

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ТЕЛЕУПРАВЛЯЕМОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА С ПЕРЕДАЧЕЙ ЭНЕРГИИ ПО КАБЕЛЬ-ТРОСУ НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ В ПАКЕТЕ MATLAB/SIMULINK

Рулевский В.М.<sup>1</sup>, Ляпунов Д.Ю.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт Автоматики и электромеханики Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия (634034, г. Томск, ул. Белинского, 53), e-mail: rulevsky@niiuem.tomsk.ru

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия(634050, г. Томск, пр. Ленина, 30),e-mail: lyapunov@tpu.ru

В статье рассмотрены теоретические аспекты и вопросы моделирования системы электропитания телеуправляемого обитаемого подводного аппарата (СЭП ТНПА). В процессе научно-исследовательских, опытно-конструкторских работ, а также в образовательном процессе математическое моделирование является мощным инструментом исследования и проектирования систем различной сложности. Создана математическая модель СЭП ТНПА в программном пакете Matlab/Simulink. В процессе разработки модели производилась последовательная отладка работы каждого компонента системы в отдельности, после чего компоненты объединялись в систему, обеспечивающую требуемые показатели качества в основном канале энергопотребления СЭП ТНПА. Представлены осциллограммы токов и напряжений на нагрузке в разработанной модели СЭП ТНПА при сбросе и набросе нагрузки. Подтверждена адекватность модели на основе сравнения полученных характеристик с результатами натурных экспериментов.

Ключевые слова: система электропитания, телеуправляемый обитаемый подводный аппарат, математическая модель.

## MATHEMATICAL MODELING OF ELECTRIC POWER SUPPLY SYSTEM OF THE REMOTE-CONTROLLED UNDERWATER VEHICLE WITH ENERGY TRANSMISSION VIA LINE-CABLE IN MATLAB/SIMULINK SOFTWARE PACKAGE

Rulevskiy V.M.<sup>1</sup>, Lyapunov D.Y.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Scientific Research Institute of Automatics and Electromechanics of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia (53, Belinskiy st., Tomsk, 634034) e-mail: rulevsky@niiuem.tomsk.ru

<sup>2</sup>Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia (30, Lenin Ave., Tomsk, 634050), e-mail: lyapunov@tpu.ru

The article deals with the theoretical aspects and issues of the remote-controlled unmanned underwater vehicle electric power supply system mathematical modeling. In the process of scientific, R&D and educational activities mathematical modeling is a powerful tool for investigation and design of the systems of different complexity. The mathematical model of the power supply system in Matlab/Simulink software package is developed. During the development process the checkout of each component of the system was performed. Then the components were combined in a complex system which ensures the required quality indicators of operating modes in the main power consumption channel. Load current and voltage diagrams in the modes of instantaneous load decrease and increase are represented. The adequacy of the model based on the comparison of the characteristics obtained with the results of field experiments is confirmed.

Keywords: electric power supply system, remote-controlled unmanned underwater vehicle, mathematical model

В настоящее время использование телеуправляемых обитаемых подводных аппаратов в научно-исследовательских целях особенно актуально в связи с тем, что это дает возможность решения ряда важных научно-технических и промышленных задач [1], тогда как традиционные методы исследования (с надводных судов) не приносят желаемого результата.

Эффективность выполнения различного вида работ на морском дне с помощью телеуправляемых обитаемых подводных аппаратов (ТНПА) определяется в значительной

мере их энергетическим обеспечением, энерговооруженностью. Суммарная мощность потребителей энергии в ТНПА может достигать несколько десятков киловатт. Поэтому, выбор и проектирование системы электропитания (СЭП) имеет важное значение при разработке современных ТНПА.

Для ТНПА важнейшее значение имеет система электропитания, а именно преобразование и передача энергии по кабель-тросу. Передача энергии по кабель-тросу может осуществляться как на переменном, так и на постоянном токах[4]. Одним из решений по увеличению удельной мощности СЭП и повышению ее надежности является передача энергии по кабель-тросу (длинной до 8000 м) на переменном токе повышенной частоты (1÷2 кГц).

