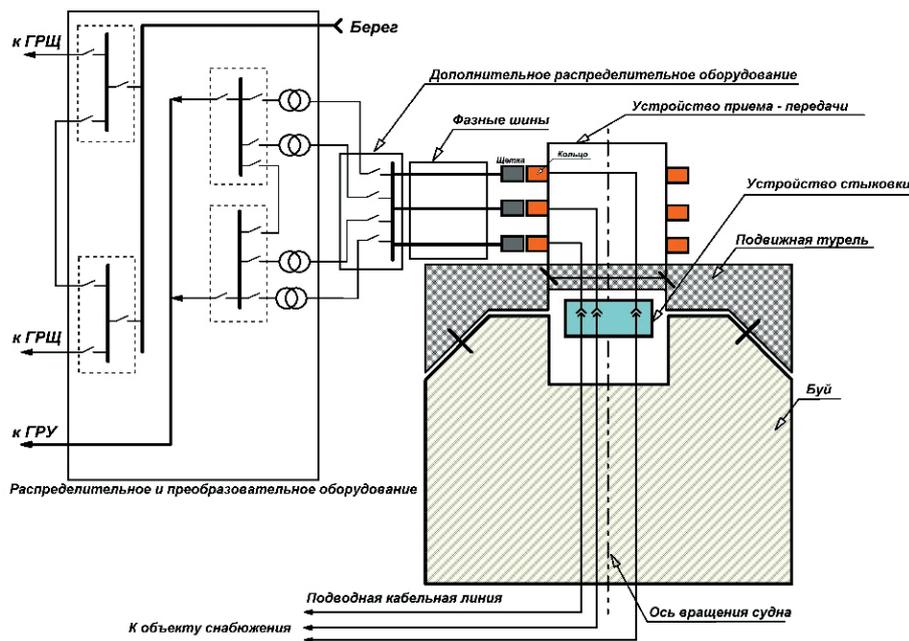


Рис. 1. Функциональная схема системы приема-передачи энергии

Электроэнергетическая система для выдачи электроэнергии состоит из распределительного и преобразовательного оборудования, предназначенного для передачи энергии от судовых электростанций. Также ее состав входит система контроля состояния и диагностики процесса передачи. УПП представляет собой скользящий электрический контакт. Подвод судового кабеля от ШС осуществляется к контактным щеткам УПП.

В процессе эксплуатации судно совместно с контактными щетками вращается вокруг неподвижной оси буя. При этом контактные кольца остаются неподвижными за счет жесткой сцепки с буюм. Устройство стыковки (УС) необходимо для соединения кабелей, закрепленных на швартовном устройстве (бую), и судовых кабелей или контактных поверхностей, отводящихся от контактных колец УПП.

Особенностью схемы передачи на уровне напряжения 10,5 кВ (рис. 2) является отсутствие повышающих трансформаторов и высоковольтного распределительного оборудования. При этом количество отводящих судовых и подводных кабелей питания существенно увеличивается по сравнению с остальными рассматриваемыми вариантами. Питание на систему передачи осуществляется непосредственно от электростанций судна (уровень напряжения 10,5 кВ) и распределяется между двумя параллельно работающими силовыми щитами (ЩС1–2). Отводящие фидеры ЩС1–2 соединены с кабельными группами, которые подаются на контактные щетки УПП. Структурная схема варианта передачи на уровне напряжения 10,5 кВ приведена на рис. 2.

