

Список литературы

1. Вибе И. И. Новое о рабочем цикле двигателей / И. И. Вибе. — М.; Свердловск: Машгиз, 1962. — 272 с.
2. Дьяченко Н. Х. Теория двигателей внутреннего сгорания / Н. Х. Дьяченко, А. К. Костин, Г. П. Пугачев — Л.: Машиностроение, 1974. — 552 с.
3. Кулешов А. С. Математическое моделирование и компьютерная оптимизация топливоподачи и рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания / А. С. Кулешов, Л. В. Грехов. — М.: МГТУ, 2000. — 64 с.
4. Лазарев Е. А. Определение параметров процесса сгорания топлива по результатам анализа индикаторной диаграммы давления газов в цилиндре дизеля / Е. А. Лазарев, В. Е. Лазарев // Актуальные проблемы теории и практики современного двигателестроения: сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. — Челябинск, 2006.
5. Лазарев Е. А. Совершенствование моделирования закономерностей выгорания топлива в дизеле / Е. А. Лазарев // Двигателестроение. — 1985. — № 12.
6. Разлейцев Н. Ф. Моделирование и оптимизации процесса сгорания в дизелях / Н. Ф. Разлейцев. — Харьков: Высш. шк.: Изд-во при Харьков. ун-те, 1980. — 169 с.
7. Tabulated Chemical Kinetics for Efficient and Detailed Simulations of Diesel Engine Combustion PROEFSCHRIFT / С. Bekdemir. — Amsterdam: Technische Universiteit Eindhoven, 2012. — 113 p.
8. Woschi G. Eine Methode zur Vorausberechnung der Anderung des Brennverlaufes mittel schnelllaufender Diesel motor Betriebsbedingungen / G. Woschi, F. Anisits // MTZ. — 1973. — № 34.

УДК 621.311:629.12

С. Е. Кузнецов,
д-р техн. наук, профессор,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова;

О. О. Башкирев,
аспирант,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова

НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ СУДНА “PRINS DER NEDERLANDEN” С ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ

RELIABILITY OF ELECTRIC POWER SUPPLY IN DIFFERENT OPERATION MODES OF THE VESSEL “PRINS DER NEDERLANDEN” WITH HIGH-VOLTAGE ELECTRIC POWER INSTALLATION

В статье рассматриваются вопросы анализа показателей безотказности электроснабжения в характерных режимах работы судна с высоковольтной СЭЭС (6,6 кВ) применительно к электроснабжению АРЦ, рассматриваются два возможных вида нарушения электроснабжения: обесточивание при отказе и невозможность питания за установленное время при отказе. На основе справочных данных по интенсивностям отказов элементов судовой электростанции выполняется расчет вероятности безотказной работы P (1000 ч), интенсивности отказов (λ) и средней наработки на отказ T методом гипотез о возможных состояниях цепей электроснабжения АРЦ. Производится сравнительный анализ показателей надежности в рассматриваемых режимах.

In the article questions of power supply failure rate analysis in typical operational modes of the vessel with high voltage electrical power installation (6,6 kV) in respect to emergency switchboard power supply are contemplated, two power supply disturbances are considered: blackout after failure and absence of power supply restore after failure. According to reference data – failure rate of components of electrical power installation calculation of failure-free operation probability P (1000 h), failure rate (λ) and mean operating time to failure is performed using hypothesis method of potential conditions of power supply circuits of emergency switchboard. Comparative analysis of reliability rates in concerned operational modes is performed.

Ключевые слова: надежность, безотказность, отказ, метод гипотез, электроснабжение, вероятность безотказной работы, интенсивность отказов, средняя наработка на отказ.

Key words: reliability, failure-free operation, failure, hypothesis method, electric power supply, reliability function, failure rate, mean operating time to failure.

ОЦЕНКА показателей безотказности электроснабжения выполняется применительно к самоотвозящему судну “Prins der Nederlanden”, предназначенному для дноуглубительных работ на глубине до 50 м (до 80 м при удлиненной грунтовой трубе), работ по очистке (например, акватории порта), подготовительных работ для дальнейшей прокладки трубопроводов, выдачи грунтового материала на берег, выполнения насыпей и других видов грунтовых работ.

