

РАЗРАБОТКА МОДУЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ И ДВИЖИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ТНПА ТЯЖЕЛОГО РАБОЧЕГО КЛАССА НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ

А.А. Шматков, П.В. Крутиков, А.Г. Шматков, Р.В. Олешко

За последние несколько лет в области подводной робототехники наметилась тенденция к переходу на полностью электрические ТНПА не только осмотра, но и рабочего классов мощностью более 100 кВт. Это стало возможным как благодаря существенному развитию технологий и элементной базы, так и вследствие общемирового тренда на переход к «зеленым» технологиям. Это, в свою очередь, позволило сформировать новый класс подводной робототехники – резидентные ТНПА, т.е. имеющие возможность постоянного базирования под водой без необходимости применения судна поддержки. Инициативная разработка комплекса ТНПА тяжелого рабочего класса (IMCA class III, B) связана с решением научно-технической проблемы, включающей в себя оптимизацию проектных параметров системы электропитания (СЭП) и движительного комплекса, выбор основных технологических и аппаратно-программных компонентов системы, максимальное снижение энергозатрат при работе СЭП. Для решения данной проблемы в рамках проекта проводились объектно-ориентированные исследования и вычислительные эксперименты по оптимизации параметров всех элементов, обеспечивающих эффективную работу СЭП. Даются обоснования ключевых моментов разработки модульных источников питания, элементов движительного комплекса и приводятся результаты испытаний прототипов комплекса ТНПА в реальных морских условиях.

Ключевые слова: ТНПА, телеуправляемый обитаемый подводный аппарат, робототехника, система электропитания, подводный движитель.

Введение

Проблема потерь энергии при передаче на дальние расстояния не потеряла своей актуальности со времен строительства первых электростанций. Однако особенно остро эта проблема проявляется при создании систем для передачи больших мощностей с поверхности океана на глубинах свыше 3–4 тысяч метров. Помимо значительного расстояния появляется несколько дополнительных факторов, которые диктуют необходимость поиска оптимальных методов передачи большой электрической мощности в глубоководных условиях. В первую очередь следует отметить критически важный параметр любой линии электропередачи: сечение проводников – чем оно больше, тем меньше потерь и тем большую мощность можно передать. В глубоководных условиях увеличение сечения проводников в кабеле не только

увеличивает его массу, но и диаметр, соответственно увеличивается грузонесущий элемент, что приводит к дальнейшему увеличению общего диаметра кабеля. Следовательно, необходимо увеличивать грузоподъемность судовых механизмов, габариты лебедок и т.д. При этом помимо удорожания кабеля за счет большего количества меди происходит не только увеличение стоимости остальных компонентов системы, но также вырастают затраты, в первую очередь за счет повышенного энергопотребления. В «войне токов», возникшей между Эдисоном и Вестингхаусом на заре возникновения линий электропередач, в условиях глубоких морей с учетом появления новых полупроводниковых устройств победу можно присудить постоянному току.

По типу используемой энергии ТНПА разделяются на электрические и гидравлические. В обоих случаях энергия передается на ТНПА че-

рез кабель-трос. Для снижения омических потерь в длинном кабеле единственным экономически оправданным решением является повышение напряжения до нескольких киловольт, а на борту подводного аппарата соответственно возникает необходимость в преобразовании высокого напряжения для дальнейшего распределения энергии между потребителями с различными параметрами электропитания. Поскольку на заре возникновения ТНПА не существовало компактных устройств преобразования электрической энергии большой мощности для обеспечения распределенного управления потребителями переменной мощности, то технологическое развитие пошло по пути преобразования электрической энергии в поток гидравлической жидкости, которым можно было управлять имеющимися промышленными решениями с минимальной адаптацией для использования под водой. В гидравлических подводных аппаратах электрическая энергия преобразовывается в энергию потока гидравлической жидкости без понижения напряжения и подается непосредственно на высоковольтный электропривод основной гидростанции, обеспечивающей работу движительного комплекса, гидравлического навесного оборудования и манипуляторного комплекса. В электрических ТНПА высоковольтное напряжение в кабель-тросе необходимо понизить до рабочих напряжений, а в случае использования переменного тока возникает необходимость дополнительного преобразования переменного тока в постоянный ток для питания движителей, боксов электроники и т.п.

До недавнего времени подавляющее большинство ТНПА тяжелого рабочего класса были гидравлическими. Одной из первых, в 2017 году, образец электрического подводного аппарата представила компания Oceanengineering – ТНПА eNovus (175 кВт / 235 л.с.). В 2019 году появились первые образцы электрических аппаратов на постоянном токе – компанией SMD был представлен новый электрический ТНПА тяжелого рабочего класса Quantum EV (200 кВт / 268 л.с.). Позднее также были опубликованы характеристики еще одного аналогичного ТНПА меньших размеров – Atom EV (102 кВт / 137 л.с.). В 2020 году был показан прототип резидентного электрического ТНПА интервенционного класса Saiprem Hydrono. Следует отметить, что все вышеперечисленные компании до этого производили и применяли в основном гидравлические ТНПА.