### **Цель исследования**

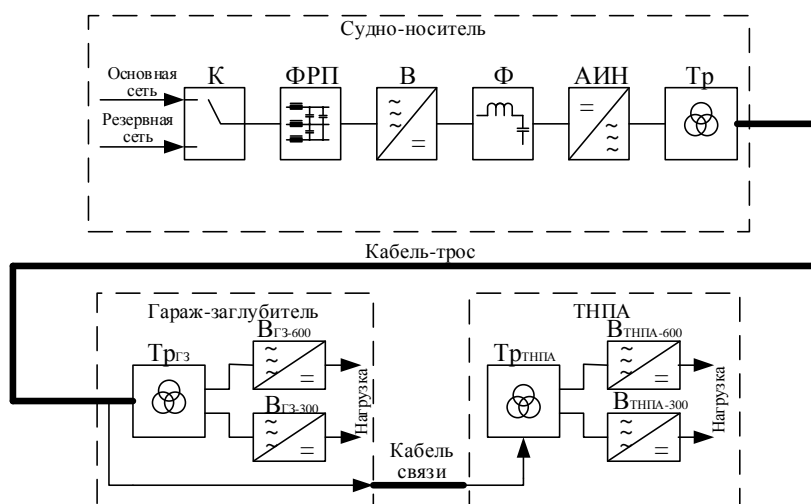
Целью работы является анализ особенностей математического моделирования СЭП ТНПА с передачей энергии по кабель-тросу на переменном токе повышенной частоты в пакете Matlab/Simulink.

Разработка математической модели СЭП ТНПА позволит решить ряд комплексных расчетных задач при проектировании и создании высокоэффективных СЭП ТНПА.

### **Объект исследования**

На рис. 1 представлен вариант СЭП ТНПА с передачей энергии по кабель-тросу на переменном токе повышенной частоты[3].

Бортовая часть СЭП ТНПА содержит коммутатор сети К, вход которого соединен с судовой сетью. С коммутатора К напряжение через фильтр радиопомех ФРП поступает на выпрямитель В, затем через фильтр Ф на трехфазный автономный инвертор напряжения АИН, который повышает частоту питающего напряжения до 1000 Гц. Выход инвертора АИН соединен с первичными обмотками повышающего трехфазного трансформатора Тр, который в свою очередь повышает напряжение до величины  $U_{л\grave{э}ф\phi}=1000\div 1500$  В, а вторичные обмотки которого соединены с кабель-тросом, связанным с первичными обмотками трансформатора Тр<sub>гз</sub> подводной части, установленной на гараже-заглубителе и кабелем связи. Вторичные обмотки согласующего трансформатора Тр<sub>гз</sub> соединены с выпрямителями В<sub>гз-600</sub> и В<sub>гз-300</sub>, формирующими питающие напряжения для гаража-заглубителя 600 и 300 В.



*Рис. 1. Система электропитания телеуправляемого необитаемого подводного аппарата с передачей энергии по кабель-тросу на переменном токе повышенной частоты*

С выхода кабеля связи напряжение поступает на первичные обмотки согласующего трансформатора  $Тр_{ТНПА}$ , расположенного на телеуправляемом необитаемом подводном аппарате. Вторичные обмотки согласующего трансформатора  $Тр_{ТНПА}$  соединены с выпрямителями  $В_{ТНПА-600}$  и  $В_{ТНПА-300}$ , формирующими питающие напряжения для подводного аппарата 600 и 300 В.

Основным каналом энергопотребления на борту ТНПА является канал электропитания двигателей подводного аппарата напряжением 300 В. Суммарная мощность потребления двигателей аппарата составляет до 70...80% от общей мощности энергопотребления системы в целом. В связи с этим дальнейшие исследования и анализ электромагнитных процессов, протекающих в СЭП ТНПА, а также математическое моделирование системы, проводятся для основного канала энергопотребления.

