

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 681.3.001.57:629.12.06

А. В. Григорьев,
канд. техн. наук, доц.;

Е.А. Глеклер,
соиск.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕДИНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В СРЕДЕ SIMULINK

COMPUTER SIMULATION AND RESEARCH OF THE INTEGRATED ELECTRIC POWER SYSTEM IN SIMULINK

При проектировании электроэнергетических систем (ЭЭС) для расчета статических и переходных характеристик широкое применение находит компьютерное моделирование. На компьютерных моделях ЭЭС путем проведения вычислительных экспериментов рассчитывают качество электрической энергии в судовой сети, токи короткого замыкания, провалы напряжения и др. Широкое применение для моделирования ЭЭС нашел пакет MatLab с приложением Simulink. В статье рассмотрена математическая и компьютерная модель синхронного генератора в среде Simulink. Показано строгое соответствие компьютерной и математической модели. Создана и представлена компьютерная модель ЭЭС реального судна, на которой проведены экспериментальные исследования переходных процессов в различных режимах эксплуатации. Сравнительный анализ вычислительного эксперимента и экспериментальных исследований на реальном объекте показали высокую сходимость результатов. Разработанную компьютерную модель можно использовать для моделирования ЭЭС различных судов.

Investigation of properties of object, calculation of its static and transitional characteristic are necessary during designing of electric power systems. Required research can be made on computer model by providing of computing experiments. MatLab with Simulink extension has gotten wide application for modeling of electric power systems. Mathematic and computer models of synchronous generator in Simulink are considered in the article. Strict accordance of computer and mathematic models is shown. Authors have made and have presented in the article computer model of power electric system of real ship. Research of transitional processes in different operation modes are made on the computer model. Comparative analysis of computing experiment and experimental research on real object has shown high degree of convergence of results. Developed computer model can be used for modeling of electric power systems of different ships.

Ключевые слова: математическая модель, компьютерная модель, экспериментальные исследования, вычислительный эксперимент, синхронный генератор, полупроводниковый преобразователь, электро-энергетическая система, судно.

Key words: mathematic model, computer model, experimental research, computing experiment, synchronous generator, semiconductor converter, electric power system, ship.



ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ системы (ЭЭС) находят широкое применение в различных областях народного хозяйства, включая морской транспорт. Основным назначением ЭЭС является производство электроэнергии необходимого количества и требуемого качества с целью реализации автономным объектом своих эксплуатационных характеристик. На этапе проектирования ЭЭС необходимо изучить свойства системы, определить её статическую и динамическую устойчивость, качество электроэнергии в сети, рассчитать переходные процессы. Это позволит принять обоснованные конструкторские решения по выбору структуры, составу и алгоритму управления ЭЭС.

a — по продольной оси q ; b — по продольной оси d

Математическая модель синхронного генератора, реализованная в среде *Simulink*, состоит из системы дифференциальных уравнений для напряжений и системы алгебраических уравнений для расчета потоковсцеплений, представленных далее.

Проведенный сравнительный анализ показывает, что математическая модель синхронной машины, реализованная в среде *Simulink* (библиотека приложения *SimPowerSystem*), является классической моделью синхронной машины с демпферной обмоткой [8], [9]:

$$\begin{cases} V_d = R_s \cdot i_d + \frac{d}{dt} \Phi_d - \omega_R \cdot \Phi_q; \\ V_q = R_s \cdot i_q + \frac{d}{dt} \Phi_q + \omega_R \cdot \Phi_d; \\ V'_{fd} = R'_{fd} \cdot i'_{fd} + \frac{d}{dt} \Phi'_{fd}; \\ V'_{kd} = R'_{kd} \cdot i'_{kd} + \frac{d}{dt} \Phi'_{kd}; \\ V'_{kq1} = R'_{kq1} \cdot i'_{kq1} + \frac{d}{dt} \Phi'_{kq1}; \\ V'_{kq2} = R'_{kq2} \cdot i'_{kq2} + \frac{d}{dt} \Phi'_{kq2}; \end{cases} \quad \begin{cases} \Phi_d = L_d \cdot i_d + L_{md} (i'_{fd} + i'_{kd}); \\ \Phi_q = L_q \cdot i_q + L_{mq} \cdot i'_{kq}; \\ \Phi'_{fd} = L'_{fd} \cdot i'_{fd} + L_{md} (i_d + i'_{kd}); \\ \Phi'_{kd} = L'_{kd} \cdot i'_{kd} + L_{md} (i_d + i'_{fd}); \\ \Phi'_{kq1} = L'_{kq1} \cdot i'_{kq1} + L_{mq} \cdot i_q; \\ \Phi'_{kq2} = L'_{kq2} \cdot i'_{kq2} + L_{mq} \cdot i_q. \end{cases}$$