Структурная схема судовой высоковольтной электроэнергетической системы (СЭЭС) приведена на рис. 1. Основными элементами СЭЭС судна являются два высоковольтных главных генератора G1, G2 типа AMG1250UT10LSE фирмы “ABB” мощностью $P = 9000$ кВА каждый, напряжением $U = 6600$ В, бесщеточного типа, вспомогательный дизель-генератор G3(ВДГ) типа AMG560L6 фирмы “ABB”, $P = 1925$ кВА, $U = 400$ В, бесщеточного типа и аварийный дизель-генератор G4 (АДГ) типа AMG400S4 фирмы “ABB”, $P = 557$ кВА, $U = 400$ В, бесщеточного типа.

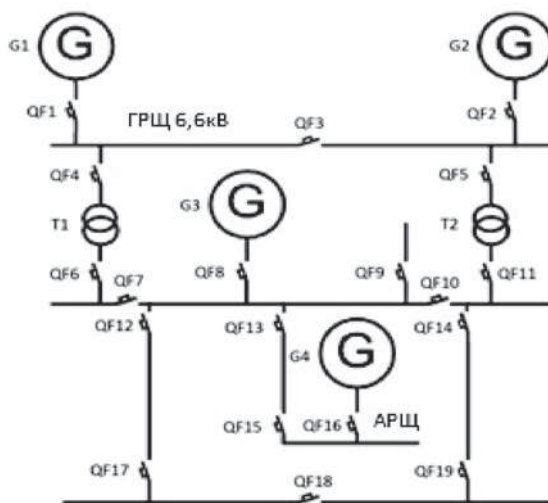


Рис. 1. Структурная схема САЭЭС:

ГРЩ — главный электrorаспределительный щит 6,6 кВ;

АПЩ — аварийный электrorаспределительный щит;

T1, T2 — трансформаторы 6,6/0,4 кВ;

QF1÷QF5 — высоковольтные автоматические выключатели;

QF6÷QF19 — автоматические выключатели

Основными режимами работы судна и соответствующими режимами работы СЭЭС являются:

1) режим выполнения грунтовых работ, используется при выполнении грунтовых работ на глубине до 50 м и при выполнении насыпи (работают два главных генератора, но каждый генератор способен обеспечить электроэнергией (ЭЭ) все приемники ЭЭ);

2) стояночный режим, используется при стоянке, бункеровке, выполнении ремонтных работ (работает ВДГ);

3) режим обеспечения максимальной мощности, используется при выполнении грунтовых работ на глубине 80 м, при разгрузке через шаровое соединение на берег (работают два главных генератора и ВДГ);

4) ходовой режим, используется при переходе судна от места выполнения грунтовых работ до места разгрузки (работает один главный генератор). Если время перехода не превышает 30 мин, то, как правило, используется режим выполнения грунтовых работ;

5) маневренный режим, используется при заходе в порт и выходе из порта, при проходе каналов и пребывании в сложных навигационных условиях (работают один главный генератор и ВДГ, каждый может обеспечить ЭЭ все приемники ЭЭ в данном режиме);

6) аварийный режим судна, используется в аварийных ситуациях судна (пожар, пробоина; работают один главный генератор и ВДГ, каждый может обеспечить ЭЭ все приемники ЭЭ в данном режиме); а также аварийный режим СЭЭС, используется при обесточивании основной электростанции (работает АДГ).

Для этих основных режимов работы судна произведен расчет следующих показателей надежности: вероятности безотказной работы P , интенсивности отказов λ и средней наработки на отказ T . При этом рассматриваются два вида нарушения электроснабжения: 1) обесточивание при отказе; 2) невозможность питания за установленное время при отказе. В первом случае отказом считается любое обесточивание аварийного распределительного щита, во втором — обесточивание АРЩ на время более 45 с.

Расчет выполняется применительно к электроснабжению АРЩ, так как от АРЩ получают питание наиболее ответственные приемники электроэнергии. Расчет выполнен для всех основных режимов работы судна за период, равный 1000 ч работы в период нормальной эксплуатации (установившийся режим эксплуатации, когда происходят внезапные отказы, носящие случайный характер).

В расчетах, целью которых является сравнительный анализ надежности электроснабжения в различных режимах работы судна (СЭЭС), использованы справочные среднестатистические данные по интенсивностям отказов элементов судовой электростанции [1, с. 93; 2, с. 71–72]:

- главный двигатель и главный генератор переменного тока — $\lambda_{ГГ} = 50 \cdot 10^{-6}$ 1/ч;
- вспомогательный дизель-генератор — $\lambda_{ВДГ} = 70 \cdot 10^{-6}$ 1/ч;
- аварийный дизель-генератор — $\lambda_{АДГ} = 80 \cdot 10^{-6}$ 1/ч;
- автоматический выключатель — $\lambda_{АВ} = 13 \cdot 10^{-6}$ 1/ч;
- силовой трансформатор — $\lambda_T = 4 \cdot 10^{-6}$ 1/ч.