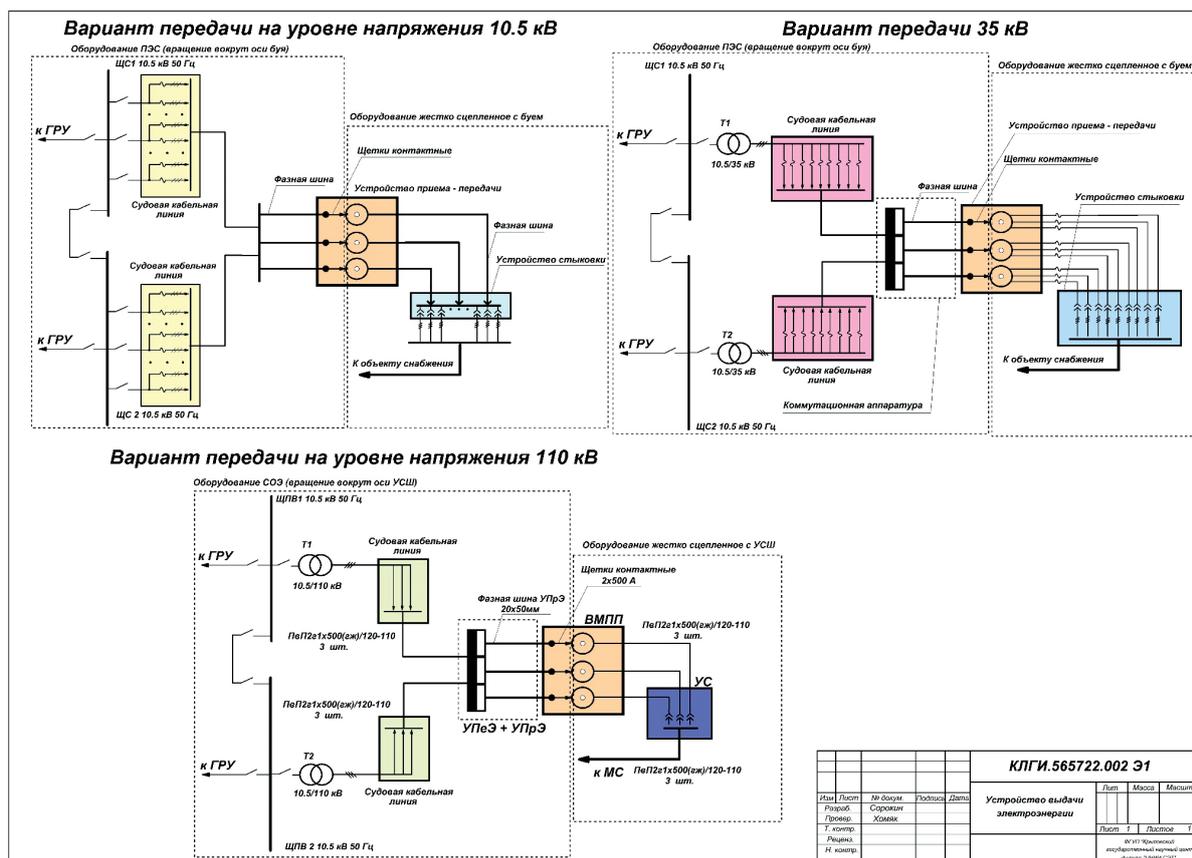
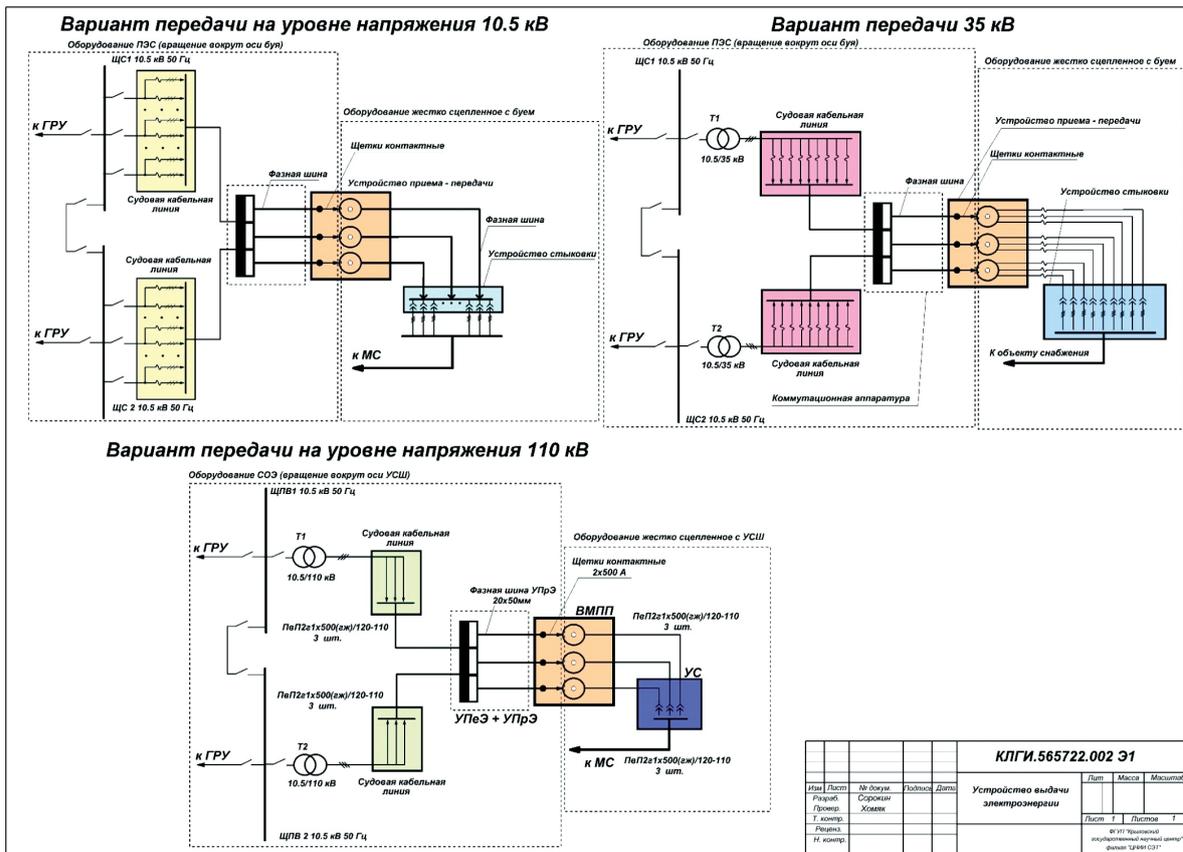


