

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ОСНОВНОЙ СЕТИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ НА БОРТУ БОЛЬШИХ КОРАБЛЕЙ

*А. В. Меликов*

*Волгоградский государственный аграрный университет,  
Волгоград, Российская Федерация*

Представлены схемы радиальной системы распределения электроэнергии основной сети электростанций на борту больших кораблей. Отмечено, что в настоящих условиях, при значительной величине мощности установок, предпочтительно использование четырёхпроводной трёхфазной системы, которая имеет распределённую нейтраль и не связана с землёй, с возможностью лёгкой утилизации линейного напряжения. Основные распределительные сети среднего напряжения могут быть простого радиального типа с подстанциями или дополнительными распределительными щитами. К преимуществам простой радиальной схемы крупного судна отнесены возможности обеспечения селективной защиты, применение цифровой автоматики; к недостаткам – внушительное количество защитной и коммутационной аппаратуры, большая стоимость, значительные потери электроэнергии, длина линий, угроза надёжности судна вследствие неисправности главного распределительного щита. Более подходящей для реализации электростанций средней мощности на крупных судах представлена составная радиальная схема, в которой значительно сокращается число цепей, полученных от главного распределительного щита и устройств в нём. Произведён расчёт при установившемся режиме радиальной сети, определены сечения и провода линий электропередачи. Вычислены потери мощности в трансформаторах, мощность, подходящая к шинам подстанции. Перед выбором проводов рекомендовано рассчитать ток, протекающий по линии. Рассмотрено энергоснабжение судна с мостовой кольцевой схемой. В случае неисправности будет доступна только часть генераторов и половина установленной энергии. Приведено условное разделение энергосистем с мостовой кольцевой схемой на борту на три основные части. Представлена схема высоковольтной системы подачи электроэнергии с берега. Одним из основных преимуществ этой технологии названы экологические характеристики электричества, вырабатываемого электростанциями на берегу, по сравнению с дизельными двигателями судна, работающего на котельном топливе. Данная технология приводит к снижению уровня загрязняющих выбросов и улучшает качество воздуха в портовых зонах.

**Ключевые слова:** распределение электроэнергии, основная сеть энергосистемы, электропитание, аварийное освещение, подстанция.

**Для цитирования:** Меликов А. В. Распределение электроэнергии в основной сети энергосистемы на борту больших кораблей // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2019. № 2. С. 110–117. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-2-110-117.

### Введение

Бортовая электрическая сеть характеризуется совокупностью средств, обеспечивающих соединение источников и потребителей электрической энергии [1]. Не вдаваясь в детали механизмов управления распределением электроэнергии, в работе описаны схемы основной сети электростанций на борту больших кораблей, позволяющие понять её структуру и сложность.

В большинстве случаев распределительная сеть среднего напряжения состоит из трёхфазной системы с тремя проводниками без нейтрали. Такая система обычно управляется с нейтральной точкой звезды, изолированной от земли или соединённой с землёй через сопротивление или катушку, что позволяет уменьшить значения токов утечки и токов короткого замыкания. Преимуществами такого соединения являются уменьшение расхода меди и упрощение монтажа проводки.

Первая неисправность с потерей изоляции не представляет опасности и позволяет поддерживать систему в эксплуатации без вмешательства защиты. Безусловно, что неисправности на борту корабля должны сопровождаться сигнализацией устройств их обнаружения, и стан-

дартные условия эксплуатации должны быть немедленно восстановлены. В противном случае, неисправность может превратиться в двойное короткое замыкание, что чрезвычайно опасно в системах информационных технологий.

Когда бортовые установки были не широкими и мощности были довольно малыми, вторичная распределительная сеть состояла из одной фазы с двумя изолированными проводниками или тремя проводниками со средней точкой трансформатора, соединённой с землёй. В настоящее время – поскольку соответствующие мощности заметно увеличились – предпочтительно использовать четырёхпроводную трёхфазную систему, которая имеет распределённую нейтраль и в большинстве случаев не связана с землёй, с возможностью лёгкой утилизации линейного напряжения.