В 2021 году было принято решение начать инициативную разработку российского ТНПА тяжелого рабочего класса с рабочим названием «Оптимист

ЗК». Проведенный анализ иностранных технических решений и практический опыт выполнения работ на российском шельфе показал, что мощность подводного аппарата для успешного решения большинства подводно-технических задач должна составлять не менее 110 кВт (150 л.с.).

В процессе выбора системы электропитания ТНПА были учтены следующие факторы:

- на сегодняшний день в России отсутствуют производимые серийно комплектующие для гидравлических подводных аппаратов: подводные движители, построенные на базе мощных гидравлических моторов, прецизионные компактные распределительные клапаны из нержавеющей стали, регуляторы давления, фитинги и т.д.;

- в компании имеется существенный опыт не только разработки и производства, но и эксплуатации электрических ТНПА легкого рабочего класса (МСС-3000, MagMaster) и осмотрового класса с возможностью несения полезной нагрузки (МСС-1000, МСС-350М), а также необходимые компетенции в области разработки и изготовления комплектующих для глубоководного оборудования;

- основные объекты нефтегазовой отрасли на шельфе Российской Федерации располагаются в экологически чувствительных районах (Арктика, Сахалин, Камчатка, Чукотка и т.д.), поэтому при выполнении подводно-технических работ предпочтительным является использование экологически безопасных технологий;

- отчетливо прослеживаемый общемировой тренд на переход к «зеленым» технологиям, вследствие чего за последние несколько лет в области подводной робототехники наметилась тенденция к переходу на полностью электрические ТНПА, манипуляторные комплексы, дополнительное оборудование и инструмент;

- появление новых полупроводниковых приборов на основе карбида кремния (SiC), приведшее к переходу на качественно новый уровень в области силовой электроники и конструирования импульсных источников электропитания.

В связи с этим было принято решение приступить к проектированию электрического ТНПА тяжелого класса мощностью не менее 110 кВт, с системой электропитания модульного типа, с возможностью увеличения мощности, доступной для использования различными потребителями на борту подводного аппарата.

■ Обоснование выбора системы электропитания на постоянном токе

Переменный ток промышленной частоты 50/60 Гц не может применяться для передачи большой электрической мощности на борт ТНПА на больших дистанциях, поскольку трансформаторы для преобразования напряжения с использованием промышленных частот обладают значительными массогабаритными характеристиками. Для их уменьшения приходится применять частоты выше промышленных, что, в свою очередь, приводит к необходимости применения дополнительных устройств для борьбы с высокочастотными помехами. Следует отметить, что в случае гидравлических ТНПА данная проблема не является столь острой, поскольку технологически имеется возможность повышения напряжения судовым трансформатором без повышения частоты. При этом массогабаритными характеристиками можно пренебречь, передать по кабель-тросу необходимую энергию и затем, без дальнейшего преобразования, подать высокое напряжение напрямую на электропривод основной гидростанции, реализуемой на основе высоковольтных 3-фазных асинхронных электродвигателей. Но даже в этом случае судовой генератор должен иметь достаточный запас мощности или требуется применение дополнительных устройств для снижения пусковых токов, возникающих в момент включения электродвигателя.

В случае электрических ТНПА вопрос оптимизации как массогабаритных характеристик СЭП, так и удобства дальнейшего использования энергии, передаваемой на аппарат, имеет первостепенное значение. Очевидным способом уменьшения веса и габаритов трансформаторов и дросселей фильтров является увеличение частоты переменного тока до 400–1000 Гц, для чего производителями ТНПА применяются различные импульсные преобразователи. Так, система электропитания с рабочей частотой более 500 Гц применяется в ТНПА легкого рабочего класса МСС-3000 (Marine Geo Service), а система с рабочей частотой более 800 Гц – в ТНПА РТ-2500 (АО «Южморгеология»).

Однако даже в случае увеличения частоты выше 500 Гц индуктивные компоненты, такие как трансформаторы, дроссели и др., остаются достаточно громоздкими и, кроме того, имеют некоторые эксплуатационные особенности – такие как, например, магнитострикция. Вследствие эффекта магнитострикции система электропитания издает при работе громкий неприятный звук на несущей частоте. Кроме того, высокочастотные помехи могут вносить

дополнительное влияние в работу электронных компонентов ТНПА и навесного акустического оборудования.

Кроме того, многие электронные комплектующие не рассчитаны на работу с повышенными частотами и возникает необходимость в использовании специализированных устройств или их самостоятельной разработке. Так, из-за отсутствия на рынке доступных устройств контроля изоляции, предназначенных для работы в сетях переменного тока повышенной частоты, возникла необходимость в разработке и изготовлении собственной системы контроля изоляции с частотами в линии свыше 500 Гц.