Рис. 2. Структурная схема варианта передачи на уровне напряжения 10,5 кВ

Передача электроэнергии из судовой сети на объект с уровнем напряжения передачи 35 кВ требует установки на судне повышающих трансформаторов 10,5/35 кВ. Отводящие фидеры ЩС при этом соединены с первичной обмоткой трансформаторов Т1 и Т2. Однако в данном варианте выходные кабели трансформаторов Т1 и Т2 не могут быть соединены непосредственно со щетками УПП. Поэтому для реализации данного варианта необходима установка дополнительного распределительного устройства между повышающими трансформаторами и УПП. Структурная схема варианта передачи на уровне напряжения 35 кВ приведена на рис. 3, а.

Передача электроэнергии из судовой сети на объект с уровнем напряжения передачи 110 кВ требует наличия повышающих трансформаторов 10,5/110 кВ. Тогда кабельная система с учетом стандартной номенклатуры может состоять из трех силовых кабелей. ЩС1–2 напряжением 10,5 кВ, подключенные к соответствующим секциям ГРУ, необходимы для передачи энергии от главных турбогенераторов на повышающие трансформаторы Т1 и Т2 для подачи на кабельную линию напряжением 110 кВ. Кабельная линия представлена тремя силовыми кабелями (по одному кабелю на фазу), при этом судовые и подводные кабели имеют различные условия прокладки и могут выбираться отдельно. Структурная схема варианта передачи на уровне напряжения 110 кВ приведена на рис. 3, б.

а)



б)

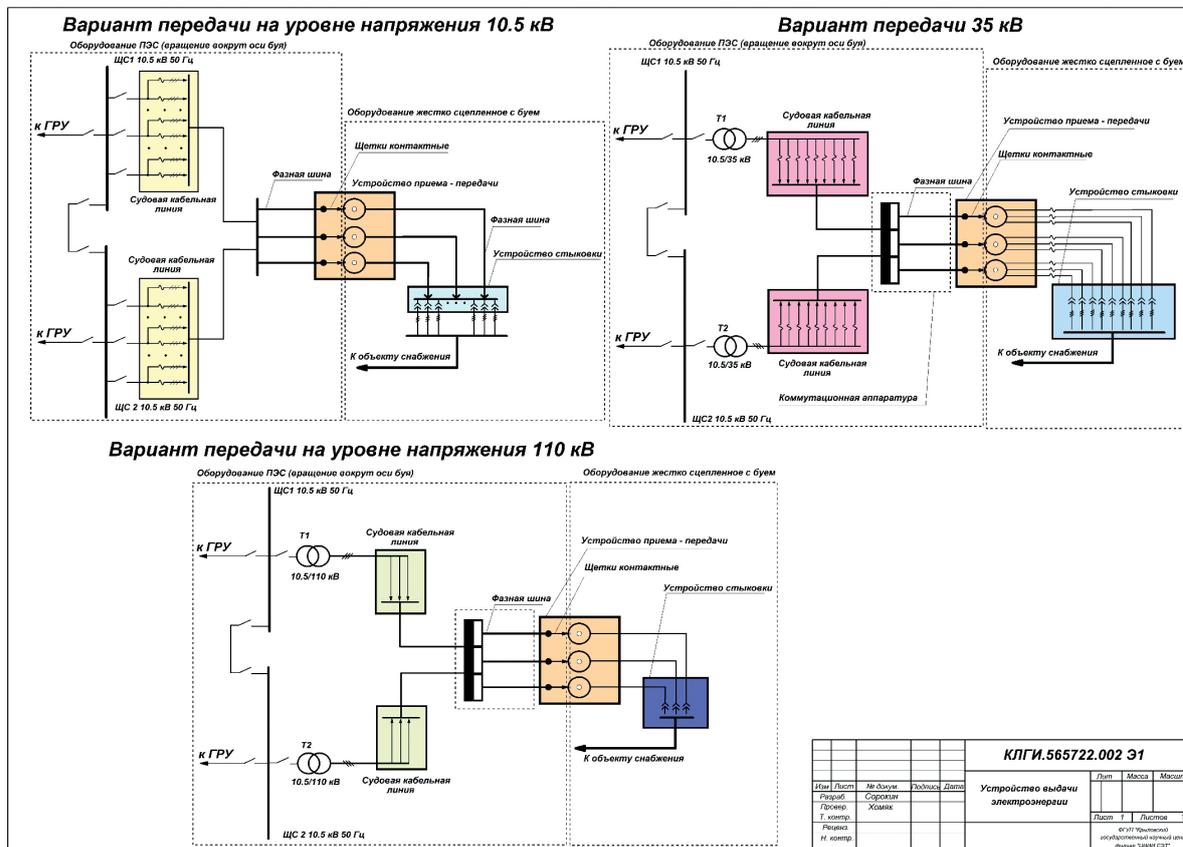


Рис. 3. Структурные схемы вариантов передачи:

а — на уровне напряжения 35 кВ; б — на уровне напряжения 110 кВ

Для сравнения представленных вариантов необходимо задаться критериями оценки. При анализе разрабатываемых систем целесообразно выбрать следующие показатели:

- надежность;
- технологичность (для узла приема-передачи);
- электрические потери в системе (потери напряжения и мощности);
- массо-габаритные показатели.

При оценке надежности необходимо воспользоваться структурными методами, рассмотренными в источнике [7], с учетом ряда допущений:

- поток отказов будем считать простейшим (пуассоновским);
- расчет без учета восстановления для короткого времени непрерывной работы;
- показатели безотказности УПП и коммутационных аппаратов не изменяются в различных вариантах, поэтому ими можно пренебречь.

УПП является основным разрабатываемым узлом сложного конструктивного исполнения. При изменении параметров напряжения передачи его габариты и масса существенно изменяются, поэтому расчет технологичности различных вариантов целесообразно осуществлять для УПП. Показателями технологичности, согласно [8], могут служить удельная материалоемкость изделия M и комплексный показатель технологичности конструкции K .

Удельная материалоемкость изделия M определяется как отношение массы изделия к основному техническому показателю системы. Для сравнения вариантов целесообразно применение в качестве основного технического параметра значения передаваемой мощности P .

Комплексный показатель технологичности K можно оценить по формуле

$$K = \sum_{i=1}^s k_i \cdot \varphi_i / \sum_{i=1}^s \varphi_i,$$

где k_i — значение i -го показателя технологичности;

φ_i — значение весового коэффициента i -го показателя технологичности.

Соответствующие показатели технологичности и таблицы весовых коэффициентов приведены в [9]. Для определения электрических потерь при различных вариантах исполнения необходимо построить математическую модель системы передачи 110 кВ в среде Matlab Simulink (рис. 4).

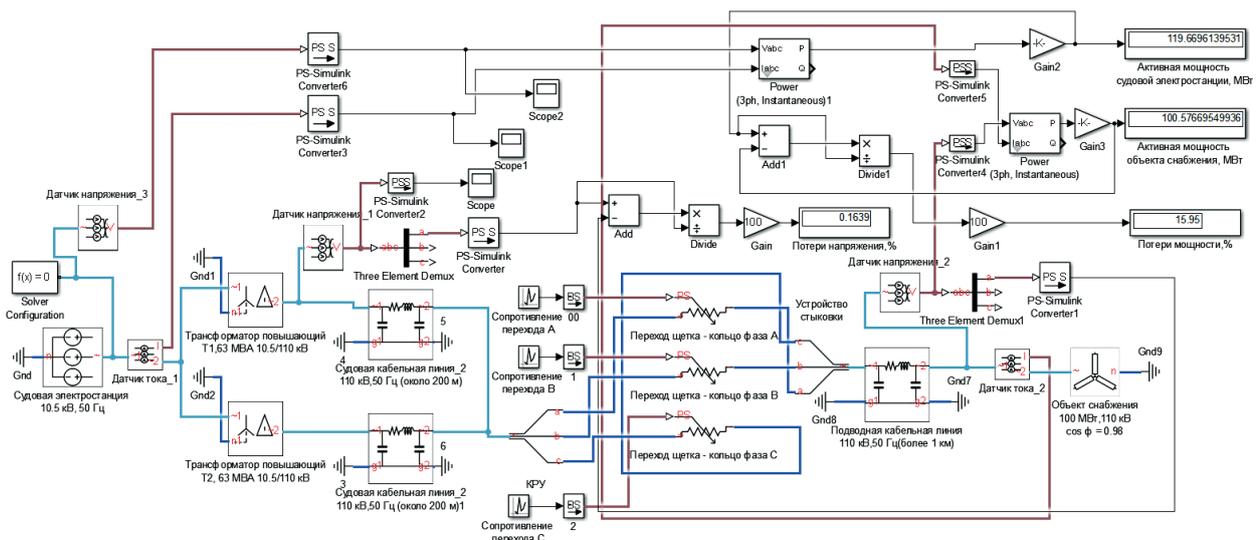


Рис. 4. Математическая модель варианта системы передачи энергии на уровне 110 кВ

Судовая электростанция представлена источником напряжения 10,5 кВ, осуществляющим питание системы через согласующие трансформаторы $T1$ и $T2$. Судовые и подводные кабельные линии выполнены в виде блока Transmission Line с соответствующим количеством кабелей

и электрическими параметрами. Переход *щетка — контактное кольцо* определен блоком резистора с переменным сопротивлением, в котором учитываются возможные принимаемые значения переходного сопротивления скользящего контакта при эксплуатации (200–2000 мкОм). В качестве объекта снабжения выступает активно-индуктивная нагрузка, соединенная по схеме звезда с заземленным нейтральным проводом.