Компьютерная модель синхронной машины, реализованная в среде *Simulink*, приведена на рис. 3. В блоках компьютерной модели помещены подсистемы для расчета уравнений математической модели синхронной машины.

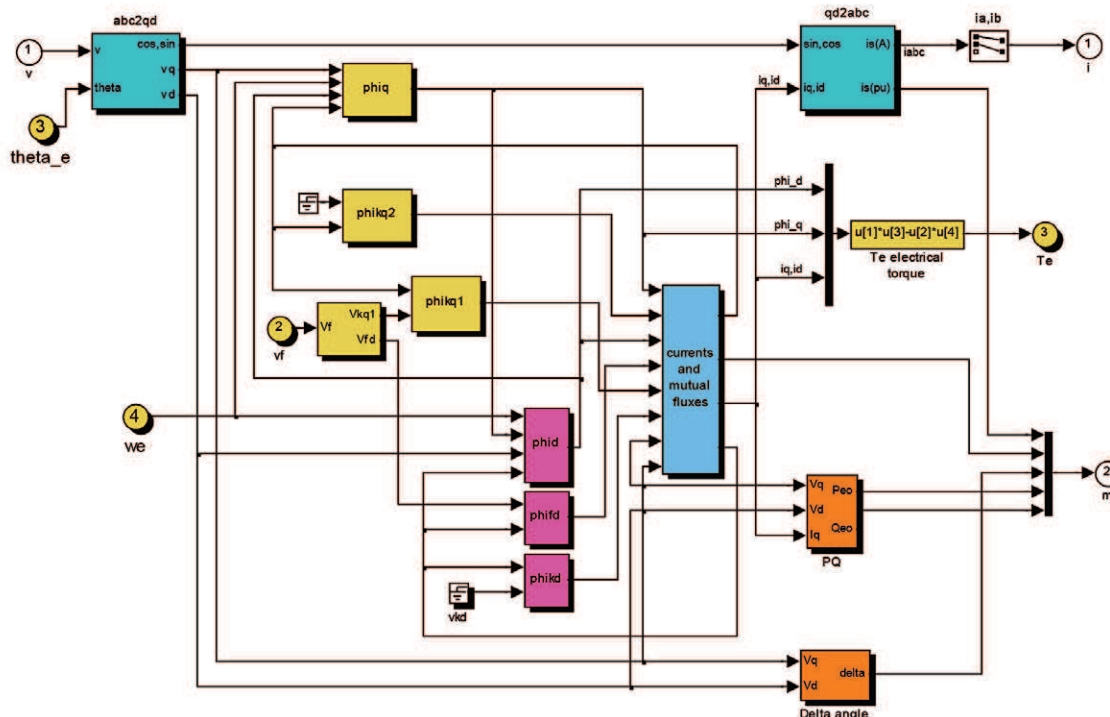


Рис. 3. Компьютерная модель синхронной машины в среде *Simulink*

В ряде случаев в библиотеке пакета *Simulink* отсутствуют модели требуемых электротехнических устройств, в частности, нет модели шестифазной синхронной машины. Для создания компьютерных моделей отсутствующих электротехнических устройств могут использоваться стандартные модели, представленные в библиотеке пакета *Simulink* [10], [11].

Проведенный авторами анализ подтверждает, что компьютерные модели электротехнических устройств, представленных в библиотеке приложения *SimPowerSystem*, имеют строгое математическое описание и адекватно описывают объекты.