Как правило, вторичная сеть радиально распределена с возможностью двойного питания распределительного щита по двум разным линиям, реализуя таким образом резервное соединение с нагрузкой. Выбор того или иного типа зависит от условий установки и осуществляется с помощью выключателей (либо выключателей с блокировкой). В любом случае распределительная система является радиальной, аппаратные средства – стандартными: проводники, кабели, изоляторы, разрядники, регуляторы и трансформаторы. Подробнее предлагается остановиться:

- на схемах радиальной системы распределения электроэнергии;
- энергоснабжении с мостовой кольцевой схемой;
- схеме высоковольтной системы подачи электроэнергии с берега.

### Схемы радиальной системы распределения электроэнергии

Основные распределительные сети среднего напряжения имеют различную структуру в зависимости от типа судна и установленной мощности. Они могут быть простого радиального типа с подстанциями или дополнительными распределительными щитами.

Простая радиальная схема большого корабля (рис. 1) включает в себя главный распределительный щит с одной шиной, с которого запускаются выходные фидеры для всех потребителей электроэнергии низкого напряжения [2].

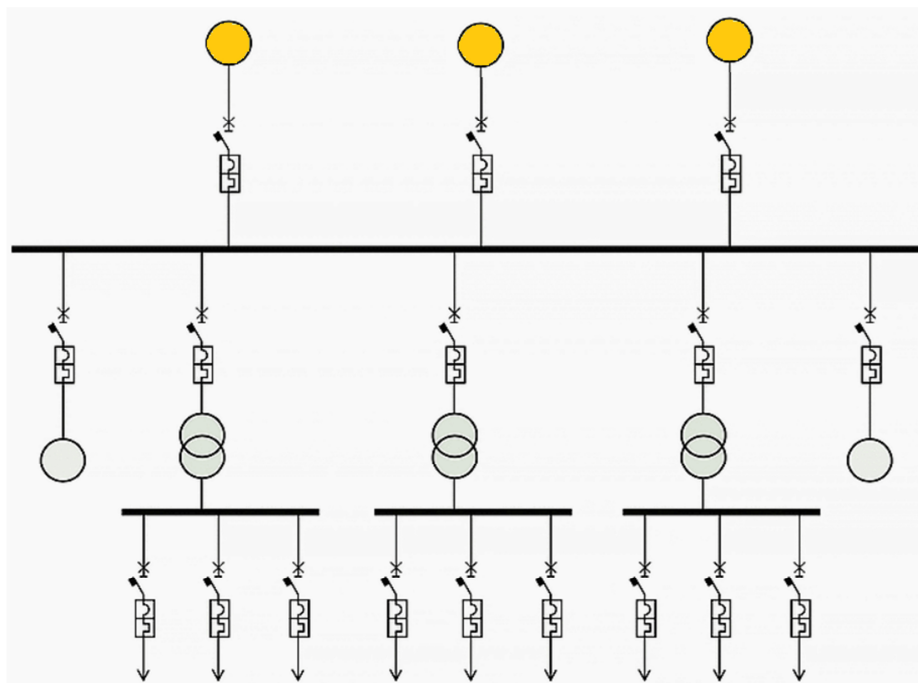


Рис. 1. Принципиальная схема для радиального распределения (простая радиальная схема)

Преимуществами схемы являются возможности обеспечения селективной защиты, применения цифровой автоматики. Главным недостатком такой системы распределения электроэнергии заключается в том, что неисправность главного распределительного щита может поставить

под угрозу надёжность судна. Среди прочих недостатков выделяются длина линий, большое количество защитной и коммутационной аппаратуры, внушительная стоимость, значительные потери электроэнергии.

Составная радиальная схема (рис. 2) является более подходящей для реализации электростанций средней мощности на больших кораблях и содержит главный распределительный щит с одной или несколькими основными шинами и вспомогательными щитами, которые обеспечивают исключительно подачу питания от основной шины.

