

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ ПРИВЯЗНОГО ПОДВОДНОГО РОБОТА С МОДЕРНИЗИРОВАННЫМ ИСТОЧНИКОМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

В.А. Герасимов, А.В. Комлев, Н.А. Найдено, А.Ю. Филоженко

Исследованы и разработаны схемотехнические элементы системы энергообеспечения привязного подводного робота – привязного необитаемого подводного аппарата (ПНПА) в составе мобильного робототехнического комплекса освещения подводной обстановки. Актуальность задачи обусловлена модернизацией источника электропитания ПНПА, обеспечивающей его надежную работу в реальных условиях эксплуатации. Особенность задачи состоит в том, что энергообеспечение ПНПА сопровождается потерей напряжения на сопротивлении токоведущей жилы кабель-троса, связывающего ПНПА с обеспечивающим судном. Введение компаундирующего сигнала по току кабеля в закон регулирования напряжения питания позволяет компенсировать потерю напряжения, но приводит к перенапряжениям на нижнем конце кабеля в переходном процессе изменения нагрузки. В эксперименте при моделировании процессов электропитания вместо импортных программируемых источников «LAMBDA» использовались силовые AC/DC преобразователи отечественного производства. По программе научно-технического проекта разработан действующий макет системы регулирования напряжения, который использовался в вычислительном эксперименте. Предложенные схемотехнические решения в сочетании с введенной динамической коррекцией напряжения позволили получить требуемое качество электрообеспечения ПНПА. Результаты натурного эксперимента подтвердили правильность принятых модельных и схемотехнических решений.

Ключевые слова: привязной подводный аппарат (робот), электрообеспечение, кабель-трос, компаундирование по току, динамическая коррекция напряжения.

Привязные необитаемые подводные аппараты (ПНПА) относятся к классу робототехнических систем и находят широкое применение для исследования и освоения Мирового океана. Особенностью ПНПА является наличие кабеля (кабель-троса), по которому осуществляются электроснабжение и передача информации, а также механическая связь с судном-носителем. К данному классу подводных роботов относятся телеуправляемые необитаемые подводные аппараты (ТНПА) или, по международной классификации, Remotely Operated Vehicles (ROV) [1].

Для уменьшения гидродинамического сопротивления кабеля и повышения маневренности ПНПА сечение кабеля следует уменьшать, однако при этом также уменьшается сечение токоведущих жил и, соответственно, увеличивается электрическое со-

противление [1]. Для снижения потери напряжения в кабеле при передаче электроэнергии приходится увеличивать напряжение питания, максимальное значение которого ограничивается предельными допустимыми значениями параметров элементов цепи передачи (разъемы, кабель, допустимое входное напряжение преобразователей энергии и др.). Особенность системы электрообеспечения ПНПА на постоянном токе состоит и в том, что потребителем электроэнергии является преобразователь питания DC-DC на ПНПА. Это ограничивает еще и минимальное значение напряжения, являющееся нижней границей допустимого диапазона питания такого преобразователя [2].

Базовая структура энергообеспечения ПНПА на постоянном токе показана на рис. 1. Источник питания на судне обеспечения со стабилизированным