Применение токов повышенной частоты с целью оптимизации габаритов трансформаторов систем электропитания на переменном токе (переход от 50 Гц к 400 Гц и более) приводит к увеличению реактивных потерь в линии передачи энергии. В свою очередь, это приводит к увеличению паразитного нагрева кабеля и уменьшению КПД системы электропитания в целом. В отдельных случаях это приводит к необходимости принудительного охлаждения кабель-троса на лебёдке.

Общепромышленная тенденция на цифровизацию промышленности, увеличение энергоэффективности и развитие «зеленых» технологий в последние годы ставит новые задачи для производителей силовой электроники. Поэтому разработка новых силовых полупроводниковых устройств для повышения КПД систем электропитания находится в приоритете во многих отраслях. Совершенствование элементной базы и разработка новых материалов позволили за последние несколько лет перейти на использование постоянного тока при передаче энергии на большие расстояния, поскольку по ряду параметров применение постоянного тока значительно превосходит традиционные системы передачи электроэнергии на переменном токе (табл. 1). Например, подобные системы используются при передаче энергии под водой от ветряных энергетических установок, приливных электростанций и т.п.

Системы передачи энергии на постоянном токе используются в маломощных ТНПА осмотрового класса, однако их мощность ограничивается первыми киловаттами [2, 3]. Увеличение мощности до недавнего времени было затруднительным, поскольку элементная база не позволяла эффективно преобразовывать постоянный ток и управлять им. Однако, как уже отмечалось выше, появление полупроводниковых приборов на основе карбида кремния (SiC) привело к переходу на качественно новый уровень в области силовой электроники и конструирования

Таблица 1. Сравнение преимуществ и недостатков технологий передачи энергии на переменном и постоянном токе (по материалам [1])

Показатель	HVDC высоковольтный постоянный ток	MVAC высоковольтный переменный ток
Тип передаваемой энергии	Постоянный ток	Переменный ток
Используемое напряжение	Высокое	Высокое и среднее
Передаваемая мощность	Не зависит от расстояния	Зависит от расстояния
Максимальное расстояние	Без ограничений расстояний	Требуются дополнительные подстанции
Потери при передаче энергии	Низкие	Высокие
Стоимость передачи энергии (инфраструктура)	Низкая: только два проводника, стоимость кабелей ниже	Высокая стоимость
Стоимость оборудования	Высокая	Низкая
Сложность оборудования	Высокая	Низкая