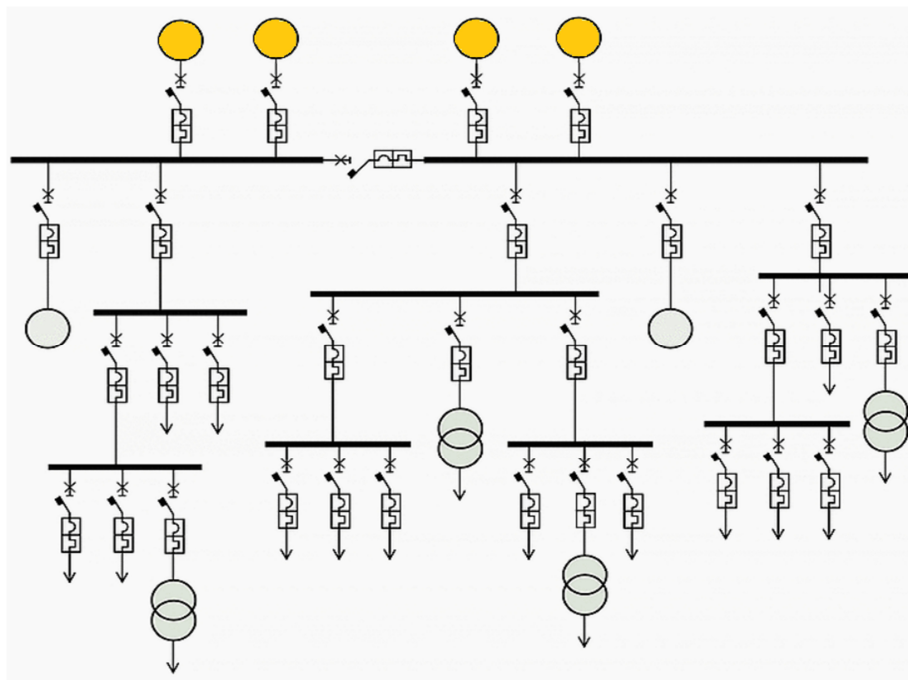


Рис. 2. Принципиальная схема для радиального распределения (составная радиальная схема)

В такой системе значительно сокращается число цепей, полученных от главного распределительного щита, и, следовательно, устройств, установленных в нём. Поэтому важным представляется правильное определение размера цепи автоматических выключателей, на срабатывание которых влияет неисправность. При ответном действии на отказ электропитание не прерывается, оно гарантированно подаётся для других нагрузок и вспомогательных распределительных щитов.

В результате расчёта при установившемся режиме радиальной сети определяются сечения и марки проводов линий электропередачи [3].

Естественно, в ходе выполнения заданных функций при работе сети наблюдаются потери мощности в трансформаторах, влияющие на исходную величину электричества, которую выдаёт на выходе прибор. Потери в трансформаторах, МВА, вычисляются по формуле

$$S_{ТЗ} = \frac{P_{ТЗ}^2 + Q_{ТЗ}^2}{U_{Н}^2} \left( \frac{R_{ТЗ}}{2} + j \frac{X_{ТЗ}}{2} \right) = \frac{15^2 + 5,85^2}{115^2} \left( \frac{4,38}{2} + j \frac{86,7}{2} \right) = 0,043 + j0,85, \quad (1)$$

где  $P_{ТЗ}$  – активная мощность, потребляемая трансформатором, Вт;  $Q_{ТЗ}$  – реактивная мощность, ВАр;  $U_{Н}$  – номинальное напряжение, В;  $R_{ТЗ}$  – активное сопротивление, Ом;  $X_{ТЗ}$  – реактивное сопротивление, Ом;  $j$  – мнимая единица.

Мощность на шинах трансформатора  $S_{ТЗ}''$  равна мощности нагрузки  $S_{НЗ}$ . Мощность на шинах трансформатора  $S_{ТЗ}'$  равна сумме мощности  $S_{ТЗ}''$  и потерь в трансформаторах (1).

Мощность, подходящая к шинам подстанции (с учётом потерь трансформатора), МВА, равна

$$|S_{ТЗ}| = \sqrt{15,08^2 + 6,92^2} = 16,6.$$

Выбор проводов линии осуществляется после определения тока, протекающего по ним. Ток, протекающий по линии, А, рассчитывается по формуле

$$I_{ЛЗ} = \frac{|S_{ТЗ}| \cdot 10^3}{nU_{НЛ}\sqrt{3}} = \frac{16,6 + 1000}{2 \cdot 110 \cdot \sqrt{3}} = 43,55. \quad (2)$$

Сечение линии  $F$ , мм<sup>2</sup>, находится как отношение тока, протекающего по ней (2), к нормированному значению экономической плотности тока  $j_{эк}$ , равному 0,9 (для алюминиевых изолированных проводов [4]):

$$F = \frac{I_{ЛЗ}}{j_{эк}} = \frac{43,55}{0,9} = 48,4.$$

Однако по условию «короны» для  $U_{НЛ} = 110$  кВ сечение линии должно быть более 70 мм<sup>2</sup>. Тогда выбирается провод марки АС-70/11 по [5].