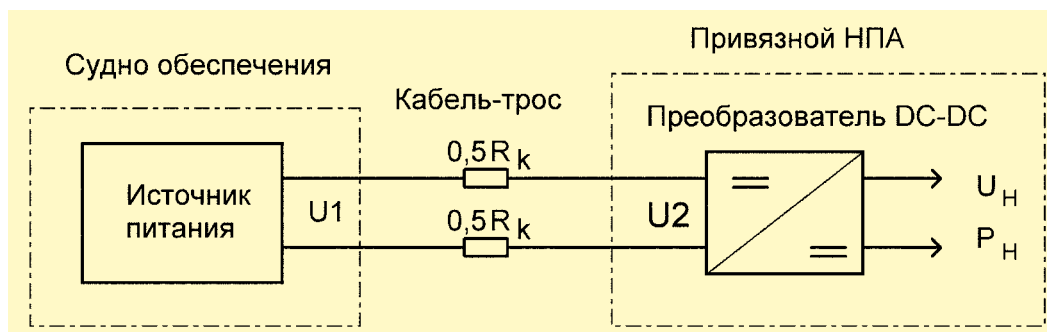


Рис. 1. Базовая структура системы энергообеспечения ПНПА

выходным напряжением U_1 подключен к токоведущим жилам (ТВЖ) на верхнем конце кабель-троса. Напряжение U_2 на нижнем конце кабель-троса является входным напряжением преобразователя DC-DC, который питает нагрузку ПНПА с номинальным напряжением U_H и мощностью P_H .

Токоведущие жилы кабель-троса имеют сопротивление постоянному току R_k , которое пропорционально длине кабель-троса и зависит от температуры нагрева ТВЖ. В общем случае не вся длина кабель-троса может быть погружена в воду, т.е. некоторая его часть остается на барабане лебедки на борту обеспечивающего судна и имеет ограниченные условия охлаждения.

Преобразователь напряжения DC-DC является потребителем мощности, т.е. при изменяющемся напряжении U_2 на его входе и заданной мощности нагрузки будет изменяться входной ток I_k преобразователя так, чтобы обеспечить эту мощность.

При этом уменьшение напряжения U_2 , вызванное падением напряжения на сопротивлении R_k , приведет к увеличению тока через ТВЖ кабель-троса, что вызовет еще большее уменьшение напряжения на входе преобразователя напряжения и, соответственно, дальнейшее увеличение его входного тока. Очевидно, при некотором сочетании параметров подобная система становится неустойчивой и передача энергии прекращается.

Решение проблемы поддержания отклонения напряжения на нижнем конце кабеля в заданном диапазоне для системы электроснабжения ПНПА может быть достигнуто разными путями, например:

- повышением выходного напряжения источника питания на судне U_1 ; при этом уменьшится ток кабеля I_k при сохранении постоянства потребляемой мощности преобразователем. Тем самым уменьшается влияние тока на изменение входного напряжения преобразователя U_2 ;
- использованием системы автоматического регулирования напряжения на выходе источника питания

на судне U_1 в зависимости от изменения тока нагрузки DC-DC преобразователя. При этом такая система должна обладать достаточным быстродействием, чтобы избежать возникновения перенапряжения на входе DC-DC преобразователя при резком сбросе нагрузки.

Очевидно, что рациональным решением будет сочетание этих двух способов. Так, решение проблемы значительного отклонения напряжения на нижнем конце кабеля для системы электроснабжения (СЭС) ПНПА на переменном токе высокого напряжения рассматривалась в статьях [3, 4]. В [3] для ПНПА с глубиной погружения до 6000 м использовалась СЭС 3500 В частотой 400 Гц, для которой также была предложена система регулирования напряжения при изменении нагрузки на основе ПИД-контроллера и обратных связей по активному току нагрузки ПНПА и напряжению на верхнем конце кабеля. В [4] для ПНПА с глубиной погружения до 8 км рассматривалась высоковольтная СЭС 1900 В частотой 1000 Гц, где также применялась система автоматического регулирования напряжения с обратной связью по напряжению на верхнем конце кабеля. В общем случае электроснабжение ПНПА эффективнее осуществлять на постоянном токе, так как при том же диаметре кабеля на постоянном токе можно передать большую мощность.