Методики расчета показателей надежности рассмотрим на примере работы СЭЭС в маневренном режиме.

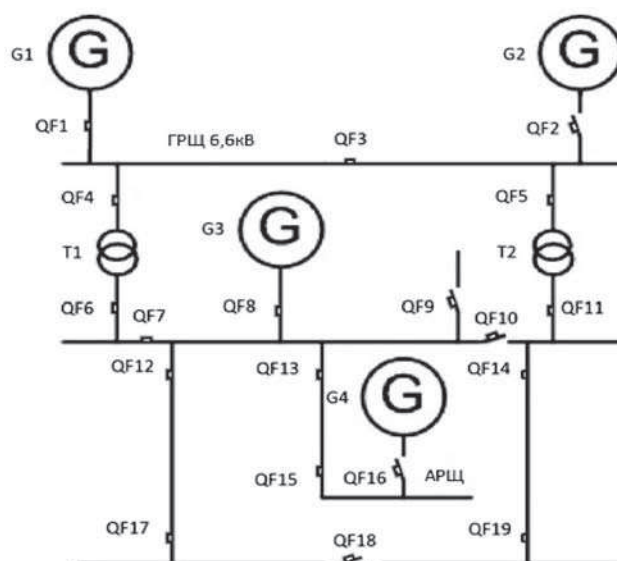


Рис. 2. Маневренный режим

Сначала строится электрическая схема СЭЭС для данного режима (см. рис. 2), затем от структурной электрической схемы СЭЭС выполняется переход к структурной схеме для расчета показателей надежности (рис. 3). Прямоугольниками на рис. 3 обозначены элементы системы электроснабжения с соответствующими вероятностями их безотказной работы. При составлении структурных схем кабели ГРЩ, АРЩ, их шины, кабельные наконечники не учитывались, так как их надежность существенно выше надежности других элементов.