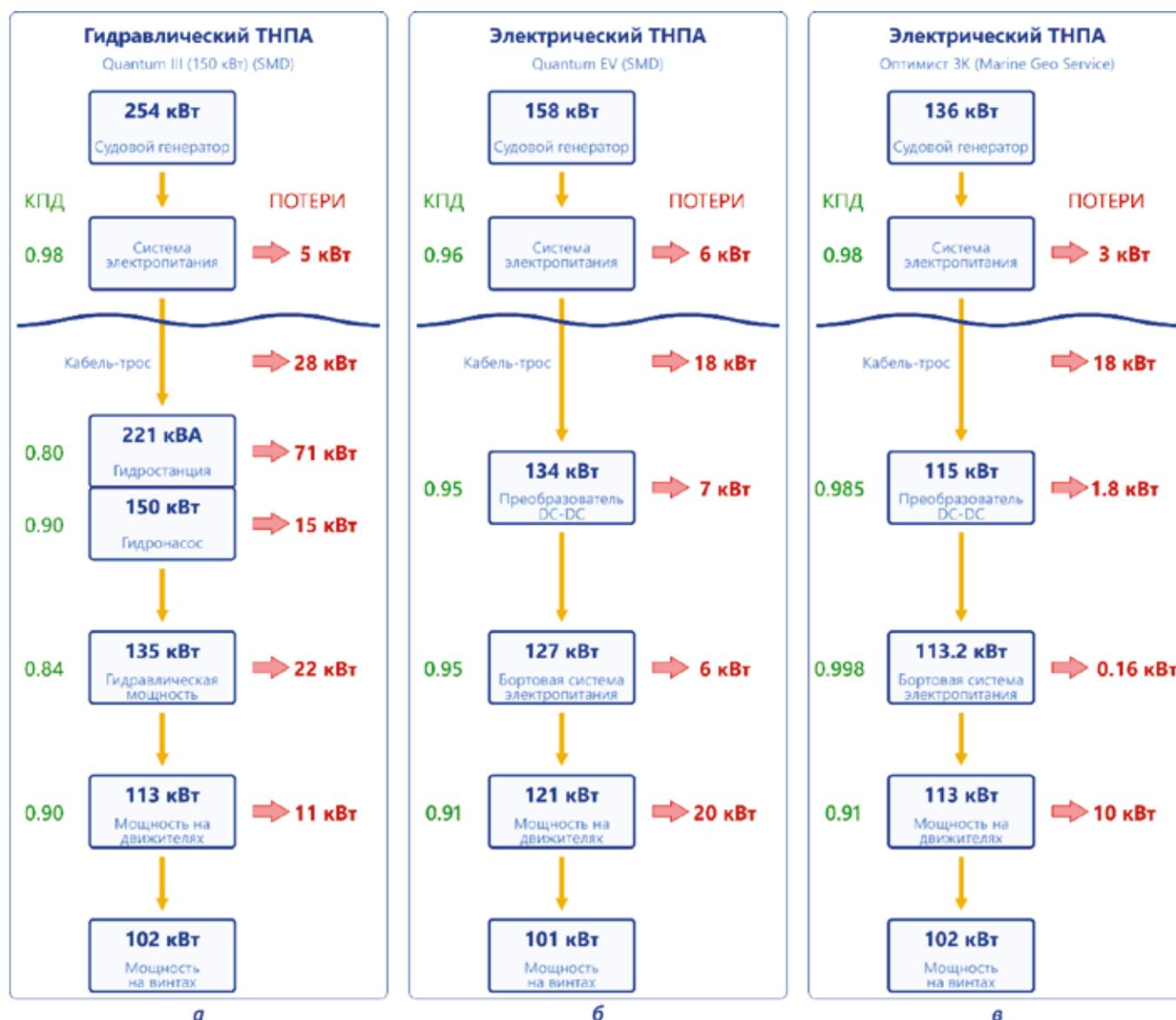


Рис. 1. Сравнение потерь энергии в различных ТНПА: гидравлическом (а), электрическом с СЭП на постоянном токе (иностранного производства) (б) и электрическом на постоянном токе (Marine Geo Service, Россия) (в) [4]

импульсных источников электропитания. С увеличением частоты переключения ключей уменьшились габариты индуктивностей, что привело к увеличению удельной мощности источников питания, и это открыло дорогу разработкам электрических ТНПА тяжелого рабочего класса, не уступающих по характеристикам гидравлическим аппаратам, а по ряду параметров – превосходящих их.

С точки зрения большинства промышленных приложений постоянный ток обладает рядом преимуществ перед переменным. Например, комплексные потери системы электропитания на постоянном токе меньше, чем на переменном – единственные потери идут только на сопротивление проводника, в то время как в системах с переменным током потери возникают на сопротивление, индуктивность и емкость линии передачи энергии. Системы на постоянном токе показывают до 10% большую эффективность, нежели системы на переменном токе при использовании одного и того же кабеля (рис. 1, а, б).

Требования по изоляции, предъявляемые к кабель-тросу, с использованием переменного тока выше, чем при постоянном токе. В связи с наличием паразитной ёмкости в изоляции проводников кабеля для СЭП на переменном токе необходимо применение кабелей с повышенными требованиями к изоляции токопроводящих жил. И эти требования повышаются с увеличением рабочей частоты передачи энергии, поскольку проникающая способность напряжения зависит от частоты.

Все факты, рассмотренные выше, способствовали разработке и созданию системы электропитания на постоянном токе, лишенной этих недостатков.

■ Результаты опытно-промышленной эксплуатации прототипа СЭП на постоянном токе

В 2019 году на базе серийного ТНПА МСС-3000 (IMCA class III, A – легкого рабочего класса)



Рис. 2. ТНПА МСС-1000 с системой электропитания на постоянном токе (Marine Geo Service, Россия)

был разработан и изготовлен ТНПА МСС-1000 (IMCA class II, B – осмотрового класса с возможностью несения полезной нагрузки). Объем плавучести и массогабаритные характеристики МСС-1000 аналогичны подводному аппарату SUB-fighter 7500 (Sperre AS, Норвегия) (далее – SF7500).

В первоначальной конфигурации МСС-1000 использовалась система электропитания переменным током с рабочей частотой 400 Гц, что, по сравнению с SF7500, позволило уменьшить массогабаритные характеристики подводного трансформатора и обеспечило дополнительные 15 кг грузоподъемности.

В 2020 году был начат эксперимент по опытно-промышленной эксплуатации ТНПА МСС-1000 на постоянном токе. Вместо традиционного трансформатора на ТНПА был размещен понижающий преобразователь постоянного тока (ПИТ 1000/300-15), состоящий из 4 модулей по 3 кВт каждый, размещенных в маслonaполненном корпусе. Таким образом, общая энерговооруженность ТНПА составила 12 кВт. Вследствие значительно меньших габаритов и веса СЭП грузоподъемность ТНПА увеличилась до 60 кг (табл. 2).