Для СЭС постоянного тока, используемой в разработке многофункционального комплекса освещения подводной обстановки, выполненной в ИПМТ ДВО РАН, в закон регулирования напряжения питания ПНПА в верхней точке кабеля была введена компаундирующая связь по току нагрузки. При этом напряжение питания изменялось в зависимости от тока нагрузки так, что в нижней точке кабеля, т.е. на входе преобразователей DC-DC, напряжение оставалось в допустимых пределах. Потребляемая мощность источника питания ПНПА составляет 4500 Вт, при этом на нагрузку ПНПА приходится 2400 Вт, остальное, в основном, потери в кабеле. Длина кабе-

ля составляет 600 м при полном сопротивлении ТВЖ 23 Ом.

В качестве источника питания в указанном комплексе использовались два программируемых блока питания «*LAMBDA*», каждый мощностью 2400 Вт и с максимальным выходным напряжением 600 В, включенных параллельно. Питание нагрузки ПНПА осуществляется через четыре DC-DC преобразователя типа PAF-600 мощностью 600 Вт каждый с входным напряжением (200 ... 400) В и выходным стабилизированным напряжением 48 В. Основной нагрузкой PAF-600 являются гребные двигатели ПНПА.

Компаундирующая связь по току нагрузки, введенная в закон регулирования выходного напряжения источника питания, обеспечивала поддержание напряжения в нижней точке кабеля на входе преобразователя в пределах (200 ... 400) В, что соответствует техническим требованиям на PAF-600 [5].

Вместе с тем опыт эксплуатации ПНПА показал не всегда устойчивую работу системы регулирования напряжения. При этом не наблюдалось какой-либо однозначной связи между внешними условиями и отказами системы. Возможной причиной этого являлось лабораторное исполнение источников с ограниченным допустимым диапазоном климатических воздействий.

Вследствие этого, а также с учетом планируемого тиражирования комплекса, которое должно удовлетворять требованиям импортозамещения, была поставлена задача модернизации источника питания ПНПА. Источник должен иметь выходную мощность не менее 4500 Вт при его загрузке, не превышающей 70 % от номинального значения; напряжение на нижнем конце троса, т.е. на входе DC-DC преобразователей PAF-600, должно обеспечиваться в пределах (210 ... 390) В при изменении нагрузки преобразователей в рабочих режимах эксплуатации в пределах (5 ... 100) %. В аварийном режиме, например при отключении защиты одного модуля PAF-600, что соответствует сбросу максимум 25 % нагрузки, перенапряжение на входе PAF-600 не должно превышать допустимое значение 400 В. Входные характеристики источника должны быть согласованы с судовой однофазной сетью переменного тока 220 В, 50 Гц.

Анализ отечественной номенклатуры мощных AC/DC преобразователей привел к выбору серии КАН, в частности, к преобразователю КАН5000Ц300 от российского производителя «КВ-системы», г. Воронеж, с параметрами [6]:

- мощность – 5000 Вт;
- номинальное выходное напряжение – 300 В;

– диапазон регулировки выходного напряжения – от 50 до 300 В;

– переходное отклонение выходного напряжения при сбросе – набросе нагрузки 10–100–10 % – не более 5 % от номинального напряжения;

– длительность переходного отклонения – 20 мс;

– КПД – 91 %;

– допускается последовательное включение;

– интерфейс управления RS-485, изолированный;

– температура рабочая – минус 20 ... плюс 50°C, хранения – минус 55 ... плюс 70°C.

При номинальной нагрузке ПНПА, составляющей 2400 Вт, и напряжении на входе PAF600 в пределах (210 ... 390) В, с учетом КПД этих преобразователей ток в кабеле будет находиться в пределах

(12,6 ... 6,8) А. При этом на сопротивлении R_K ТВЖ кабеля будет происходить падение напряжения от 252 В (при токе 12,6 А) до 136 В (при токе 6,8 А). Если принять номинальное значение на входе PAF600 ближе к верхней границе, например равным 350 В, то падение напряжения на кабеле составит 150 В. В этом случае удовлетворить поставленным требованиям по входным характеристикам нижнего преобразователя PAF600 в полном диапазоне нагрузок можно путем использования двух преобразователей КАН5000Ц300, включенных последовательно. При этом один из них должен иметь неизменное выходное напряжение 300 В, а второй, регулируемый – от минимального значения 50 В до максимального 300 В. В этом случае при холостом ходе результирующее выходное напряжение источника составит 350 В, а при его нагрузке компаундирующая связь по току будет соответствующим образом увеличивать выходное напряжение, компенсируя потерю на кабеле.