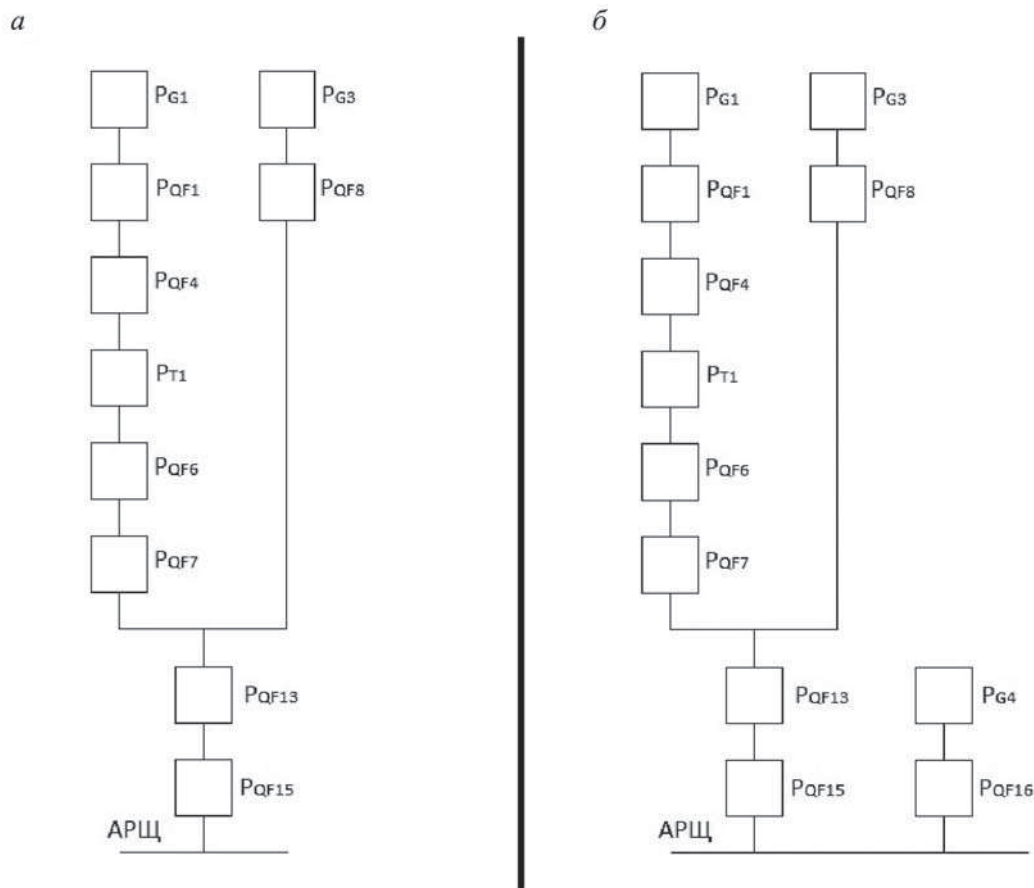


Рис. 3. Структурные схемы для расчета надежности электроснабжения в маневренном режиме:
а — при любом обесточивании АРЩ; б — при обесточивании АРЩ более чем на 45 с

Согласно рис. 3, а АРЩ будет получать питание, если хотя бы одна из двух цепей ($P_{G1}, P_{QF1}, P_{QF4}, P_{T1}, P_{QF6}, P_{QF7}, P_{QF13}, P_{QF15}$ или $P_{G3}, P_{QF8}, P_{QF13}, P_{QF15}$) будет работоспособна. С точки зрения надежности это будет расчет надежности схемы «голосования» один из двух.

Так как при отказе любого из элементов цепи питания главного генератора G1 ($P_{G1}, P_{QF1}, P_{QF4}, P_{T1}, P_{QF6}, P_{QF7}$) откажет цепь питания главного генератора, то элементы этой цепи оказываются включенными в смысле надежности последовательно, а интенсивность отказов одной цепи будет равна сумме интенсивности отказов входящих в эту цепь элементов:

$$\lambda_{ГГ1} = \lambda_{G1} + \lambda_{QF1} + \lambda_{QF4} + \lambda_{T1} + \lambda_{QF6} + \lambda_{QF7} = 50 \cdot 10^{-6} + 13 \cdot 10^{-6} + 13 \cdot 10^{-6} + 4 \cdot 10^{-6} + 13 \cdot 10^{-6} + 13 \cdot 10^{-6} = 106 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч.}$$

Вероятность безотказной работы элементов цепи главного генератора G1 $P_{ГГ1}(t)$ за 1000 ч работы в период нормальной эксплуатации может быть определена с использованием экспоненциального закона распределения:

$$P_{ГГ1}(t) = e^{-\lambda_{ГГ1}t};$$

$$P_{ГГ1}(1000) = e^{-\lambda_{ГГ1}t} = e^{-106 \cdot 10^{-6} \cdot 1000} = 0,8989.$$

Так как при отказе любого из элементов цепи питания вспомогательного дизель-генератора G3 (P_{G1} , P_{QF1}) откажет цепь питания вспомогательного дизель-генератора, то элементы этой цепи оказываются включенными в смысле надежности последовательно, а интенсивность отказов одной цепи будет равна сумме интенсивности отказов входящих в эту цепь элементов:

$$\lambda_{ВДГ} = \lambda_{ВДГ} + \lambda_{QF8} = 70 \cdot 10^{-6} + 13 \cdot 10^{-6} = 83 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч.}$$

Вероятность безотказной работы цепи вспомогательного дизель-генератора $P_{ВДГ}(t)$ за 1000 ч работы в период нормальной эксплуатации может быть определена с использованием экспоненциального закона распределения:

$$P_{ВДГ}(t) = e^{-\lambda_{ВДГ}t};$$

$$P_{ВДГ}(1000) = e^{-\lambda_{ВДГ}t} = e^{-83 \cdot 10^{-6} \cdot 1000} = 0,9199.$$

При отказе любого из элементов основной цепи (P_{QF4} , P_{T1} , P_{QF6} , P_{QF7} , P_{QF13} , P_{QF15}) АРЩ обесточится, поэтому элементы этой цепи оказываются включенными в смысле надежности последовательно, а интенсивность отказов одной цепи будет равна сумме интенсивности отказов входящих в эту цепь элементов:

$$\lambda_{ОЦ} = \lambda_{QF13} + \lambda_{QF15} = 13 \cdot 10^{-6} + 13 \cdot 10^{-6} = 26 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч.}$$