На рис. 3 представлена схема замещения линии и трансформатора подстанции.

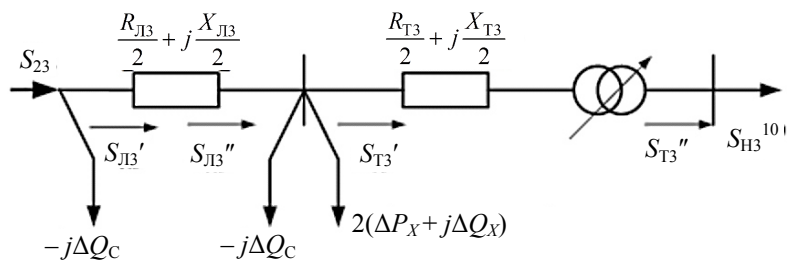


Рис. 3. Схема замещения линии и трансформатора подстанции

### Энергоснабжение с мостовой кольцевой схемой

Для обеспечения бесперебойного электроснабжения радиальная система часто имеет резервное кольцо (рис. 4), предназначенное для питания подстанций, у которых прервана основная линия (или группы подстанций в случае серьёзной неисправности на полупроводниковой шине главного распределительного щита, снабжающего их) [6].

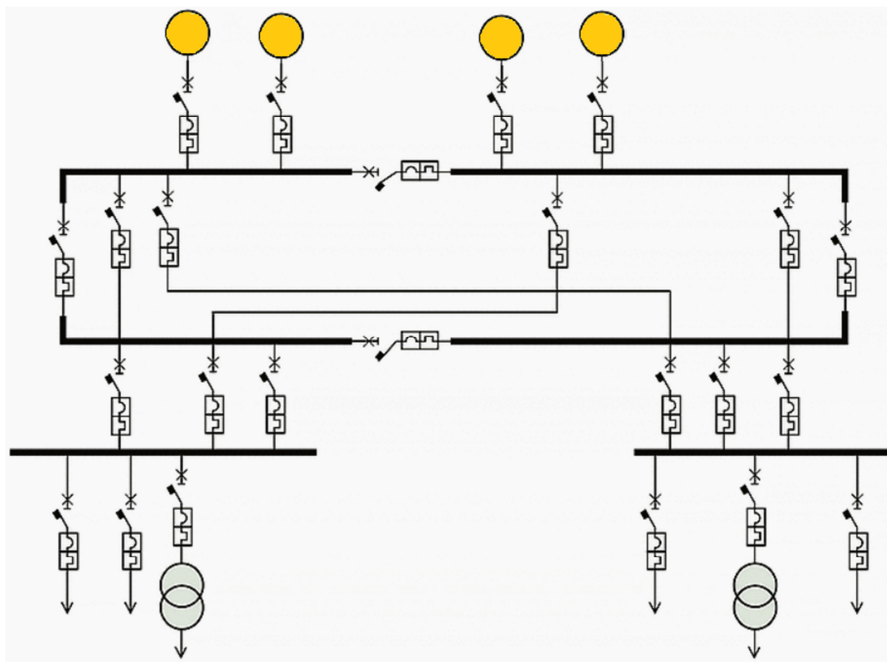


Рис. 4. Принципиальная схема для кольцевого распределения

В случае серьёзной неисправности будет доступна только половина генераторов и, следовательно, половина установленной энергии. Кольцо должно быть рассчитано таким образом, чтобы обеспечить потребности корабля, предусмотренные для работы.