Контроль мощности на входе-выходе системы осуществляется с помощью двух блоков измерения Power Measurment, информация с которых поступает на соответствующие дисплеи (активная мощность судовой электростанции и активная мощность объекта снабжения, МВт) и блок расчета потерь. Потери напряжения (%) определяются по датчику напряжения на входе-выходе кабельной линии и выводятся на дисплей в процентном соотношении.

Математические модели оставшихся двух вариантов (10,5 кВ и 35 кВ) имеют аналогичную структуру и блоки. Принципиальным отличием различных вариантов является состав судовых и подводных кабельных линий по количеству и типу кабелей. При определении облика УПП исходными данными будут являться различные требования и теоретические исследования [10], [11], а именно:

- допустимые изоляционные расстояния для различных уровней напряжения;
- допустимые токовые нагрузки на шинопроводы;
- габариты кабелей и шинопроводов.

Для сравнения масса-габаритных параметров требуется построение контруктивных моделей. Для этого необходимо воспользоваться средой автоматического проектирования Kompas-3D.

Результаты (Results)

В процессе расчета необходимого количества жил и сечений кабеля для всех вариантов был обеспечен дополнительный запас по перегрузкам (около 1,5 номинального тока). В связи с тем, что на изменение таких показателей, как стоимость, масса, уровень электрических потерь, оказывает влияние структура кабельной линии от ПЭС до приемника электроэнергии, необходимо рассмотреть структуру подводной кабельной линии. Состав и электрические параметры подводных кабельных линий различных вариантов приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Состав и электрические параметры
подводных кабельных линий различных вариантов**

Напряжение передачи, кВ	Тип кабеля	Индуктивность на километр, мГн	Емкость на километр, мкФ	Активное сопротивление на километр, Ом	Кол-во, шт.
110	110 кВ 1 × 500 мм ²	0,37	0,194	0,04	3
35	35(24) кВ 1 × 500 мм ²	0,321	0,5	0,04	9
10,5	6/10(12) кВ 3 × 150 мм ²	0,309	1,12	0,16	34

Для указанных в табл. 1 электрических параметров при различных расстояниях до объекта возможно определение активных потерь для различных вариантов. Результаты расчета потерь активной мощности при уровнях напряжения 10,5 кВ 35 кВ и 110 кВ приведены на рис. 5.

В программной среде «Компас 3D» разработаны модели УПП. Общие узлы и элементы устройства описаны в варианте конструкции 10,5 кВ (рис. 6). В основе конструкции находится электрический контакт между стальным кольцом 4 (сцеплен с бумом) и графитовыми щетками 3 (жестко сцеплены с судном). Для крепления щеток, расположенных на шине 1 к корпусу судна, используются горизонтальные стержневые изоляторы 2, которые необходимо установить на дополнительную изолирующую прокладку 7, а также между фазными кольцами и блоками

подшипников 8 (линейные изоляторы 6). Каждая шина 1 соответствует одной фазе трехфазной системы, соединенной с переходом *кольцо — щетка*. Отводные шины 5 закреплены на стальных контактных кольцах 4 и УС. Для других вариантов отводные шины 5 заменены кабелями за счет сниженной токовой нагрузки. Вращение вокруг оси осуществляется за счет подшипников 8, закрепленных на вращающейся конструкции судна.