Вероятность безотказной работы основной цепи $P_{ОЦ}(t)$ за 1000 ч работы в период нормальной эксплуатации может быть определена с использованием экспоненциального закона распределения:

$$P_{ОЦ}(t) = e^{-\lambda_{ОЦ}t};$$

$$P_{ОЦ}(1000) = e^{-\lambda_{ОЦ}t} = e^{-26 \cdot 10^{-6} \cdot 1000} = 0,9742.$$

Как указывалось выше, вероятность безотказной работы обеих генераторных цепей в этом режиме работы судна может рассматриваться как вероятность работоспособности какой-либо одной цепи питания из двух, поэтому возможны следующие четыре гипотезы (Γ) о состояниях двух цепей питания (P — работоспособное состояние, HP — неработоспособное состояние):

Таблица 1

Таблица гипотез о состояниях двух цепей питания

Цепь питания, номер	Гипотезы			
	Γ_1	Γ_2	Γ_3	Γ_4
1	P	HP	HP	P
2	P	HP	P	HP

Вероятность безотказного электроснабжения аварийного распределительного щита, то есть работоспособность хотя бы одной цепи питания из двух, согласно приведенной таблице гипотез будет

$$P_{ГЦ} = \text{Вер}(\Gamma_1) + \text{Вер}(\Gamma_3) + \text{Вер}(\Gamma_4) = P_{ГГ1} \cdot P_{ВДГ} + (1 - P_{ГГ1}) \cdot P_{ВДГ} + P_{ГГ1} \cdot (1 - P_{ВДГ}).$$

Таким образом, за 1000 ч работы ($t = 1000$ ч) вероятность безотказной работы обеих генераторных цепей составит

$$P_{ГЦ}(1000) = 0,8989 \cdot 0,9199 + (1 - 0,8989) \cdot 0,9199 + 0,8989 \cdot (1 - 0,9199) = 0,9919.$$

Вероятность безотказной работы всей цепи питания АРЩ за 1000 ч работы ($t = 1000$ ч) будет равна

$$P_{Ц}(1000) = 0,9919 \cdot 0,9742 = 0,9663.$$

Средняя наработка на отказ всей цепи в предположении об экспоненциальном распределении наработки до отказа для всей системы электроснабжения АРЩ:

$$\lambda_c = -\frac{1}{t} \ln P_{\text{ц}}(t) = -\frac{1}{1000} \ln 0,9663 = 34,27 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч}$$

составит

$$T_0 = \frac{1}{\lambda_{\text{ц}}} = \frac{1}{34,27 \cdot 10^{-6}} = 29 \text{ 149 ч.}$$

Следует понимать, что получены значения показателей надежности электроснабжения при условии, что отказом считалось любое обесточивание АРЦ. Согласно требованиям Российского морского регистра судоходства при обесточивании АДГ должен запускаться и принимать нагрузку за время, не превышающее 45 с. Если считать отказом обесточивание АРЦ более чем на 45 с, то значения показателей надежности электроснабжения будут отличаться от полученных ранее. Расчет, аналогичный приведенному выше, произведенный по структурной схеме на рис. 3, б, показывает:

$$P_{\text{ц}}(1000) = 0,998,$$

$$\lambda_{\text{ц}} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч,}$$

$$T_0 = 500 \text{ 000 ч.}$$

Для сравнения полученных показателей надежности электроснабжения в различных режимах работы СЭС расчетные данные сведены в табл. 2 для случая обесточивания при отказе и в табл. 3 для случая невозможности питания за установленное время (45 с) при отказе и отображены в виде диаграммы на рис. 4.

Таблица 2

Результаты расчета показателей надежности (считая отказом любое обесточивание АРЦ)

Режим работы судна	P	$\lambda_{\text{ц}}, \text{ 1/ч}$	$T_0, \text{ ч}$
Ходовой режим	0,8757	$132 \cdot 10^{-6}$	7576
Стояночный режим	0,8961	$109 \cdot 10^{-6}$	9174
Аварийный режим СЭС	0,911	$93 \cdot 10^{-6}$	10 753
Режим выполнения грунтовых работ	0,9288	$73,86 \cdot 10^{-6}$	13 539
Маневренный режим	0,9663	$34,27 \cdot 10^{-6}$	29 149
Режим обеспечения максимальной мощности	0,8112	$208 \cdot 10^{-6}$	4808