Энергосистему с мостовой кольцевой схемой на борту условно делят на три основные части:

- 1) основную установку, состоящую из устройств, предназначенных для выполнения приоритетных функций на борту (каждая из которых характерна для типологии судна);
- 2) вспомогательные цепи, включающие в себя системы производства и распределения энергии для освещения и вспомогательной движущей силы;
- 3) специальные установки, для которых разработана конкретная технология (телефонные установки, электронные устройства различного назначения, интегрированные навигационные системы, устройства пожарной сигнализации и др.).

В принципиальной схеме для кольцевого распределения усматривается ещё одно отличие, касающееся разницы между существенными и несущественными нагрузками, влияющими на систему распределения, которая их снабжает. Первыми являются те нагрузки, для которых снабжение и надлежащая эксплуатация должны быть гарантированы (в том числе в аварийных условиях), поскольку они выполняют функции, необходимые для безопасности судна. Среди них, прежде всего, выделяют двигательные установки и системы их управления, рули и стабилизаторы, системы предупреждения и сигнализации, системы связи и вспомогательные системы для навигации, а также аварийного освещения. Кроме перечисленного, следует учитывать устройства, которые способствуют созданию лучшего комфорта или лучшей безопасности для жизни пассажиров на борту судна, например системы кондиционирования и аспирации воды.

Электрическая система, в соответствии с правилами Военно-морских реестров [7], обеспечивает также аварийную электрическую станцию, расположенную в другом месте на борту корабля (обычно на одной из высоких палуб и, по меньшей мере, над ватерлинией). Электростанция состоит из автономной дизель-генераторной установки низкого напряжения (440 или 690 В) порядка нескольких МВт.

Двигатель должен запускаться даже тогда, когда основная сеть не может доставить энергию. В этом случае запуск двигателя осуществляется посредством подключения к источнику бесперебойного электропитания, обеспечивающему при кратковременном отключении основного источника мощность питания, а также защиту от помех в этой сети [8]. В случае неисправности главной станции последовательность автоматического управления обеспечивает переключение на аварийный коммутатор, на который подаётся питание той части станции, к которой подключены приоритетные нагрузки (например, аварийное освещение, насосы, рулевые устройства и вспомогательное оборудование, необходимые для систем машин, сетей связи и сигнализации и других цепей – всё то, что должно работать и в аварийном случае). Набор конденсаторов гарантирует доступность энергии также во время запуска аварийного генератора. При стандартных условиях эксплуатации (другими словами, при наличии напряжения в сети) выпрямитель должен поставлять конденсаторным батареям энергию, необходимую для поддержания максимального заряда.

### Схема высоковольтной системы подачи электроэнергии с берега

Судам, приходящим в гавань, следует выключать дизельные двигатели в связи с экологическими ограничениями. Во избежание перерывов при выработке электроэнергии корабли должны подключиться к береговой сети (рис. 5) [9].

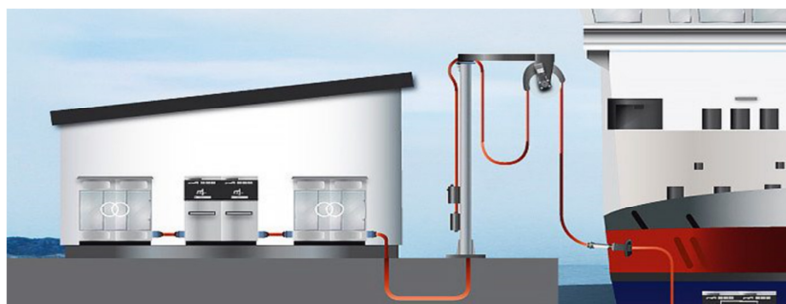


Рис. 5. Схема высоковольтной системы подачи электроэнергии с берега

Экологические характеристики электричества, вырабатываемого электростанциями на берегу, в сравнении с дизельными двигателями судна, работающего на котельном топливе, являются одним из основных преимуществ этой технологии. Соединение судна с высоковольтным берегом пользуется популярностью у портовых управляющих по всему миру. Эта технология снижает уровень загрязняющих выбросов судов у причала, улучшая качество воздуха в портовых зонах.

Осуществляя подачу электроэнергии непосредственно от причала к судну, технология призвана обеспечить работу систем машин и установок на борту (холодильников, освещения, отопления и кондиционирования воздуха) при выключенном состоянии двигательных установок. Такая необходимая для бортового электропитания параллельная операция не вызывает проблем с качеством электроэнергии для наземной распределительной сети.

