

УДК 621.311

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И СИМУЛЯЦИЯ СУДОВОЙ СИСТЕМЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ

**Куторей Максим Алексеевич, Авдеев Борис Александрович**

*ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет»*

Судовые энергетические системы становятся все более сложными, в связи с чем все чаще преобладают алгоритмы управления, а не физические структуры. Присущие большинству компонентов системы поведения являются нелинейными. Следовательно, проблемы проектирования судовых энергосистем, как правило, не являются аналитическими, поэтому исследование и решение таких проблем требует поддержки со стороны среды моделирования.

**Ключевые слова:** энергетические системы, модель Simulink, качество энергетической энергии, программное обеспечение.

## SIMULATION AND SIMULATION OF THE SHIP'S ENERGY DISTRIBUTION SYSTEM

**Kutorei Maksim, Avdeev Boris**

Ship power systems are becoming more complex, and therefore control algorithms rather than physical structures increasingly dominate. The behaviors inherent in most components of the system are non-linear. Consequently, the problems of designing ship power systems, as a rule, are not analytical, therefore research and solution of such problems requires support from the modeling environment.

**Keywords:** energy systems, Simulink model, energy quality, software.

**Введение.** В теории синергетического управления требования, предъявляемые к динамическим и статическим качествам синтезируемых систем, представлены в виде набора инвариантов. Инварианты входят в структуру инвариантных многообразий, образующихся в фазовом пространстве объекта по методике синергетического синтеза. Эти многообразия служат аттракторами замкнутой системы.

Особого внимания заслуживают инварианты ЭМС, связанные с постоянством магнитного потока (электромагнитные инварианты). Идея стабилизации магнитного состояния асинхронной машины нашла свое применение в известных законах регулирования частоты асинхронных двигателей и имеет несомненное практическое значение [1].

**1. Анализ литературных источников. Постановка проблемы.** Программное обеспечение Virtual Test Bed (VTB) и его преемник, специально предназначенные для процесса проектирования судов для междисциплинарных динамических систем, Ship Smart System Design (S3D), отлично

---

подходят для такого рода проблем. Обе среды предлагают следующие возможности, которые поддерживают исследование, проектирование и решение проблем энергосистемы:

- Переменные временные шаги с расписанием событий;
- Интерфейс к Simulink;
- Интерфейс к Labview;
- Методы быстрого прототипирования элементов управления;
- Возможность изучения систем переменного или постоянного тока;
- Использование расширенной диагностики, например, инструментарий идентификации системы.

В дополнение к этим возможностям, которые специально поддерживают анализ энергосистемы, другие важные функции VTB и S3D включают в себя:

- Графическая среда для определения системы и взаимодействия во время выполнения симуляции;
- Независимый формат модели;
- Множественные представления (графические) компонентов системы;
- Динамически связанные имитационные модели, позволяющие изменять во время выполнения моделируемую систему;
- Графическая среда, которая поддерживает как ориентированную на измерения графику, так и концептуальные или физические графические системные представления;
- Библиотека разнообразных моделей, поддерживающая междисциплинарную систему моделирования;
- Возможность моделирования с помощью оборудования в цикле;
- Среда реального времени (опция), работающая под Linux (по сравнению с человеческой интерактивной версией, работающей под Windows);
- Скриптовый инструмент, который распознает разницу между изменениями в реальном времени и во время выполнения;
- Опции для совместной работы с другим программным обеспечением, включая Matlab / Simulink и Advanced Continuous Simulation Language.
- Множество типов портов объектов, включая те, которые обеспечивают соблюдение естественных законов сохранения, и те, которые подчиняются принципам потока сигналов [2].

**2. Цель и задачи исследования.** Цель данной работы – построение модели судовой электроэнергетической системы. Задачей же является выявление проблем с качеством электрической энергии в системе и способы их устранения.

---

**3. Методы и материалы исследования.** При проектировании электроэнергетических систем в настоящее время все чаще прибегают к компьютерному математическому моделированию. Применение современных программных продуктов для математического моделирования позволяет существенно упростить задачу создания модели электроэнергетической системы. Некоторые современные программные продукты, среди которых лидирующую позицию занимает MathLab с приложением Simulink, имеют достаточно большую библиотеку стандартных устройств и виртуальных измерительных приборов, которые необходимы для проведения вычислительных экспериментов в системе.