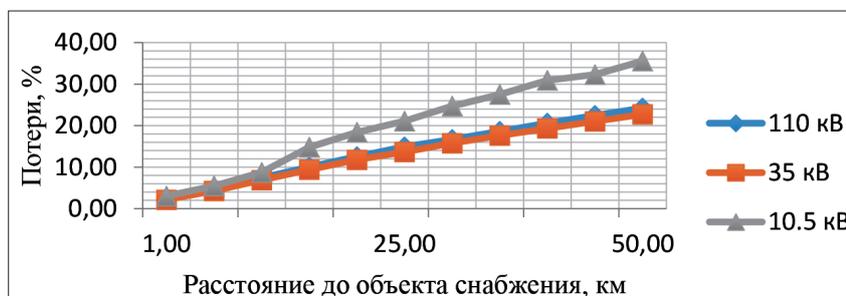


Рис. 5. Процент активных потерь мощности в системе в зависимости от расстояния

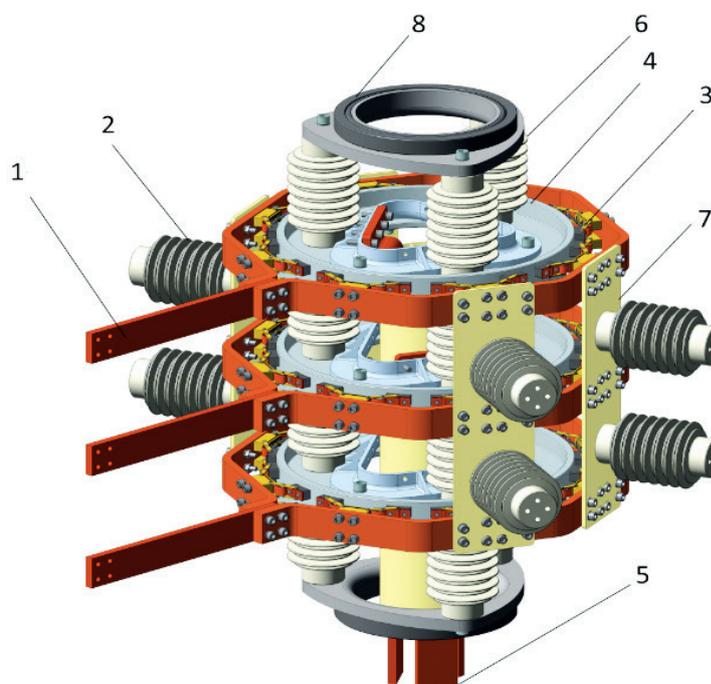


Рис. 6. Компьютерная модель УПП для варианта 10,5 кВ

Все варианты, выполненные на основе трехкольцевой структуры, имеют общие структурные единицы. Основными отличиями являются масса и габариты установок, приведенные в табл. 2.

Таблица 2

Масса и габариты УПП энергии для различных вариантов систем передачи

Уровень напряжения, кВ	Габариты Г × Ш × В, мм	Масса, кг
10,5	1560 × 1335 × 1483	731
35	1673 × 1582 × 1634	675
110	3262 × 1673 × 3795	766

Графики вероятности безотказной работы для различных вариантов системы передачи при ее непрерывной работе в течение 500 ч приведены на рис. 7.



Рис. 7. Вероятность безотказной работы при непрерывной эксплуатации в течение 500 ч для всех вариантов систем передачи

Итоговые значения параметров технологичности вариантов УПП приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Параметры технологичности УПП энергии
для различных вариантов исполнения**

Напряжение передачи	k	k_c	k_r	k_o	$k_{сб}$	K	M , кг/МВт
10,5 кВ	0,2	0,25	0,77	0,22	0	0,34	7,31
35 кВ	0,2	0,25	0,75	0,26	0	0,33	6,75
110 кВ	0,19	0,21	0,7	0,24	0	0,308	7,66

Обсуждение (Discussion)

Математическое моделирование показало, что потери напряжения для всех вариантов систем передачи не превышает 5 % при расстоянии до объекта снабжения не более 10 км. Ожидаемые потери активной мощности в системе 10,5 кВ существенно выше, чем для вариантов 35 кВ и 110 кВ. При этом основная доля потерь во всех вариантах приходится на кабельную линию. Наименьшие потери мощности в кабельной линии наблюдаются в варианте 110 кВ.

Характеристики безотказности (см. рис. 8) свидетельствуют о высокой динамике снижения вероятности безотказной работы для варианта 110 кВ. Для вариантов 35 кВ и 10,5 кВ данные показатели на участке непрерывной работы (500 ч) оказываются сопоставимыми между собой. Низкий показатель безотказности варианта 110 кВ объясняется отсутствием путей резервирования системы на уровне кабельной трассы. При выходе из строя хотя бы одного элемента кабельной линии система полностью теряет работоспособность.

Анализ технологичности вариантов УПП (см. табл. 3) показывает, что комплексные показатели технологичности конструкции различных вариантов сопоставимы. Однако наилучший удельный показатель мощности имеет вариант 35 кВ за счет наименьшей массы устройства. Габаритные размеры УПП (см. табл. 2) значительно увеличиваются для варианта 110 кВ за счет увеличения допустимых изоляционных расстояний по сравнению с вариантами 10,5 и 35 кВ, имеющими сопоставимые габариты.

Кабельная линия передачи энергии на объект снабжения для варианта 110 кВ имеет в составе три кабеля (по одному на фазу) и не обладает дополнительным резервирующим запасом по току. Для вариантов 10,5 и 35 кВ данный запас составляет около 1,5 номинального тока при работе в длительном режиме. Таким образом, целесообразность применения запаса по току обосновывается резервными путями передачи энергии для варианта 10,5 кВ (34 кабеля по одной жиле на фазу) и 35 кВ (три кабеля на фазу).