Таблица 2. Сравнение характеристик ТНПА Sperre SUB-fighter 7500 и МСС-1000

Характеристика	Sperre SUB-fighter 7500	МСС-1000 (переменный ток)	МСС-1000 (постоянный ток)
Вес (на воздухе), кг	380	390	390
Габаритный размеры (Д × Ш × В), мм	1400 × 810 × 770	1400 × 900 × 770	1400 × 900 × 770
Полезная нагрузка, кг	20	35	60
Мощность ТНПА, кВт	7.5	10	12
Система электропитания	900 В, 50 Гц	3300 В, 400 Гц	1150 В, постоянный ток
Количество двигателей	5	6	6
Мощность каждого двигателя, кВт	1.5	2.5	2.5

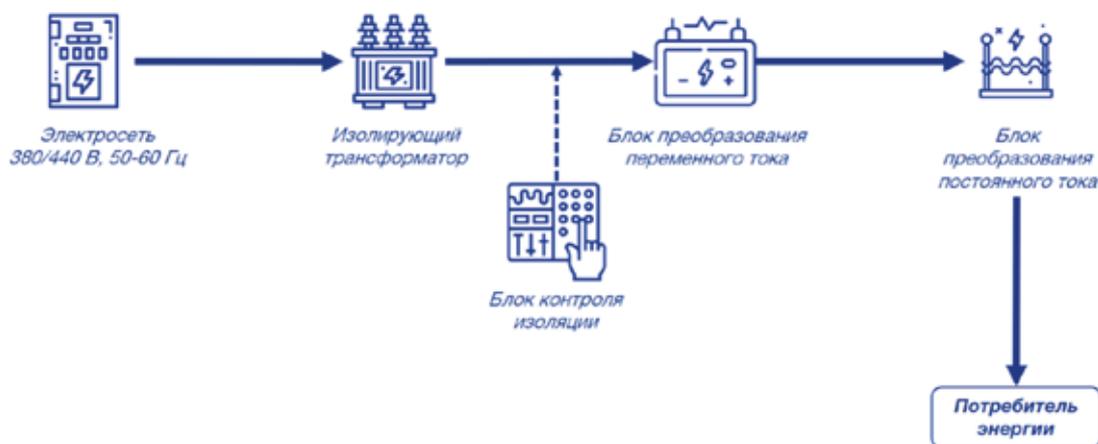


Рис. 3. Блок-схема системы электропитания ВИП 10К

В качестве набортного преобразователя энергии сначала использовался лабораторный источник питания иностранного производства (Тайвань), а затем был изготовлен источник питания (ВИП 10К), предназначенный для передачи на ТНПА стабилизированного высоковольтного напряжения.

Источник питания ВИП 10К включает в себя (рис. 3):

- изолирующий трансформатор для обеспечения гальванической изоляции линии постоянного тока (при работе в морских условиях);
- блок контроля изоляции и отключения всей системы в случае возникновения утечек (например, повреждение кабеля и т.д.);
- блок преобразования переменного тока промышленного стандарта (3 фазы, 380/440 В, 50–60 Гц) в постоянный ток высокого напряжения (1200–1400 В).

В окончательной конфигурации – с СЭП на постоянном токе – ТНПА МСС-1000 был задействован в ряде проектов на Черном, Азовском и Каспийском морях. На текущий момент система проработала более 500 часов под водой в штатном режиме. Технического обслуживания и ремонта ни подводной, ни набортной частей системы при этом не производилось. В ходе опытно-промышленной эксплуатации с помощью прототипа СЭП на постоянном токе были достигнуты следующие показатели:

- напряжение в кабельной линии составляет от 1100 до 1150 В (в зависимости от длины кабеля);
- фактические параметры передаваемой мощности по кабелю длиной 2350 метров с сечением токопроводящих жил менее 1.6 мм^2 – более 5 кВт;
- фактические параметры передаваемой мощности по кабелю длиной 375 метров с сечени-

ем токопроводящих жил менее 2.0 мм^2 – более 10 кВт;

- КПД до 96%.

Опыт эксплуатации показал, что система электропитания ТНПА на постоянном токе может быть успешно реализована и показатели эффективности достаточны для дальнейшего развития технологии, но с применением других методов преобразования энергии на борту судна.

■ Разработка модульного подводного источника питания на постоянном токе для ТНПА тяжелого рабочего класса

Перед началом разработки системы электропитания ТНПА на постоянном токе были проанализированы возможные варианты ее создания с точки зрения конструктивных особенностей.

Принципиально система электропитания ТНПА может быть выполнена в виде:

1. Единичного преобразователя энергии (например, трансформатора) на борту ТНПА, полностью обеспечивающего необходимой мощностью всех потребителей;

2. Нескольких единичных преобразователей энергии меньшей мощности, объединенных в единую систему через устройство, суммирующее мощности.