#### **4. Результаты исследований.**

На рисунке 1 показан пользовательский интерфейс редактора схем, который используется для определения исследуемой системы. Система собирается методом перетаскивания, выбирая объекты из библиотеки моделей (список показан в крайнем левом окне). Модельные объекты не ограничиваются электрической дисциплиной, но вместо этого могут быть определены в других дисциплинах, таких как механическая, текучая, термическая и так далее. Соединительные порты могут быть типа «естественный» или «сигнальный».

Независимый формат модели среды позволяет обновлять библиотеку моделей независимо от других частей программного обеспечения. Кроме того, каждый объект может использовать или определять свои собственные вычислительные процессы внутренне, сообщая в структурированную среду только минимальные данные, необходимые для определения поведения взаимосвязанной системы [3].

Модели могут иметь несколько «слоев», которые могут соответствовать различным представлениям и / или различным математическим представлениям. В простейшей реализации один и тот же объект может быть представлен разными цветами, соответствующими состоянию или переменной в модели. В более сложных реализациях разные уровни могут соответствовать разным уровням сложности в модели или разным формам представления. Примеры первого случая включают представление преобразователя мощности на трех уровнях детализации, таких как:

- 1) модель среднего значения переключения;
- 2) модель переключения с идеальным переключателем;
- 3) модель переключения с неидеальным переключателем.

Примеры второго случая включают в себя показ объектов энергосистемы в однострочном представлении (см. Рис. 1) или в трехфазном представлении.