### **Математическое моделирование**

Для исследования и анализа электромагнитных процессов протекающих в СЭП ТНПА, построенных на базе статических преобразователей широко применяются методы математического моделирования. Математическое моделирование является способом исследования рассматриваемого объекта или характеристик изучаемого явления, основанным на использовании математического описания реальных физических процессов.

Аналитические методы исследования систем требуют проведения весьма трудоемких расчетов. При наличии в системах нелинейных элементов, элементов с переменными параметрами и других усложняющих расчеты факторов возможности аналитических методов ограничены.

В настоящее время при помощи современных компьютерных технологий, в основе которых лежат прикладные программные пакеты, имеется возможность более глубокого изучения вопросов, связанных с проектированием и исследованием электротехнических

комплексов со статическими преобразователями, чем и является СЭП ТНПА.

Специально для решения задач проектирования статических преобразователей и исследования процессов, протекающих в них, разработано значительное количество прикладных компьютерных пакетов, таких как Matlab/Simulink, PSpice, ElectronicsWorkbench, CircuitMaker и др. Подробное описание выше упомянутых прикладных пакетов для проектирования и исследования статических преобразователей приведено в [2].

Для исследования и анализа электромагнитных процессов протекающих в СЭП ТНПА был использован прикладной пакет Matlab/Simulink. Matlab/Simulink является интерактивной средой моделирования, предназначенной для исследования линейных и нелинейных динамических систем, состоящих из стандартных блоков, а также визуализации результатов исследования. Весомым преимуществом данного пакета является возможность объединения и совместной работы силовых схем и элементов систем управления.

Программный пакет Matlab/Simulink интерпретирует модель как систему дифференциальных уравнений и решает ее численными методами с учетом всех нелинейностей, заложенных в схеме. Метод решения дифференциальных уравнений и его параметры в данной работе подбирались экспериментально. Для моделирования использовался метод решения дифференциальных уравнений ode23tb, представляющий собой неявный метод Рунге-Кутты.

В процессе разработки модели СЭП ТНПА были приняты следующие допущения:

- 1) источник питания бортовой части, включающий в себя судовую сеть, фильтр радиопомех ФРП, выпрямитель В и фильтр Ф (рис. 1), представлен идеальным источником постоянного напряжения;
- 2) трансформаторы работают на линейном участке кривой намагничивания сердечников;
- 3) транзисторы АИН представляют собой идеальные ключи;
- 4) параметры кабеля связи включены в параметры кабель-троса, таким образом, рассматривается система с сосредоточенными параметрами.

Создание модели СЭП ТНПА осуществлялось последовательно, начиная от источника питания к нагрузке. При этом на каждой стадии моделирования проверялась адекватность работы каждого функционального узла системы, на основе результатов натурных экспериментов и методиках расчета параметров схем замещения системы и ее компонентов.

На рис. 2 представлена модель СЭП ТНПА с передачей энергии по кабель-тросу на переменном токе в пакете Matlab/Simulink. Функциональные блоки системы электропитания, обведенные штриховой линией соответствуют схеме, приведенной на рис. 1.

Система управления СЭП ТНПА (рис. 2) обеспечивает стабилизацию напряжения на

нагрузке в диапазоне  $\pm 10\%$  от номинального значения. Обратная связь организована по выходному напряжению АИН с использованием ПИ-регуляторов.