На рис. 4 приведена структурная схема реальной судовой ЭЭС, взятая в основу для создания компьютерной модели объекта [12], [13]. В состав ЭЭС входят два главных, стояночный и аварийный дизель-генераторные агрегаты (ГДГ1, ГДГ2; СДГ; АДГ), полупроводниковые преобразователи частоты со звеном постоянного тока (ППЧ1, ППЧ2), асинхронные гребные электродвигатели (ГЭД1, ГЭД2), подруливающее устройство (ПУ), главный и аварийный распределительный щит (ГРЩ, АРЩ), винторулевые колонки (ВРК1, ВРК2), трехобмоточные повышающие трансформаторы (Тр1, Тр2).

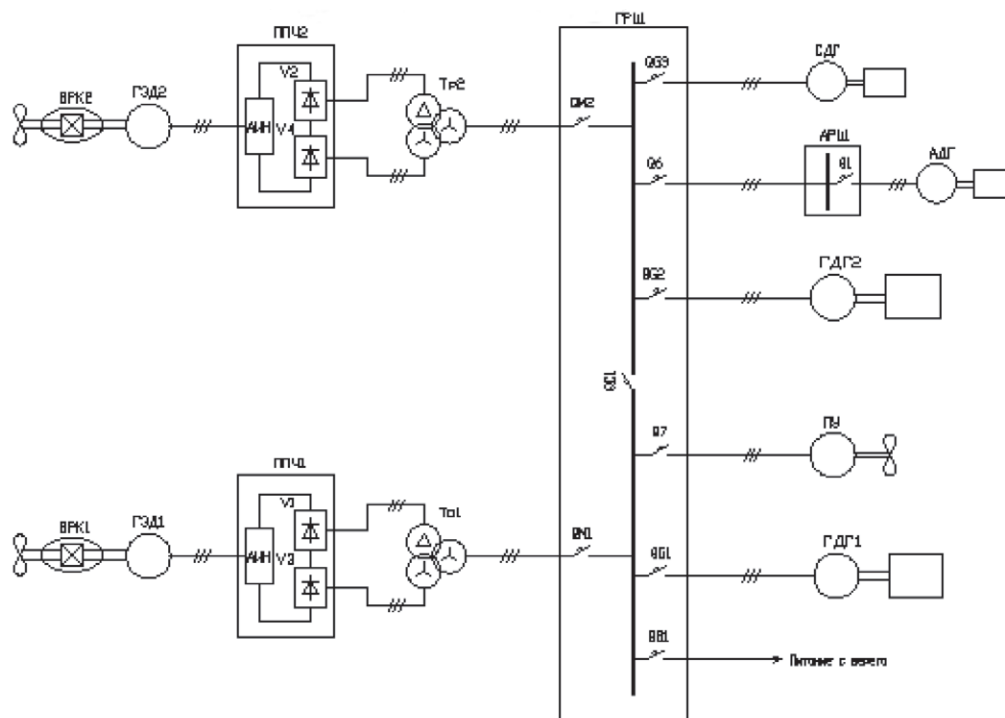


Рис. 4. Судовая электроэнергетическая система

На рис. 5 приведена разработанная авторами компьютерная модель ЭЭС, собранная в среде *Simulink* с применением стандартных блоков библиотеки *SimPowerSystems* [14], [15].