Для каждой береговой точки подсоединения к электросети порт или терминал должен предоставить выделенный трансформатор, служащий для двух целей:

– во-первых, он обеспечивает требуемую гальваническую развязку (неметаллическое прямое соединение между электросетью на суше и внутренней системой судна) таким образом, чтобы замыкание на землю электросети судна не представляло опасности для портовой сети и наоборот;

– во-вторых, трансформатор уменьшает напряжение тока с оптимизированного для распределения уровня до одного или двух уровней напряжения, принятых в качестве стандарта для соединения между берегом и судном (зависит от типа судна).

Чтобы дать представление о воздействии на окружающую среду, отметим, что большой линейный крейсер на причале в течение 10 ч при использовании наземного источника питания избегает сжигания до 20 метрических т топлива, что эквивалентно 60 метрическим т углекислого газа, не выбрасываемого в атмосферу (годовой выброс двадцати пяти автомобилей).

### Заключение

Электроэнергия на больших кораблях распределяется при следующих величинах напряжения:

- 440 В трёхфазного тока для силовых потребителей;
- 230 В трёх- и однофазного тока для основного и аварийного освещения, сигнально-отличительных огней, камбузного и бытового оборудования, нагревательных и отопительных электроприборов, средств радиосвязи и навигации;
- 24 В постоянного тока для систем управления и сигнализации через выпрямительное устройство и от аккумуляторных батарей;
- для питания потребителей электроэнергией, отличной от основной по напряжению, частоте и роду тока (переменный ток частотой 60 Гц), установлены соответствующие трансформаторы, преобразователи и аккумуляторные батареи.

Приведённые выше принципиальные схемы основной сети электростанций облегчают понимание сложной структуры распределения электроэнергии на борту больших кораблей.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Беляков А. Л., Гладких А. В.* Техника для спецслужб // Бюро науч.-техн. информации. URL: <http://www.bnti.ru/> (дата обращения: 22.12.2018).
2. *Двоскин Л. И.* Схемы и конструкции распределительных устройств. М.: Энергоатомиздат, 1985. 240 с.
3. *Колесников А. А., Веселов Г. Е., Кузьменко А. А.* Новые технологии проектирования систем управления процессами генерирования электроэнергии. М.: Изд-во МЭИ, 2016. 280 с.
4. *Правила устройства электроустановок. Изд. 7.* URL: <http://pue7.ru/pue7/punkt.php?n=1.3.25&k=1.3.32> (дата обращения: 22.12.2018).
5. *Выбор сечения проводов и кабелей для электропроводки по току и мощности с помощью таблиц.* URL: <http://elektrik24.net/provodka/provoda-i-kabeli/raschet-secheniya/vybor.html> (дата обращения: 05.01.2019).
6. *Красник В. В.* Эксплуатация электрических подстанций и распределительных устройств. М.: ЭНАС, 2011. 43 с.
7. *Правила Военно-морских реестров.* URL: <http://base.garant.ru/71801528/> (дата обращения: 06.01.2019).
8. *ГОСТ МЭК 62040-3-2009.* Системы гарантированного электроснабжения. Агрегаты бесперебойного питания. Ч. 3. URL: <http://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293740/4293740714.htm> (дата обращения: 06.01.2019).
9. *Edvard A.* Sizing a MV generator circuit breaker (GCB) in terms of breaking capacity. URL: <https://electrical-engineering-portal.com/> (дата обращения: 14.01.2019).

Статья поступила в редакцию 18.01.2019

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Меликов Алексей Владимирович** – Россия, 400002, Волгоград; Волгоградский государственный аграрный университет; канд. техн. наук; доцент кафедры энергетических систем и электростанций; AleksejV.Melikov@gmail.com.