Заключение (Conclusion)

Оценка рассмотренных вариантов структуры системы передачи электроэнергии на объект выполнялась по следующим критериям: надежность, технологичность, масса, габариты и электрические потери. На основе результатов расчетов был сделан вывод о том, что наилучшее соотношение всех приведенных критериев содержит вариант передачи на уровне напряжения 35 кВ, поскольку он имеет приемлемые показатели безотказности при непрерывной работе без обслуживания, электрические потери и габариты. При наименьшей массе УПП обладает сопоставимыми показателями технологичности конструкции.

Основным недостатком вариантов 35 кВ и 110 кВ является наличие двух повышающих трансформаторов в системе с единичной мощностью 63 МВ·А. Трансформаторы для подобных мощности и уровня напряжения не применяются на судах согласно нормативным документам, в том числе из-за несоответствия требованиям Российского морского регистра судоходства. Для реализации структуры требуется разработка специальных трансформаторов с требуемыми масса-габаритными показателями и климатическим исполнением для установки в технических помещениях судна. Кроме того, возникает необходимость получения разрешения для использования высокого уровня напряжения (35 кВ) на судне.

Вариант с уровнем напряжения 10,5 кВ полностью удовлетворяет требованиям нормативных документов, имеет сходные с вариантом 35 кВ показатели технологичности, безотказности и габариты. Недостатками в данном случае являются высокие габариты подводной кабельной линии и электрические потери. В состав кабельной линии входит 34 трехжильных кабеля, что осложняет их крепление к УС и на дне. Большое количество кабелей также сказывается и на электрических потерях. С учетом компенсации на уровне объекта снабжения при удаленности его на расстоянии 20 км потери в системе составят около 20 %. Поэтому данный вариант нецелесообразно использовать в широком диапазоне расстояний до объекта.

УПП энергии на напряжение 110 кВ имеет высокие габариты, а система предусматривает установку повышающих трансформаторов (аналогично варианту 35 кВ). Данный уровень напряжения превышает допустимый для судов в девять раз, что отражается на габаритах коммутационной и распределительной аппаратуры с учетом изоляционных расстояний. Комплекс судового оборудования при этом имеет наибольшие габариты и сложность исполнения и нецелесообразен для применения на судне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Петрунин В. В.* Плавающие энергоблоки с РУ «РИТМ-200М» / В. В. Петрунин [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. — 2019. — № 1. — С. 91–96.
2. *Rizkya I.* Comparison of Crude Oil Supply Cost Between Ship Rental and Single Point Mooring / I. Rizkya, K. Syahputri, R. M. Sari, O. C. Syardhi // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — IOP Publishing, 2020. — Vol. 851. — Is. 1. — Pp. 012048. DOI: 10.1088/1757-899X/851/1/012048.
3. *Qi X.* Calm Buoy and Fluid Transfer System Study / Y. Chen, Q. Yuan, G. Xu, K. Huang // The 27th International Ocean and Polar Engineering Conference. — International Society of Offshore and Polar Engineers, 2017. — Paper Number: ISOPE-I-17-128.
4. *Volintiru O. N.* Modeling and optimization of HVAC system for special ships / O. N. Volintiru, I. C. Scurtu, T. M. Ștefănescu // Journal of Physics: Conference Series. — IOP Publishing, 2018. — Vol. 1122. — Is. 1. — Pp. 012004. DOI: 10.1088/1742-6596/1122/1/012004.
5. *Баранов А. П.* Судовые автоматизированные электроэнергетические системы / А. П. Баранов; Федеральное агентство морского и речного транспорта. Гос. Морская академия им. С. О. Макарова. — СПб.: Судостроение, 2005. — 528 с.
6. *Djagarov N.* Ship's Electrical Power System Model for Investigation of Dynamic Mode Operation / N. Djagarov [et al] // 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe). — IEEE, 2018. — Pp. 1–5. DOI: 10.1109/EEEIC.2018.8493929.

7. Папков Б. В. Вероятностные и статистические методы оценки надёжности элементов и систем электроэнергетики: теория, примеры, задачи / Б. В. Папков, В. Л. Осокин. — Старый Оскол: ТНТ, 2017. — 424 с.
8. Лапина Н. В. Оценка технологичности изделий машиностроения при замене традиционных материалов на композиты / Н. В. Лапина, Н. И. Баурова // Новые материалы и технологии в машиностроении. — 2017. — № 26. — С. 37–41.
9. Артемов И. И. Стратегия оценки технологичности конструкции изделий для высокотехнологичных наукоемких машиностроительных производств / И. И. Артемов, А. Е. Зверовщиков, С. А. Нестеров // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П. А. Соловьева. — 2017. — № 1 (40). — С. 286–290.
10. Zhao S. Study of Carbon Brush and Slip-Ring System Abrasion From Electric Contact Friction Under Special Environments / S. Zhao [et al] // IEEE Access. — 2021. — Vol. 9. — Pp. 9308–9317. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3050098.
11. Grandin M. Influence of mechanical and electrical load on a copper/copper-graphite sliding electrical contact / M. Grandin, U. Wiklund // Tribology International. — 2018. — Vol. 121. — Pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.triboint.2018.01.004.