---

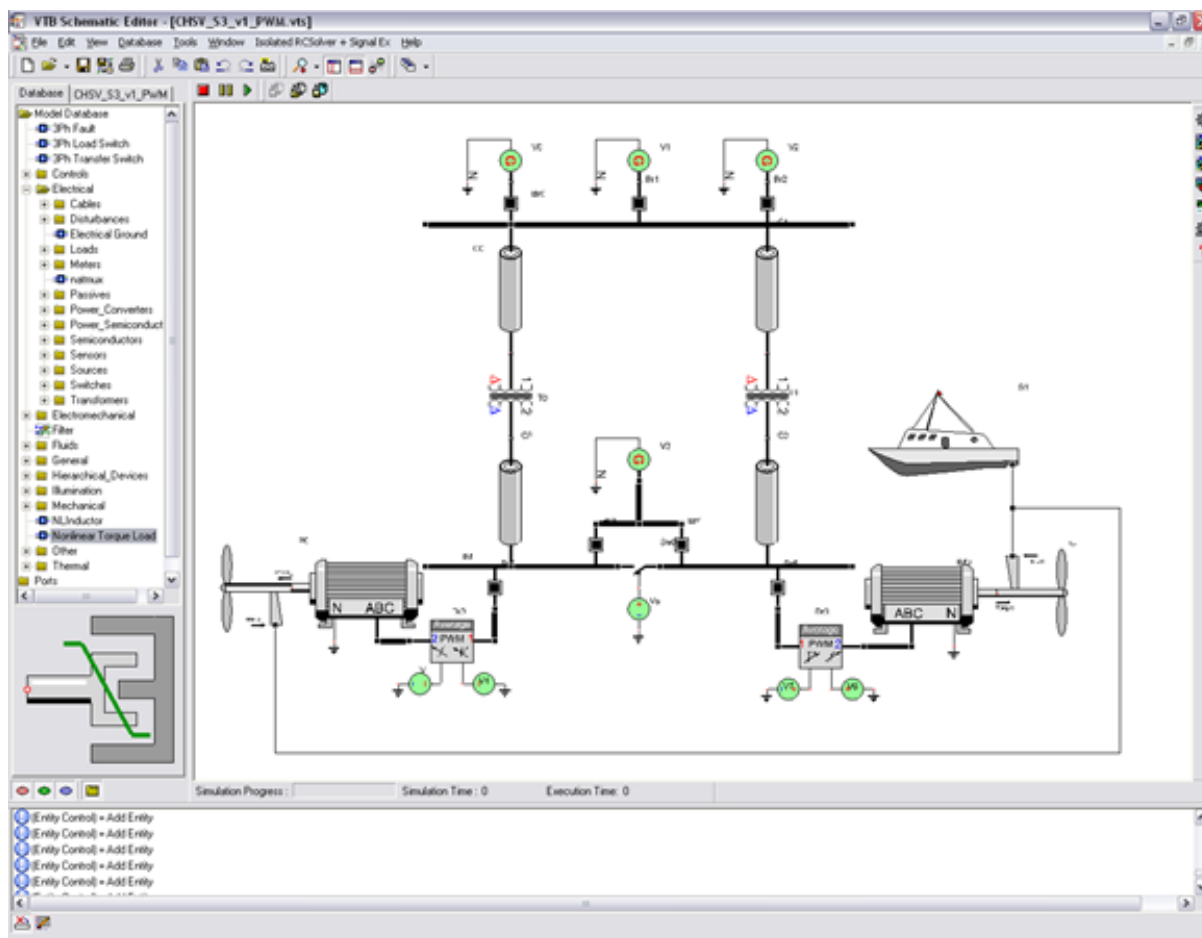


Рисунок 1. Пользовательский интерфейс редактора схем VTB

Архитектура VTB требует предоставления моделей в виде динамически связанных программных объектов. Выставленные пользовательские параметры могут быть скорректированы во время выполнения моделирования, либо через диалоговые окна, либо через элементы управления (например, ползунки) в графической среде вывода. Это обеспечивает эффективное взаимодействие человека с симуляцией, что приводит к быстрому усвоению параметрических зависимостей.

Графическая среда вывода, МРВ (Модуль расширения визуализации), позволяет пользователю быстро понять производительность системы. Визуальные выходные данные включают управляемую данными анимацию движений объектов, наложение новых представлений данных абстрактного моделирования поверх твердых объектов или просто осциллографических графиков. Двухнаправленные каналы связи между графической средой и средой моделирования позволяют объектам в графической среде управлять параметрами в среде моделирования и наоборот.

Помимо объектов электрической системы, модели в среде VTB могут представлять любой объект, к которому применяются законы естественной связи. Обычно используются модели с

сосредоточенными элементами, но в остальном могут использоваться более сложные модели, такие как модели с конечными элементами. Например, программное обеспечение в настоящее время также интенсивно используется в проектах, которые включают анализ жидкостей и термический анализ, таких как системы охлаждения и источники питания на топливных элементах [4].

При работе в операционной системе Windows, программное обеспечение позволяет взаимодействовать с человеком на произвольных скоростях моделирования, либо быстрее, либо медленнее, чем время часов, в зависимости от возможностей процессора, сложности задачи и номинального временного шага. Для систем, которые способны работать быстрее, чем в режиме реального времени, можно использовать мягкую опцию в реальном времени, которая заставляет скорость моделирования соответствовать времени часов. Эта мягкая функция в реальном времени полезна для придания реалистичности взаимодействию и визуализации, когда симуляция управляет анимацией, которая требует взаимодействия с оператором.

Тяжелая работа в реальном времени с быстрым разрешением времени может быть достигнута путем запуска симуляции в операционной системе Linux с элементами управления в реальном времени. Работать в такой системе так же просто, как определить систему на компьютере с операционной системой Windows, а затем сохранить файл определения системы (\*.vts) на подключенном сетевом диске на компьютере Linux. Запуск симуляции на компьютере Linux (путем чтения файла \*.vts) позволяет симуляции взаимодействовать с внешним оборудованием - либо цифровым оборудованием (которое мы называем «процессор в цикле»), либо аналоговым оборудованием (которое мы называем «питание в сети»).

Скриптовый инструмент позволяет определять моделирование двумя способами. Один простой метод позволяет записывать каждое пользовательское действие во время выполнения, так что симуляция может быть воспроизведена позже после тех же действий. Другой метод позволяет априорное определение через отдельную среду редактирования. В среде VTB появилась новая концепция - идентификация действий как действий в реальном времени, так и действий во время выполнения. Различие очень важно, но несколько тонко. Событие в реальном времени должно происходить в определенный момент, чтобы оно должным образом взаимодействовало с оборудованием (если оно связано с проблемой моделирования) или пользователем (если пользователь ожидает, что что-то произойдет, например, через 5 секунд после симуляция запускается), тогда как действие времени выполнения может произойти, когда маркер времени симуляции пересекает некоторый определенный порог. Например, неисправность может быть применена к проводнику распределения мощности через 135 м/с после начала моделирования.

---

Если моделирование имело постоянный шаг в 5 микросекунд, то действие должно происходить на 71-м временном шаге, независимо от того, сколько времени прошло, прежде чем моделирование предприняло 71-й временной шаг.