ELECTRIC POWER DISTRIBUTION IN BULK SYSTEM  
ON BOARD BIG VESSELS

*A. V. Melikov*

*Volgograd State Agrarian University, Volgograd, Russian Federation*

**Abstract.** The article describes the schemes of the radial power distribution system of the bulk system on board big ships. Today, when the ship power plants have great capacity, it is found preferable to use a four-wire three-phase system that has a distributed neutral and is not connected to the ground, in which the linear voltage can be easily utilized. The main distribution network of medium voltage can be of a simple radial type with substations or additional distribution switchboards. The advantages of a simple radial scheme on board a large vessel include providing selective protection and using digital automation. The weak points are the impressive amount of protective and switching appliances, high cost, significant power losses, length of wires, and threat to the reliability of the vessel due to the main switchboard failure. A There is presented a multi-part radial chart, in which the number of circuits going from the main switchboard and devices in it is significantly reduced. This chart is considered more suitable for medium-size power plants on large vessels. The calculation was carried out at a steady state of the radial network, the sections and wires of power lines were determined. Power losses in transformers and power supplied to substation bus-lines have been calculated. Before selecting the wires it was recommended to calculate the current flowing through the circuit. The ship power supply with a bridge ring scheme has been considered. In the event of a failure, only a part of the generators and a half of energy will be available. There has been given a conditional division of the power systems with a bridge ring circuit on board into three main parts. A diagram of the high-voltage power supply from the shore is shown. One of the main advantages of this technology is environmentally friendly nature of electricity produced by power plants on the coast, compared to the ship diesel engines running on burner fuel. This technology reduces pollution and improves air quality in port areas.

**Key words:** distribution of electricity, bulk system, power supply, emergency lighting, substation.

**For citation:** Melikov A. V. Distribution of electricity in bulk system on board big vessels. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies.* 2019;2:110-117. (In Russ.) DOI: 10.24143/2073-1574-2019-2-110-117.

## REFERENCES

1. Beliakov A. L., Gladkikh A. V. Tekhnika dlia spetssluzhnb [Techniques for intelligent agencies]. *Biuro nauchno-tekhnicheskoi informatsii*. Available at: <http://www.bnti.ru/> (accessed: 22.12.2018).
2. Dvoskin L. I. *Skhemy i konstruktsii raspreditel'nykh ustroystv* [Diagrams and constructions of power distribution devices]. Moscow, Energoatomizdat, 1985. 240 p.
3. Kolesnikov A. A., Veselov G. E., Kuz'menko A. A. *Novye tekhnologii proektirovaniia sistem upravleniia protsessami generirovaniia elektroenergii* [New technologies of designing control systems of power generation processes]. Moscow, Izd-vo MEI, 2016. 280 p.
4. *Pravila ustroystva elektroustanovok. Izdanie 7* [Instructions on arranging power plants. Edition 7]. Available at: <http://pue7.ru/pue7/punkt.php?n=1.3.25&k=1.3.32> (accessed: 22.12.2018).
5. *Vybor secheniia provodov i kabelei dlia elektroprovodki po toku i moshchnosti s pomoshch'iu tablits* [Choosing wire and cable sections for wiring using tables of current and power rating]. Available at: <http://elektrik24.net/provodka/provoda-i-kabelei/raschet-secheniya/vybor.html> (accessed: 05.01.2019).
6. Krasnik V. V. *Ekspluatatsiia elektricheskikh podstantsii i raspreditel'nykh ustroystv* [Operation of electric substations and distribution devices]. Moscow, ENAS Publ., 2011. 43 p.

7. *Pravila Voенno-morskikh reestrov* [Rules of Naval Rosters]. Available at: <http://base.garant.ru/71801528/> (accessed: 06.01.2019).

8. *GOST MEK 62040-3-2009. Sistemy garantirovannogo elektrosnabzheniia. Agregaty bespereboinogo pitaniia* [GOST IEC 62040-3-2009. Systems of guaranteed power supply. Aggregates of regular supply]. Part 3. Available at: <http://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293740/4293740714.htm> (accessed: 06.01.2019).

9. Edvard A. *Sizing a MV generator circuit breaker (GCB) in terms of breaking capacity*. Available at: <https://electrical-engineering-portal.com/> (accessed: 14.01.2019).

The article submitted to the editors 18.01.2019

### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Melikov Aleksei Vladimirovich** – Russia, 400002, Volgograd; Volgograd State Agrarian University; Candidate of Technical Sciences; Assistant Professor of the Department of Power Grids and Power Stations; [AleksejV.Melikov@gmail.com](mailto:AleksejV.Melikov@gmail.com).