Несмотря на то что вторая схема организации электропитания является более трудоемкой с точки зрения ее реализации, было решено проектировать СЭП по этому принципу, поскольку он обладает рядом преимуществ:

- повышается общая отказоустойчивость системы – при выходе из строя единичного преобразователя энергии на борту ТНПА остается возможность на пониженной мощности



Рис. 4. Внешний вид понижающего преобразователя постоянного тока мощностью 20 кВт

продолжить выполнять работы или осуществить безопасный подъем аппарата на борт судна;

- уменьшаются массогабаритные характеристики единичных элементов системы, что позволяет в судовых условиях более просто и безопасно выполнять ремонт и обслуживание системы;
- возможно изменение конфигурации ТНПА и более быстрое проектирование новых аппаратов с учетом требований заказчика;
- возможно размещение модуля в «горячем» резерве на случай аварийной ситуации.

Таким образом, подводная часть разрабатываемой системы электропитания ТНПА на постоянном токе состоит из нескольких силовых модулей, объединенных с использованием устройства, суммирующего мощности.

На первом этапе был разработан понижающий преобразователь постоянного тока мощностью по-

рядка 20 кВт (рис. 4) на карбид-кремниевых (SiC) полупроводниках. Благодаря применению ключей с высокой скоростью переключения была достигнута большая удельная мощность преобразования энергии – около 4 кВт/л. Такие параметры преобразования энергии позволят значительно снизить общий вес ТНПА и получить дополнительное пространство на борту для размещения дополнительного оборудования.

Модули преобразователей (рис. 5) имеют в своем составе защитные контуры по входному и выходному току, превышению выходной мощности, а также защиту от перенапряжения на выходе. Модули выполнены в герметичных маслonaполненных боксах с прозрачными крышками, что позволяет производить оперативный визуальный контроль уровня масла, оценивать его состояние, а также наблюдать состояние светодиодных индикаторов, расположенных на платах преобразователя для контроля исправности и режимов работы.

Все компоненты силовых модулей прошли циклические испытания в камере высокого давления, и был сделан вывод о том, что изготовленный по данной технологии преобразователь энергии может использоваться на глубинах не менее 3000 метров.

В дальнейшем планируется разработать новую модификацию понижающего преобразователя постоянного тока, каждый силовой модуль которого будет иметь выходную мощность около 37 кВт. Суммарная мощность преобразователя, состоящего из 3 таких модулей, позволит обеспечить ТНПА необходимой энергетикой (более 110 кВт).

Следует отметить, что благодаря высокому КПД всех элементов системы электропитания подводный аппарат на постоянном токе значительно более эффективен, чем гидравлический ТНПА аналогичной мощности (рис. 1, а, в).

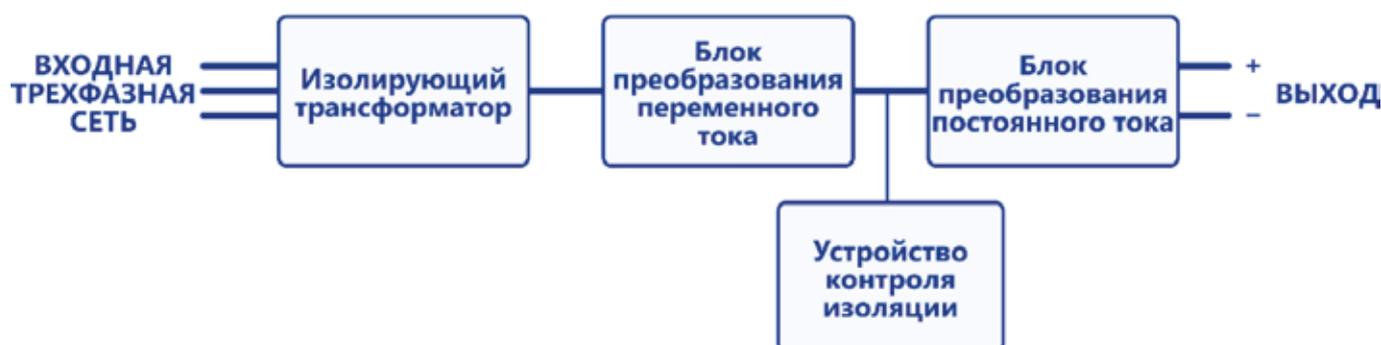


Рис. 5. Блок-схема понижающего преобразователя постоянного тока

■ Разработка модульной системы электропитания ТНПА тяжелого рабочего класса на постоянном токе

Наборная часть системы электропитания ТНПА тяжелого рабочего класса состоит из силовой установки, расположенной в 19-дюймовом шкафу и обладающей выходной мощностью 140 кВт. В шкафу расположены 7 источников электропитания (рис. 6) по 20 кВт каждый, плюс несколько источников в «горячем» резерве на случай непредвиденных обстоятельств, отказа или выхода из строя.