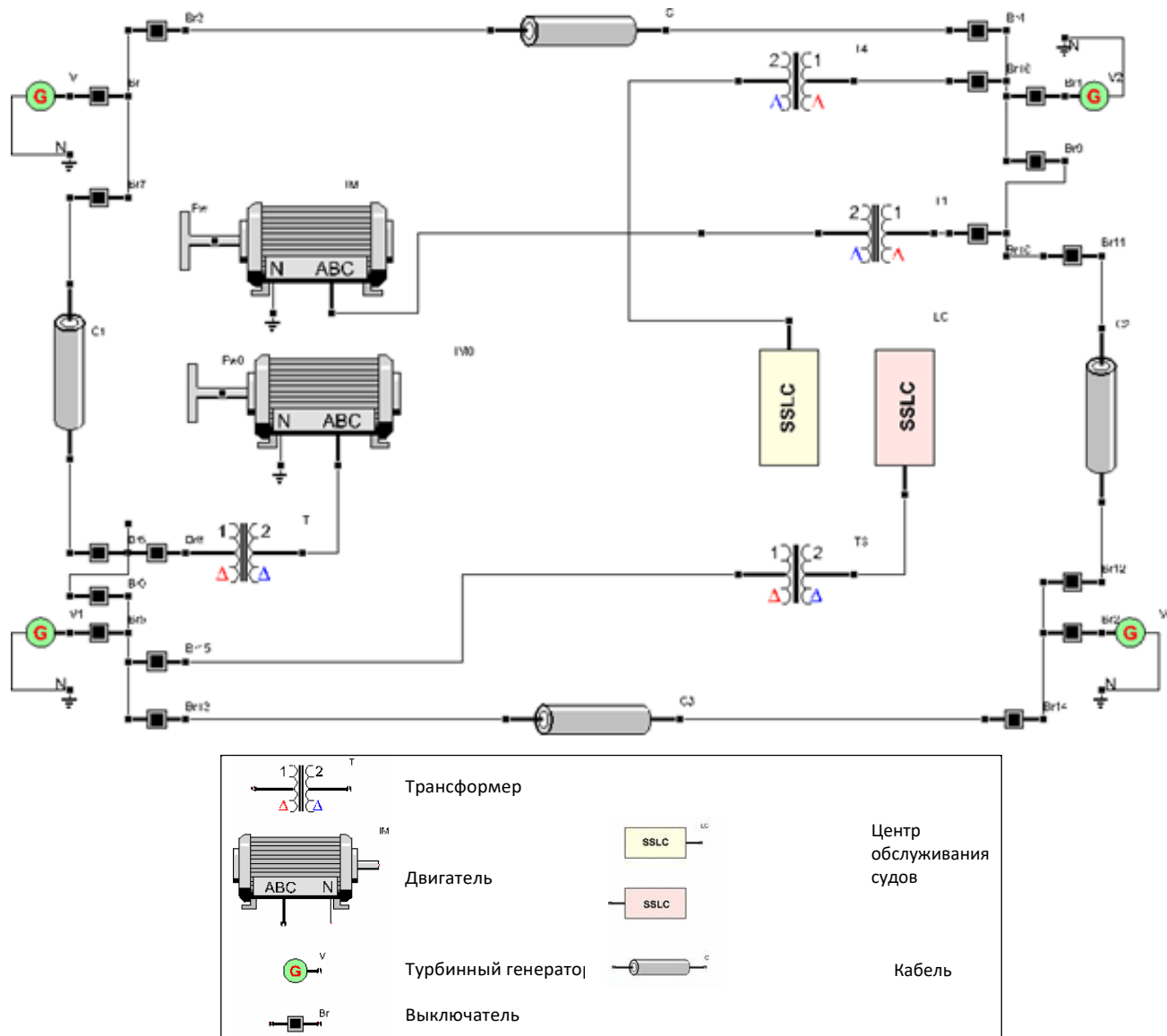


Рисунок 2. Условная интегрированная энергосистема в VTB

Интерфейсные объекты позволяют решателю VTB взаимодействовать с другими исполняемыми объектами, которые могут быть автономным кодом или другим пользовательским программным обеспечением. Две особенно ценные среды - это среда Matlab / Simulink и среда Advanced Continuous Simulation Language. Интерфейс Simulink доступен в двух формах - одна позволяет симулировать с помощью движка Simulink и, следовательно, требует, чтобы симулятор обладал лицензией Matlab / Simulink, а другая - позволяет симулировать скомпилированной формой модели, которая не требует, чтобы симулятор владел лицензией на исполняемое программное обеспечение (но это также означает, что симулятор не может редактировать эту

часть системы). Скомпилированная форма модели экспортируется из Simulink с использованием набора инструментов из RealTime Workshop, а затем автоматически компилируется в модель VTB после указания значка, идентификации портов и т.д.