Таблица 3

**Результаты расчета показателей надежности
(считая отказом обесточивание АРЦ на время более чем 45 с)**

Режим работы судна	P	$\lambda_{\text{ц}}, \text{ 1/ч}$	$T_0, \text{ ч}$
Ходовой режим	0,989	$11,06 \cdot 10^{-6}$	90 416
Стояночный режим	0,991	$9,04 \cdot 10^{-6}$	110 620
Аварийный режим СЭС	0,911	$93 \cdot 10^{-6}$	10 753
Режим выполнения грунтовых работ	0,994	$6,02 \cdot 10^{-6}$	166 113
Маневренный режим	0,998	$2 \cdot 10^{-6}$	500 000
Режим обеспечения максимальной мощности	0,983	$17,15 \cdot 10^{-6}$	58 309

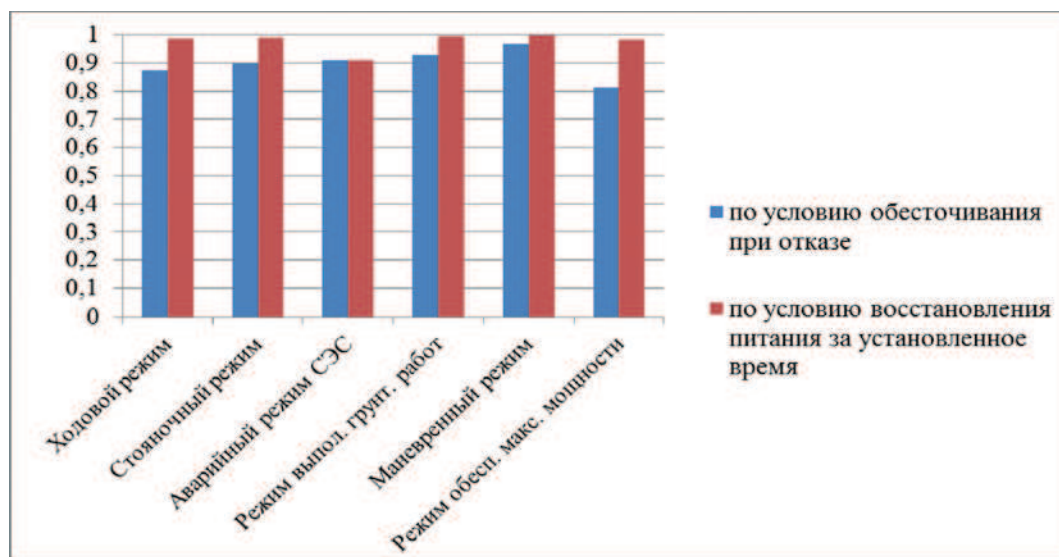


Рис. 4. Вероятности безотказной работы в разных режимах работы СЭЭС

Как видно из табл. 2, 3 и рис. 4, режим обеспечения максимальной мощности показывает наименьшие показатели надежности ($P = 0,8112$; $\lambda_{ц} = 208 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч}$; $T_0 = 4808 \text{ ч}$). Это объясняется высокой загруженностью СЭЭС в этом режиме, в связи с чем все элементы расчетной структурной схемы включены в смысле надежности последовательно.

С увеличением количества включенных параллельно в смысле надежности элементов СЭЭС (резервирование) вероятность безотказной работы всей системы и средняя наработка до отказа увеличиваются, а интенсивность отказов уменьшается. Так, в маневренном режиме $P = 0,9663$; $\lambda_{ц} = 34,27 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч}$; $T_0 = 29 \text{ 149 ч}$.

Таким образом, для рассматриваемого судна наибольшая надежность электроснабжения обеспечивается в маневренном режиме и режиме выполнения грунтовых работ, а наименьшая — в режиме обеспечения максимальной мощности.

Приведенная методика расчета показателей надежности электроснабжения в различных режимах работы СЭЭС может быть использована и для других типов судов, при этом точность расчетов будет определяться прежде всего достоверностью показателей надежности конкретных элементов системы электроснабжения данного судна.

Список литературы

1. Кузнецов С. Е. Основы технической эксплуатации судового электрооборудования и автоматики / С. Е. Кузнецов, В. С. Филев. — СПб.: Судостроение, 1995. — 448 с.
2. Кузнецов С. Е. Техническая эксплуатация судового электрооборудования / С. Е. Кузнецов [и др.] — М.: Проект, 2010. — 512 с.