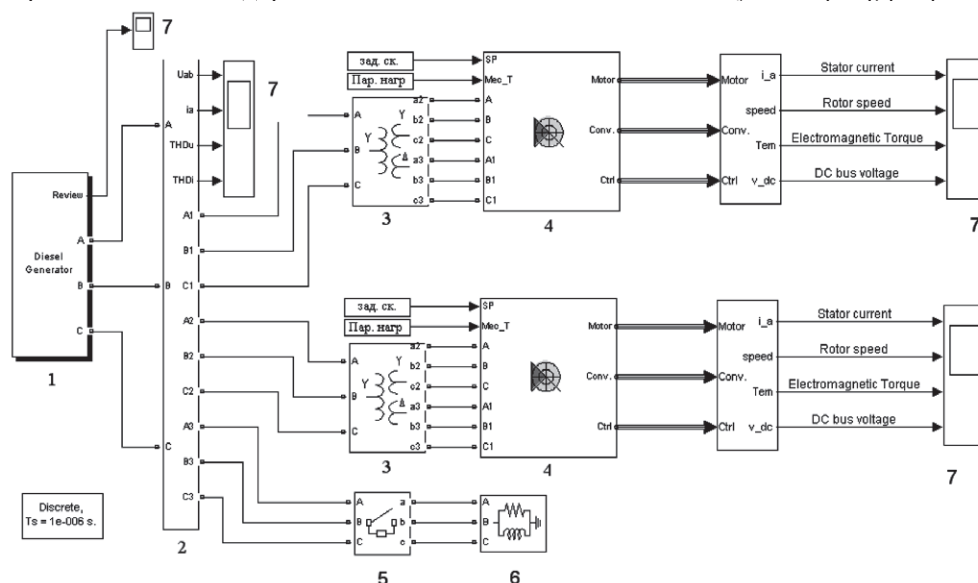


Рис. 5. Компьютерная модель судовой электроэнергетической системы:

1 — дизель-генератор; 2 — ГРЩ; 3 — трансформатор; 4 — гребной электропривод; 5 — автоматический выключатель; 6 — статическая нагрузка; 7 — виртуальные электроизмерительные приборы

Компьютерная модель ЭЭС создана с использованием стандартных блоков библиотеки *SimPowerSystems*, путем добавления собственных моделей на базе стандартных блоков пакета. Модель ЭЭС разработана с целью исследования динамических режимов системы и влияния полупроводниковых преобразователей на качество электроэнергии в судовой сети.

На рис. 6 приведены переходные процессы пуска и остановки гребного электродвигателя (ГЭД), полученные в результате проведения вычислительных экспериментов на компьютерной модели ЭЭС.

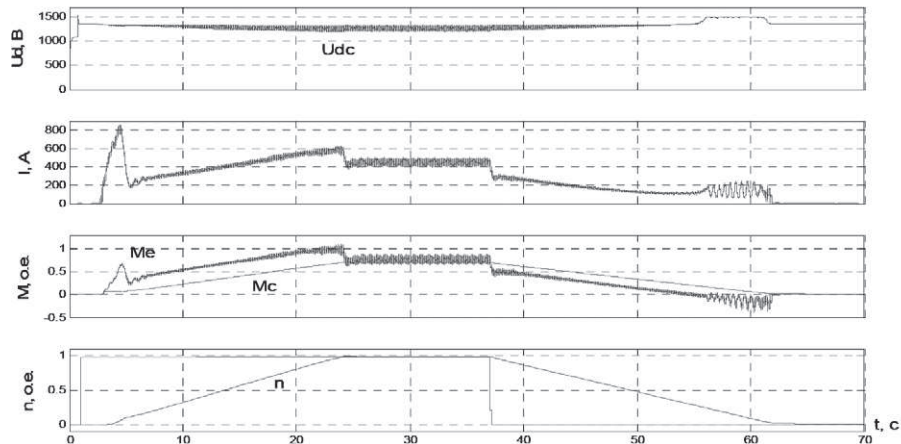


Рис. 6. Переходные процессы пуска и остановки ГЭД:

U_d — напряжение в звене постоянного тока ПП; I , M_e , n — ток, момент и частота вращения ГЭД

На компьютерной модели судовой ЭЭС были рассчитаны мгновенные значения напряжений и токов в судовой сети для разных режимов эксплуатации и проведен их гармонический анализ (рис. 7).