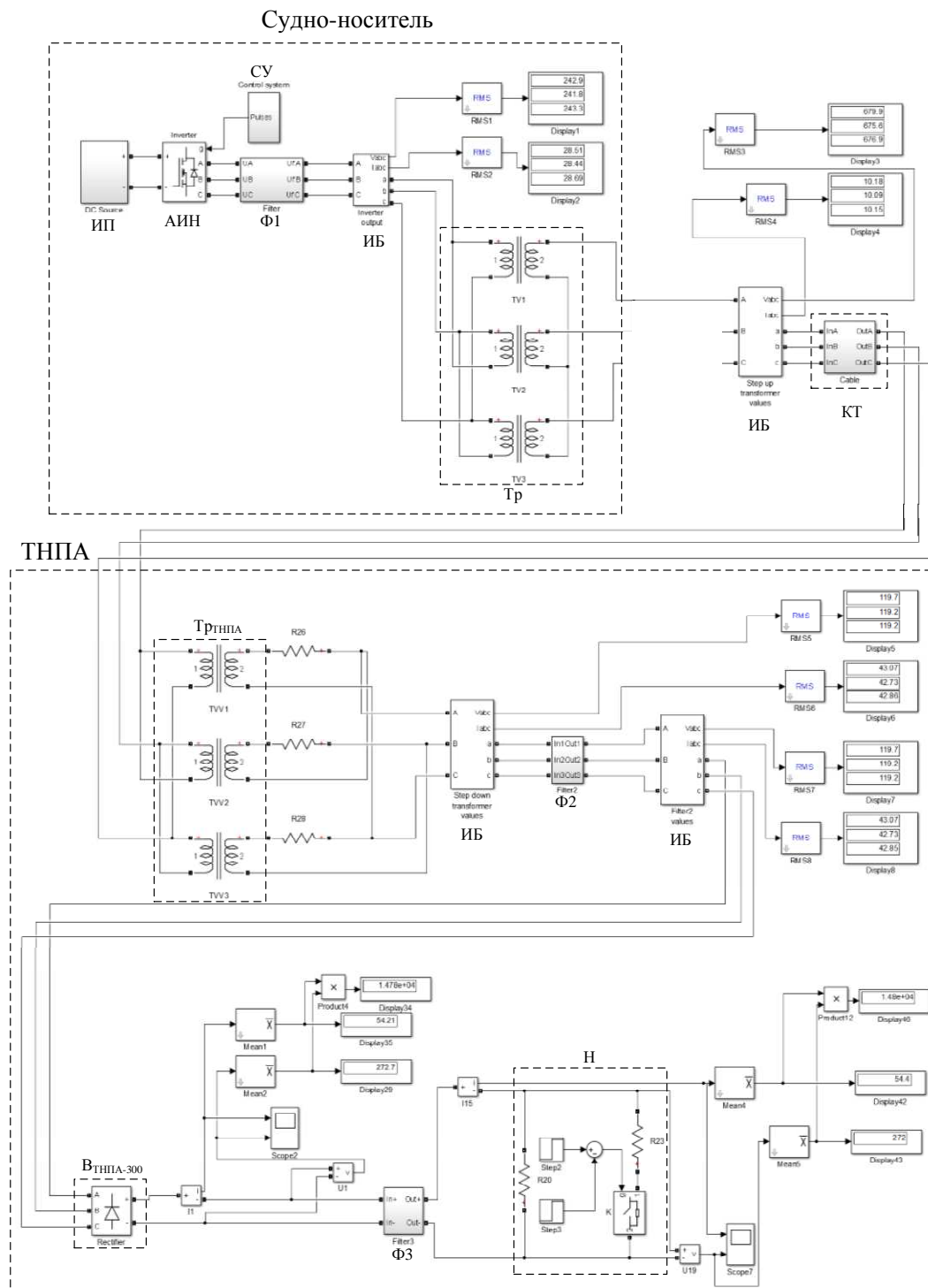


Рис. 2. Модель системы электропитания телеуправляемого необитаемого подводного аппарата с передачей энергии по кабель-тросу на переменном токе повышенной частоты ИП – источник питания; АИН – автономный инвертор напряжения; СУ – система управления; Ф1 – фильтр на выходе АИН; ИБ – измерительный блок; Tr – повышающий трансформатор; КТ – кабель-трос; TrТНПА – понижающий трансформатор; Ф2 – фильтр на выходе понижающего трансформатора; ВТНПА-300 – выпрямитель; Ф3 – фильтр на выходе выпрямителя; Н – нагрузка.