REFERENCES

1. Petrunin, V. V., Yu. P. Fadeev, A. N. Pakhomov, K. B. Veshnyakov, V. I. Polunichev, S. V. Kabin, and A. Yu. Turusov. “Floating power units with RITM-200M RP.” *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: Fizika yadernykh reaktorov* 1 (2019): 91–96.
2. Rizkya, I., K., Syahputri, R. M. Sari, and O. C. Syardhi. “Comparison of Crude Oil Supply Cost Between Ship Rental and Single Point Mooring.” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 851. No. 1. IOP Publishing, 2020. DOI: 10.1088/1757–899X/851/1/012048.
3. Qi, Xiaoliang, Yongjun Chen, Quan Yuan, Gang Xu, and Kevin Huang. “Calm Buoy and Fluid Transfer System Study.” *The 27th International Ocean and Polar Engineering Conference*. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2017. Paper Number: ISOPE-I-17-128.
4. Volintiru, O. N., I. C. Scurtu, and T. M. Ștefănescu. “Modeling and optimization of HVAC system for special ships.” *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1122. No. 1. IOP Publishing, 2018. DOI: 10.1088/1742-6596/1122/1/012004.
5. Baranov, A. P. *Sudovye avtomatizirovannye elektroenergeticheskie sistemy*. SPb.: Sudostroenie, 2005.
6. Djagarov, Nikolay, Zhivko Grozdev, Vencislav Varbev, Gabriel Predoi, and Julia Djagarova. “Ship’s Electrical Power System Model for Investigation of Dynamic Mode Operation.” *2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)*. IEEE, 2018. DOI: 10.1109/EEEIC.2018.8493929.
7. Papkov, B. V., and V. L. Osokin. *Veroyatnostnye i statisticheskie metody otsenki nadezhnosti elementov i sistem elektroenergetiki: teoriya, primery, zadachi*. Staryi Oskol: TNT, 2017.
8. Lapina, N. V., and N. I. Baurova. “Evaluation of technology of machine-building products when replacing traditional materials on composites.” *Novye materialy i tekhnologii v mashinostroenii* 26 (2017): 37–41.
9. Artemov, I. I., A. E. Zverovschikov, and S. A. Nesterov. “Estimation of technological effectiveness strategy at design of workpieces for hi-tech, science intensive technology engineering manufactures.” *Vestnik of P. A. Solov'yov Rybinsk State Aviation Technical University* 1(40) (2017): 286–290.
10. Zhao, Shuai, Hongzhong Ma, Mengyao Jiang, Chengying Li, Yidan Liu, Xuehua Zhao, and Xuan Chen. “Study of Carbon Brush and Slip-Ring System Abrasion From Electric Contact Friction Under Special Environments.” *IEEE Access* 9 (2021): 9308–9317. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3050098.
11. Grandin, Martina, and Urban Wiklund. “Influence of mechanical and electrical load on a copper/copper-graphite sliding electrical contact.” *Tribology International* 121 (2018): 1–9. DOI: 10.1016/j.triboint.2018.01.004.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сорокин Илья Владимирович — инженер ФГУП «Крыловский государственный научный центр» 196158, Российская Федерация, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44
e-mail: idefo@list.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sorokin, Ilya V. — Engineer
Krylov State Research Center
44 Moscow highway, St. Petersburg, 196158,
Russian Federation
e-mail: idefo@list.ru

Семенов Дмитрий Сергеевич — аспирант

Научный руководитель:

Самосейко Вениамин Францевич —

доктор технических наук, профессор

ФГУП «Крыловский государственный
научный центр»

196158, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Московское шоссе, 44

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7

e-mail: semenov.d.serg@yandex.ru,

kaf_electroprivod@gumrf.ru

Шарашкин Сергей Владимирович —

кандидат технических наук

ФГУП «Крыловский государственный
научный центр»

196158, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Московское шоссе, 44

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7

e-mail: s_sharashkin@mail.ru,

kaf_electroprivod@gumrf.ru

Semenov, Dmitrii S. — Postgraduate
Supervisor:

Samoseiko, Veniamin F. —

Dr. of Technical Sciences, professor

Krylov State Research Center

44 Moscow highway,

St. Petersburg, 196158,

Russian Federation

Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping

5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,

Russian Federation

e-mail: semenov.d.serg@yandex.ru,

kaf_electroprivod@gumrf.ru

Sharashkin, Sergei V. —

PhD

Krylov State

Research Center

44 Moscow highway, St. Petersburg, 196158,

Russian Federation

Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping

5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,

Russian Federation

e-mail: s_sharashkin@mail.ru,

kaf_electroprivod@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 24 февраля 2021 г.

Received: February 24, 2021.