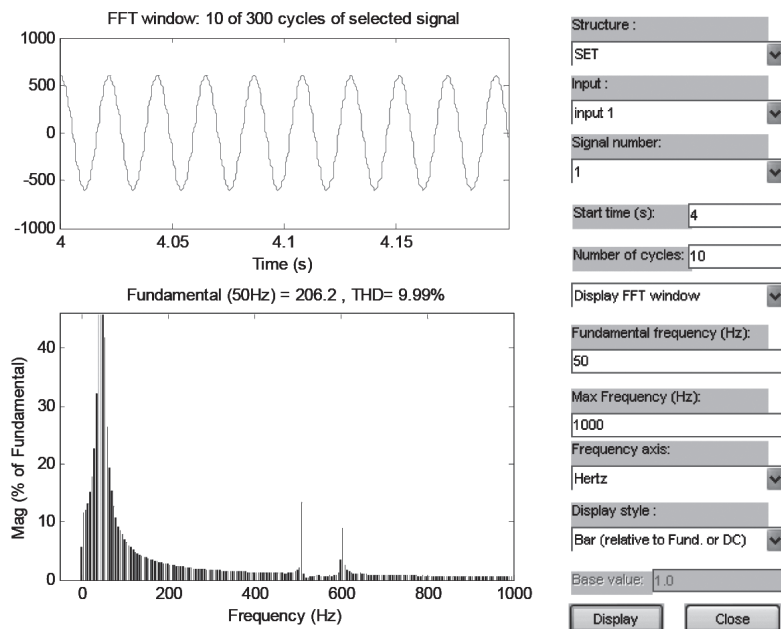


Рис. 7. Мгновенное значение и спектр высших гармоник напряжения судовой сети ЭЭС

Результаты проведенных компьютерных экспериментов показали, что во всех режимах эксплуатации качество электроэнергии в судовой сети для конкретного объекта не превышает допустимых значений. Полученные на компьютерной модели результаты были подтверждены в ходе ходовых испытаний реальной судовой ЭЭС малого гидрографического судна «Вайгач». Сравнение результатов экспериментальных исследований, полученных на компьютерной модели ЭЭС и реальном объекте, показали хорошую сходимость [16], [17].

Таким образом, проведенный научный анализ подтверждает, что компьютерные модели электротехнических устройств, представленных в библиотеке блока *SimPowerSystems*, имеют строгое математическое описание и данный пакет целесообразно использовать при создании компьютерных моделей судовых ЭЭС.

Список литературы

1. Баранов А. П. Применение математического моделирования для исследования переходных процессов в судовых электроэнергетических системах / А. П. Баранов, А. В. Григорьев, Г. А. Новоселов // Пятая межд. конф. и выставка по морским интеллектуальным технологиям «Моринтех-2003»: материалы конф. (сб. докл.). — СПб.: Изд-во НИЦ «Моринтех», 2003. — С. 281–285.
2. Баранов А. П. Исследование переходных процессов в судовой электроэнергетической системе на математической модели / А. П. Баранов, А. В. Григорьев // Эксплуатация морского транспорта. — СПб.: Наука, 2003. — С. 268–280.
3. Петухов В. А. Анализ и оптимизация эксплуатационных режимов судовых дизель-генераторов / В. А. Петухов, А. П. Баранов, А. В. Григорьев // Эффективность работы энергетических установок и технических средств: межд. сб. науч. тр. — Калининград: Изд-во КГТУ, 2003. — С. 98–105.
4. Григорьев А. В. Компьютерное моделирование судовых электроэнергетических систем / А. В. Григорьев // Тр. 5-й Междунар. науч.-техн. конф. «Компьютерное моделирование 2004». — Ч. 1. — СПб.: Нестор, 2004. — С. 177–183.
5. Григорьев А. В. Применение пакета MatLab при моделировании и исследовании электроэнергетических систем / А. В. Григорьев // Тр. 3-й межвуз. конф. по науч. программному обеспечению «Практика применения научного программного обеспечения в образовании и научных исследований». — СПб.: Нестор, 2005. — С. 42–47.
6. Григорьев А. В. Компьютерная модель судового дизель-генераторного агрегата / А. В. Григорьев // Эксплуатация морского транспорта: сб. науч. тр. — СПб.: ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2006. — Вып. 45. — С. 294–302.
7. Григорьев А. В. Из опыта моделирования электроэнергетических систем в среде Simulink / А. В. Григорьев, Е. А. Глеклер // Тр. межвуз. конф. по науч. программному обеспечению «Практика применения научного программного обеспечения в образовании и исследованиях». — СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2007. — С. 79–82.
8. Григорьев А. В. Опыт применения пакета визуального моделирования Simulink при проектировании судовых электроэнергетических систем / А. В. Григорьев, Е. А. Глеклер, Д. И. Улитовский // Компьютерное моделирование 2008: тр. междунар. науч.-техн. конф. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. — С. 89–92.
9. Григорьев А. В. Единая электроэнергетическая установка гидрографического судна на базе системы электродвижения переменного тока / А. В. Григорьев, К. С. Ляпидов, Л. С. Макаров // Судостроение. — 2006. — № 4. — С. 33–34.
10. Григорьев А. В. Компьютерная модель единой электроэнергетической установки малого гидрографического судна / А. В. Григорьев, Д. И. Улитовский // Эксплуатация морского транспорта. — 2007. — № 1 (47). — С. 69–72.
11. Григорьев А. В. Экспериментальные исследования системы электродвижения переменного тока с полупроводниковым преобразователем / А. В. Григорьев // Судостроение. — 2007. — № 3. — С. 30–32.
12. Васин И. М. Малое гидрографическое судно «Вайгач» / И. М. Васин, А. В. Григорьев, Л. С. Макаров // Судостроение. — 2008. — № 1. — С. 31–32.
13. Григорьев А. В. Результаты ходовых испытаний единой электроэнергетической установки гидрографического судна «Вайгач» / А. В. Григорьев, Е. А. Глеклер, Д. И. Улитовский // Судостроение. — 2008. — № 1. — С. 33–35.
14. Григорьев А. В. Малое гидрографическое судно «Вайгач»: результаты ходовых испытаний / А. В. Григорьев // Эксплуатация морского транспорта. — 2008. — № 2 (52). — С. 70–73.