В качестве закона управления АИН был использован алгоритм векторной широтно-импульсной модуляции (ШИМ) с предмодуляцией третьей гармоники, который

обеспечивает увеличение амплитуды основной гармоники, при этом в спектре ШИМ помимо основной гармоники содержатся гармоники нулевой последовательности, т.е. гармоники, кратные трем. Тем самым обеспечивается отсутствие в низкочастотной части спектра фазных и линейных напряжений инвертора гармоник искажения[5].

### Результаты моделирования

На рис. 3 представлены осциллограммы выходного напряжения СЭП ТНПА при сбросе и набросе тока нагрузки, полученные на математической модели в пакете Matlab/Simulink.

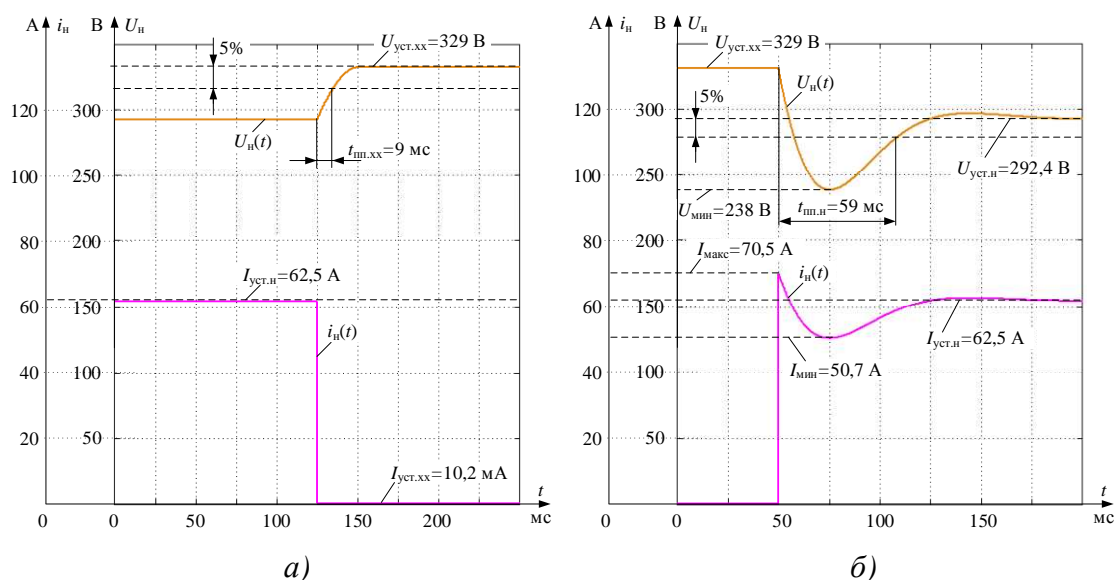
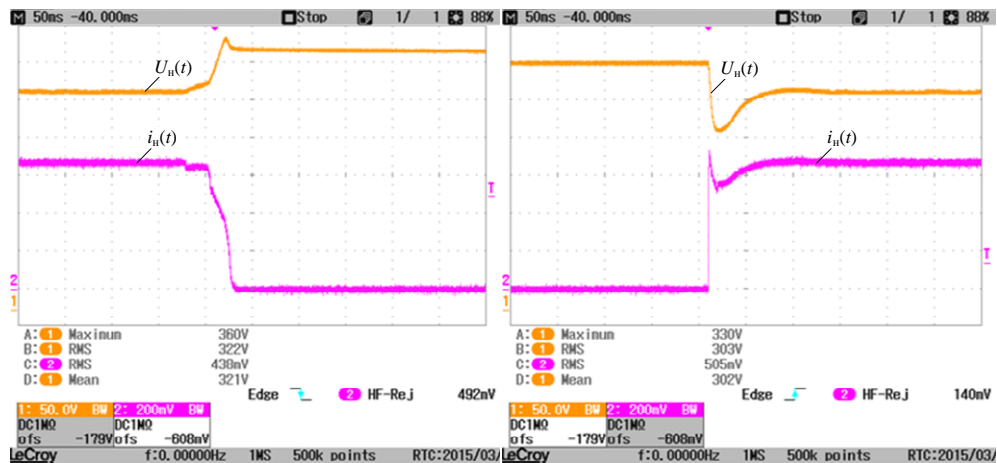