В данной работе мы изучаем условную корабельную интегрированную энергосистему в VTB. Однолинейная схема части системы показана на рисунке 2.

Система включает в себя две основные турбогенераторные установки, каждая из которых имеет номинальную мощность 36 МВт, и две вспомогательные турбогенераторные установки, каждая из которых рассчитана на мощность 4 МВт, питающая шину 13,8 кВт, трехфазная, мощность 60 Гц. IPS имеет два двигателя, каждый мощностью 36 МВт. Каждый движитель обслуживается двумя трансформаторами, и каждый трансформатор может питаться от отдельного источника напряжением 13,8 кВт.

Условная схема центра обслуживания судна в виде одной линейной диаграммы представлена на рисунке 3.

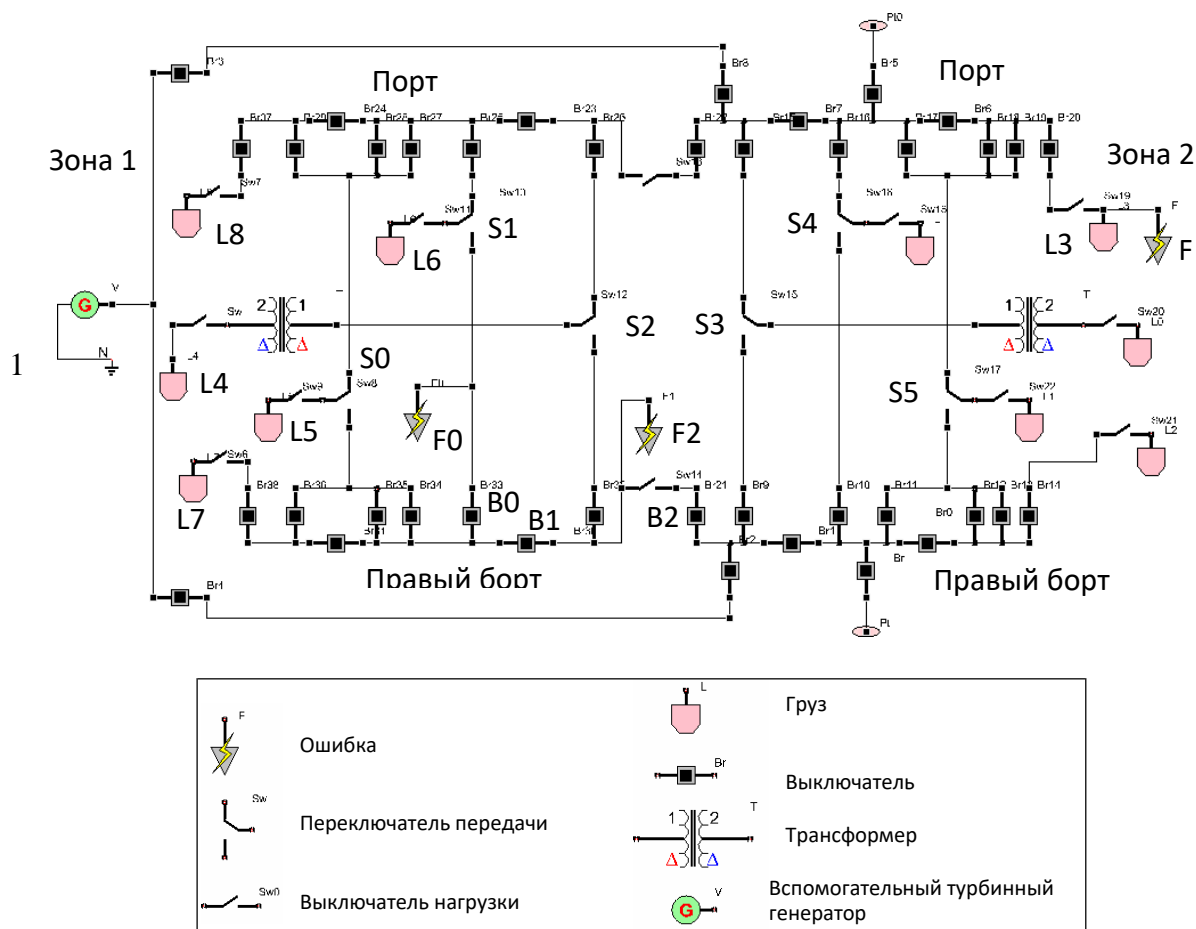


Рисунок 3. Условная схема центра обслуживания судов в VTB

Мощность судового сервиса поступает из той же шины 13,8 кВт, а нагрузки классифицируются как не жизненно важные и жизненно важные. Ненужные нагрузки питаются от