Рис. 6. Внешний вид одного модуля мощностью 20 кВт наборной части СЭП

Каждый источник выполнен по топологии «резонансный полномостовой LLC преобразователь». Благодаря большой частоте переключения источник имеет выдающийся КПД (порядка 98.5%) и высокую удельную мощность. Силовые элементы из карбида кремния (SiC) эксплуатируются в режиме мягкого переключения (ZVS режим), что способствует без-

опасному режиму работы и минимальному уровню помех. После преобразования полученное с резонансных трансформаторов напряжение выпрямляется, фильтруется, подвергается всем измерениям и подается на выход источника. Каждый источник имеет принудительное воздушное охлаждение с интеллектуальным управлением, благодаря которому обеспечиваются низкий уровень шума и долговременная работа вентиляторов.

Для безопасной работы всей системы электропитания верхняя силовая установка в своем составе имеет модуль контроля сопротивления изоляции постоянного тока, благодаря которому происходит непрерывный контроль состояния сопротивления глубоководного кабеля и ТНПА.

Отображение выходных параметров системы электропитания и устройства контроля сопротивления изоляции происходит на сенсорном дисплее, расположенном на лицевой панели источника, а также дублируется на рабочую станцию пилота ТНПА. Каждый источник имеет защиту по току, низкому или высокому напряжению на входе и перенапряжению на выходе. Удаленный мониторинг параметров каждого источника и передача информации о работе устройства контроля сопротивления изоляции выполняются по сети Ethernet. В случае обнаружения утечки система контроля мгновенно оповещает оператора о сложившейся ситуации, а если происходит фиксация предельно допустимого уровня, то система автоматически отключает высокое напряжение.

В результате сложения мощностей источников в верхней силовой установке формируется высокое напряжение постоянного тока (порядка 3000 В), которое затем подается на ТНПА по кабель-тросу.

На сегодняшний день созданы несколько опытных образцов и успешно проведена первая фаза испытаний источников, объединенных в единую систему (рис. 7).

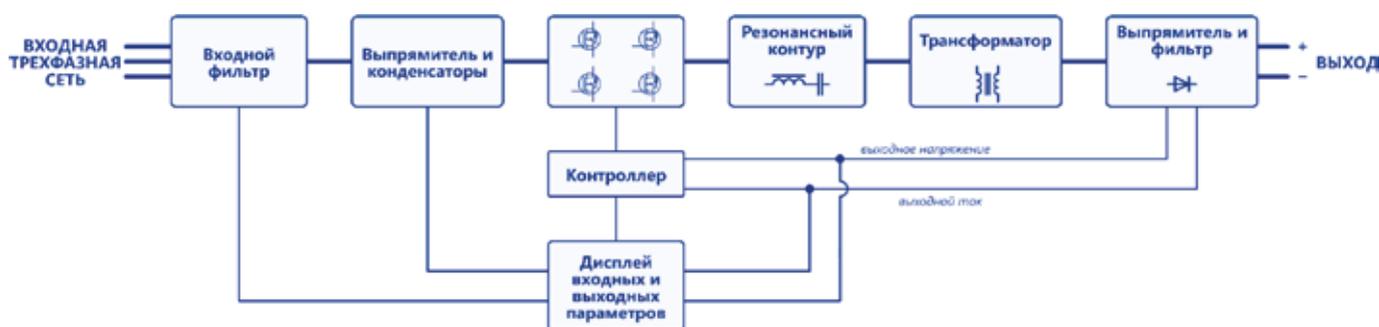


Рис. 7. Структурная схема одного модуля наборной силовой установки

■ Разработка двигателя и драйвера двигателя мощностью 20 кВт

Основными потребителями энергии на борту ТНПА являются двигательный комплекс и гидростанции для работы манипуляторного комплекса и различного гидравлического инструмента и/или дополнительного оборудования. При движении электрического ТНПА до точки выполнения подводно-технических работ гидравлическая система, как правило, не задействована и основная часть энергии потребляется двигателями. При выполнении операций под водой двигатели используются только для удержания ТНПА в позиции, их вклад в потребление менее значителен и основным потребителем становятся гидростанции.

В связи с вышеописанным двигательный комплекс является одним из основных элементов ТНПА, как определяющим основные характеристики ТНПА, так и накладывающим определенные требования на другие компоненты. Так, выбор двигателей неразрывно связан с параметрами системы электропитания ТНПА [3]. Очевидно, что для повышения эффективности параметры системы электропитания, двигательного комплекса и электрических приводов гидростанций должны быть согласованы между собой, чтобы не возникало необходимости дополнительного преобразования энергии.

Опыт практической эксплуатации ТНПА МСС-3000, МСС-1000 и MagMaster показал, что используемые в их составе подводные двигатели ДП-4500 (производитель – Marine Geo Service, Россия), основанные на вентильных электродвигателях, обеспечивают необходимую производительность (упор), просты в эксплуатации и могут долгосрочно работать в различных режимах эксплуатации. Поэтому в рамках проекта по разработке электрического ТНПА тяжелого класса было решено использовать аналогичные электродвигатели большей мощности (до 20 кВт и более с учетом дополнительных мер по отведению тепла).