Рис. 3. Осциллограммы выходного напряжения СЭП ТНПА, полученные на математической модели в пакете Matlab/Simulink:

а) сброс тока нагрузки, б) наброс тока нагрузки

$U_{уст.н}$  – установившееся значение напряжения при номинальной нагрузке;  $U_{мин}$  – минимальное значение напряжения при переходном процессе;  $I_{уст.н}$  – установившееся значение тока при номинальной нагрузке;  $I_{мин}$  – минимальное значение тока при переходном процессе;  $t_{п.н}$  – время переходного процесса при ступенчатом изменении нагрузки от холостого хода до номинальной;  $t_{п.хх}$  – время переходного процесса при ступенчатом изменении нагрузки от номинальной до холостого хода

На рис.4 представлены осциллограммы выходного напряжения СЭП ТНПА при сбросе и набросе тока нагрузки, полученные экспериментально на макетном образце (рис.5).



a)

б)

Рис. 4. Осциллограммы выходного напряжения СЭП ТНПА, полученные экспериментально на макетном образце  
а) сброс тока нагрузки, б) наброс тока нагрузки



Рис. 5. Макетный образец системы электропитания телеуправляемого необитаемого подводного аппарата

1 – бортовая часть системы электропитания; 2 – пульт дистанционного управления; 3 – система электропитания телеуправляемого необитаемого подводного аппарата; 4 – система электропитания гаража-заглубителя

Сопоставление результатов математического моделирования СЭП ТНПА с передачей энергии по кабель тросу на переменном токе повышенной частоты в пакете Matlab/Simulink (рис. 3) с результатами экспериментальных исследований (рис. 4) показало, что расхождение во времени переходного процесса, перерегулировании при сбросе и набросе тока нагрузки составляет не более 10%. Количество пульсаций выходного напряжения в указанных режимах совпадает. Таким образом, полученные результаты подтверждают адекватность разработанной модели.

## Выводы

1. Разработана и подтверждена адекватность математической модели СЭП ТНПА с передачей энергии по кабель-тросу на переменном токе повышенной частоты в пакете Matlab/Simulink.

2. Математическая модель СЭП ТНПА позволяет исследовать статические и динамические режимы работы в процессе проектирования и создания высокоэффективных систем электропитания с погрешностью не более 10%.

### Список литературы

1. Войтов Д.В. Телеуправляемые необитаемые подводные аппараты. — М.: Моркнига, 2012. — 504 с.
2. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебное пособие. — СПб.: КОРОНА принт, 2001. — 320 с.
3. Мишин В.Н., Рулевский В.М., Юдинцев А.Г. Системы электропитания телеуправляемых подводных аппаратов переменного тока мощностью свыше 10 кВт // Известия Томского политехнического университета. — 2013. — Т. 322, № 4. — С. 107-110.
4. Рулевский В.М., Дементьев Ю.Н., Бубнов О.В. Системы электропитания подводных аппаратов // Известия Томского политехнического университета. — 2004. — Т. 307, № 5. — С. 120-123.
5. Чаплыгин Е. Е. Спектральное моделирование преобразователей с широтно-импульсной модуляцией. Учебное пособие по курсу «Моделирование электронных устройств и систем» для студентов специальности «Промышленная электроника». — М.: Изд-во МЭИ, 2009. — 56 с.

### Рецензенты:

Лукутин Б.В., д.т.н., профессор, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий Национального исследовательского Томского политехнического университета, г. Томск;

Шиняков Ю.А., д.т.н., директор Научно-исследовательского института космических технологий Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, г. Томск.