центров нагрузки непосредственно от понижающих трансформаторов центров нагрузки. Жизненные нагрузки питаются от распределительных шин портов или правого борта через переключатели. Выключатели нагрузки используются для быстрого (по сравнению с обычными выключателями) отключения неисправных нагрузок.

Поскольку основной целью данной статьи является демонстрация возможностей программного обеспечения VTB, алгоритмы обнаружения неисправностей здесь не рассматриваются. Предполагается, что неисправности в системе могут быть эффективно выявлены. Для этой цели можно использовать несколько эффективных методов обнаружения неисправностей, включая метод дифференциальной ретрансляции и его модификации

Схема демонстрации концепции Центра обслуживания судов, показанная на рисунке 3, представляет общую зональную структуру. Реальная система может состоять из нескольких или многих зон переменного или постоянного тока, подключенных, как показано на рисунке 3. Зональная система содержит фидерные кабели, включая распределительные шины портов и правого борта, шины локальной подачи и питания оборудования и нагрузки в каждой зоне. Система распределения питания резервируется: в случае электрической неисправности в фидерах порта или правого борта, питание для нагрузок обеспечивается альтернативным фидером. Мощность передается с помощью полупроводниковых переключателей. Как только обнаруживается неисправность в распределительных шинах портов или правого борта, электрическое питание отключается от зоны поражения с помощью автоматических выключателей или разъединителей, в то время как питание на нагрузки перенаправляется переключателями через неповрежденные альтернативные фидеры.

Если в системе нет ошибок, дополнительное управление распределением мощности обеспечивается соответствующими настройками переключателей передачи.

Таким образом, программное обеспечение VTB / S3D является ценным инструментом для моделирования, симуляции и быстрого прототипирования энергосистем, а также для решения проблем качества электроэнергии. Интерфейсы VTB с Matlab / Simulink, Labview, ACSL, Pspice очень полезны во многих аспектах, включая разработку, внедрение и быстрое создание прототипов различных алгоритмов управления на всех уровнях - от низкоуровневых контроллеров устройств до высокоуровневых систем или контроллеров принятия решений [5].

**5. Выводы.** Результаты моделирования, представленные в этой работе, показывают, что предлагаемая интегрированная энергетическая система корабля эффективна и что она имеет несколько важных преимуществ по сравнению с обычными системами. Целостность формы тока и напряжения жизненно важных нагрузок сохраняется на протяжении всех неисправностей.

---



**Благодарности.** Выражаем благодарность заведующему кафедрой электрооборудования судов и автоматизации производства ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет» кандидату технических наук, доценту Черному Сергею Григорьевичу за советы и ценные замечания при работе над данной статьей.

### Список литературы

1. Гао В., Э. Солодовник, Р. Дугал. «Моделирование и визуализация судовой системы зонального распределения постоянного тока» // 34-й ежегодный Североамериканский силовой симпозиум, Темпе, Аризона, октябрь 2002 г.
  2. Девайн Д.П., Т.Л. Ханнон, Л. Дж. Питерсон. «Анализ судовых электроэнергетических систем при сильном повреждении кабеля» // All Electric Ship Symposium, сентябрь 1998 г.
  3. Джон Дж. Сизки и Роберт В. Эштон. «Вопросы выбора и стабильности, связанные с зональной электрической распределительной системой постоянного тока военно-морского судна» // IEEE Transactions on Power Delivery, Том 15, № 2, стр. 665-669, 2000 г.
  4. Плесник Л., Т. Ханнон, Д. Девайн. «Интеллектуальное устройство обнаружения неисправностей для судовых энергетических систем» // All Electric Ship Symposium, июнь 2000 г.
  5. Солодовник Е., В. Гао, К. Брайс, Р. Дугал. «Зональные корабельные энергетические системы» // Материалы собрания Американского общества инженеров-мореходов, Арлингтон, Вирджиния, 24-26 марта 2003 г.
-