Для управления подводным двигателем необходим соответствующий драйвер. В процессе проектирования драйвера двигателя условной мощностью 20 кВт было решено также использовать полупроводниковые приборы из карбида кремния (SiC), что в конечном итоге позволило повысить КПД изделия на 1.4% по сравнению с драйвером на IGBT транзисторах (по результатам лабораторных измерений). За счет повышения частоты переключения ключей была достигнута лучшая управляемость двигателем и обеспечен повышенный крутящий момент. Драйверы

двигателей имеют защиту от сквозного, среднего и пикового токов. В лабораторных условиях разработанные драйверы показали достаточно высокую отказоустойчивость.

В настоящее время ведутся работы по испытаниям двигателей в лабораторных условиях и затем драйверы будут размещены внутри маслonaполненного корпуса двигателя, благодаря чему будет обеспечено дополнительное охлаждение полупроводниковых приборов, а отсутствие соединительных межблочных кабелей упростит эксплуатацию и обслуживание. Также ожидается увеличение надежности и лучшая помехоустойчивость изделия.

Выводы

Благодаря существенному развитию технологий и элементной базы в настоящее время стало возможным создание электрических ТНПА тяжелого рабочего класса, что также важно вследствие перехода к «зеленым» технологиям в различных сферах хозяйственной деятельности. Одной из самых сложных задач является преобразование высоковольтной энергии постоянного тока до рабочих напряжений ТНПА. Появление новых полупроводниковых приборов на основе карбида кремния (SiC) привело к переходу на качественно новый уровень в области силовой электроники и позволяет использовать технологии передачи энергии на постоянном токе, обладающем рядом преимуществ.

Эксперименты, проведенные в рамках инициативной разработки комплекса ТНПА тяжелого рабочего класса (IMCA class III, B), и разработка опытных образцов компонентов системы электропитания на постоянном токе показывают, что разрабатываемые преобразователи энергии обладают следующими преимуществами (по сравнению с системами электропитания на переменном токе):

- высокий КПД преобразователей (до 98.5%) (без учета кабеля);
- небольшие массогабаритные характеристики;
- простота и надежность конструкции;
- низкий уровень электромагнитных и полное отсутствие акустических шумов;
- отсутствие реактивных токов;
- модульность конструкции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Introduction to HVDC Architecture and Solutions for Control and Protection // Texas Instruments. 2020. P. 1–20.
2. Герасимов В.А., Комлев А.В., Найдено Н.А., А.Ю. Филоженко. Исследование и разработка системы энергообеспечения привязного подводного робота с модернизированным источником электропитания // Подводные исследования и робототехника. 2021. № 3(37). С. 82–89. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_36_02_08.
3. The ROV Manual, Second Edition / R.D. Christ, R.L. Wernli Sr. // Butterworth-Heinemann, 2014. 679 p.
4. Greening, J. Robotic Propulsion Technology // Subsea UK Underwater Robotics Conference. 2020. P. 1–12.

Об авторах

ШМАТКОВ Алексей Алексеевич, главный геофизик, канд. техн. наук

Научно-технический центр Marine Geo Service (ООО «МГ-Сервис»)

Адрес: 353460, Краснодарский край, Геленджик, ул. Новороссийская, д. 180/1

Область научных интересов: подводная робототехника, морская геофизика, подводно-технические работы

E-mail: shmatkov@marinegeoservice.ru

КРУТИКОВ Петр Владимирович, инженер-электроник

Научно-технический центр Marine Geo Service (ООО «МГ-Сервис»)

Адрес: 353460, Краснодарский край, Геленджик, ул. Новороссийская, д. 180/1

Область научных интересов: подводная робототехника, силовая электроника ТНПА, передача энергии на постоянном токе

E-mail: krutikov@marinegeoservice.ru

ШМАТКОВ Алексей Георгиевич, технический директор

Marine Geo Service (ООО «МГ-Сервис»)

Адрес: 115407, Москва, Судостроительная улица, д.34, корп.1, с.2

Область научных интересов: подводная робототехника, передача энергии на постоянном токе, подводно-технические работы

E-mail: ash1@marinegeoservice.ru

ОЛЕШКО Руслан Владимирович, ведущий инженер-электроник

Научно-технический центр Marine Geo Service (ООО «МГ-Сервис»)

Адрес: 353460, Краснодарский край, Геленджик, ул. Новороссийская, д. 180/1

Область научных интересов: подводная робототехника, электроника ТНПА, системы передачи данных

E-mail: radist@marinegeoservice.ru

Для цитирования:

Шматков А.А., Крутиков П.В., Шматков А.Г., Олешко Р.В. РАЗРАБОТКА МОДУЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ И ДВИЖИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ТНПА ТЯЖЕЛОГО РАБОЧЕГО КЛАССА НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ // Подводные исследования и робототехника. 2021. № 4(38). С. 15–25. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_38_04_02.