15. Григорьев А. В. Результаты моделирования и испытания первой отечественной судовой единой электроэнергетической установки / А. В. Григорьев // Научно-технические ведомости СПбГПУ. — 2008. — № 2 (55). — С. 159–163.

16. Григорьев А. В. Опыт проектирования и результаты испытаний единой электроэнергетической установки судна «Вайгач» / А. В. Григорьев // Изв. вузов. Электромеханика. — 2008. — № 4. — С. 28–31.

17. Григорьев А. В. Единая электроэнергетическая установка малого гидрографического судна «Вайгач»: опыт проектирования и результаты испытаний / А. В. Григорьев // Российский морской регистр судоходства: науч.-техн. сб. — 2008. — Вып. 31. — С. 271–278.

УДК 621.311:629.12

С. Ю. Труднев,
ст. преп.

РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ГЕНЕРАТОРНОГО АГРЕГАТА И ТРЕХФАЗНОГО БЕЗЫНЕРЦИОННОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ

DEVELOPMENT OF COMPUTER MODEL OF PARALLEL OPERATION OF THE GENERATING UNIT AND THREE-PHASE NON-INERTIAL POWER SUPPLY

В статье рассмотрены структура транспортировки электроэнергии, определены недостатки основных узлов, предложено техническое решение по устранению недостатков. Исследована работа устройства, позволяющего улучшить качество электрической энергии. Разработана математическая модель параллельной работы дизель-генераторного агрегата и безынерционного трехфазного источника питания, работающего через инвертор. На основании математической модели разработана и исследована имитационная модель предлагаемого устройства в программе MATLAB. Рассмотрена работа генераторного агрегата при динамическом возмущении, исследованы характеристики зависимости напряжения от времени работы. Выявлен положительный эффект параллельной работы трехфазного инвертора и генераторного агрегата. Доказана целесообразность применения безынерционных источников питания в системах электроснабжения. Сопоставлены результаты экспериментальных данных и основные требования Российского морского регистра судоходства, предъявляемые к электроэнергетическим системам судов.

In this article structure of transportation of the electric power is considered, shortcomings of the main knots are defined, the technical solution on elimination of shortcomings is proposed. Operation of the device allowing to improve quality of electric energy is investigated. The mathematical model of parallel operation of the diesel-generator unit and non-inertial three-phase power supply working via the inverter is developed. On the basis of mathematical model the imitating model of the offered device in the MATLAB program is developed and investigated. Operation of the generating unit at dynamic indignation is considered, characteristics of dependence of tension on operating time are investigated. The positive effect of parallel operation of the three-phase inverter and generating unit is revealed. Expediency of use of not inertial power supplies in systems of power supply is proved. Results of experimental data and the main requirements of the Sea Register imposed to electrical power systems of courts are compared.

Ключевые слова: параллельная работа, трехфазная сеть, модель, динамический режим, напряжение, дизель-генераторный агрегат.

Key words: parallel work, three-phase network, model, dynamic mode, tension, diesel-generator unit.



РЫБОЛОВНЫЙ флот Российской Федерации в течение двух последних десятилетий сильно устарел. Для решения данной проблемы правительство РФ разработало федеральную целевую программу по ежегодному обновлению флота в количестве до 20 еди-