Для управления преобразователем целесообразно использовать специализированный контроллер серии КИП, выпускаемый тем же производителем и согласованный по характеристикам с КАН5000Ц300. Наличие аналогового входа и изолированного интерфейса RS-485 позволяет легко реализовать указанную компаундирующую связь по току нагрузки.

Таким образом, предлагаемый к модернизации источник питания представляет собой комплект из двух преобразователей КАН5000Ц300, входы которых соединены параллельно и подключены к судовой сети 220 В, 50 Гц, а выходы – последовательно. При этом в статическом режиме обеспечиваются компенсация падения напряжения на кабеле в заданном диапазоне нагрузок ПНПА и поддержание напряжения на нижнем конце кабеля с достаточной точностью, которую, при необходимости, можно повысить путем

учета изменения сопротивления ТВЖ кабеля от температуры.

Вместе с тем, заслуживают особого внимания динамические режимы работы системы электрообеспечения ПНПА, поскольку принятый для модернизации источник КАН5000Ц300 имеет пониженное быстродействие, определяемое интерфейсом RS-485. При набросе нагрузки на нижнем конце кабеля будет происходить провал напряжения за счет запаздывания в контуре регулирования, а при снятии нагрузки – заброс напряжения. Максимальные значения этих отклонений напряжения определяются как интенсивностью процесса сброса–наброса нагрузки, так и соотношением параметров выходного фильтра источника питания наверху кабеля и входного фильтра на нижнем конце кабеля. Выше было указано, что напряжение на входе нижнего преобразователя PAF600 не должен выходить за пределы (200 ... 400) В. Нарушение этого требования может привести к выходу системы электрообеспечения из строя. При этом по предъявленным условиям модернизации источника питания ПНПА доступными для конструктивной корректировки являются только фильтр на входе PAF600 и характеристики управляющего сигнала на входах блоков управления гребными двигателями ПНПА при набросе нагрузки. Режим сброса нагрузки каким-либо модификациям недоступен.

Задача коррекции системы регулирования напряжения может быть решена с использованием математического моделирования источника питания совместно с каналом передачи электроэнергии и нагрузкой в сочетании с натурными испытаниями макета этого комплекса. При этом целью натурного

эксперимента является определение динамических параметров системы в некотором ограниченном диапазоне состояний, результаты которого можно использовать для настройки математической модели, а задачей математической модели – исследование системы в полном диапазоне изменения условий работы. Кроме того, сочетание натурального эксперимента и моделирования позволяет держать под контролем верификацию модели и достоверность результатов моделирования.

Внешний вид установки для натурального эксперимента и вид регистрируемых сигналов показаны на рис. 2.

Структурно систему регулирования напряжения питания ПНПА можно представить, как показано на рис. 3. Возмущающим воздействием в системе является изменение эквивалентной нагрузки $P_{21}(s)$ на выходе DC-DC преобразователя на борту ПНПА, а контролируемой реакцией – изменение напряжения $U_{22}(s)$ на входе этого преобразователя. Соответствующее преобразование сигналов системы отображается на рис. 3 определенными функциональными блоками и связями между ними, при этом координаты системы в отклонениях, показанных в изображениях по Лапласу, описываются системой уравнений (1).

$$\left. \begin{aligned} P_{22}(s) &= P_{21}(s) \cdot W_3(s) \\ I(s) &= P_{22}(s) / U_{22}(s) \\ U_{дт}(s) &= I(s) \cdot K_{дт} \\ U_{к2}(s) &= U_{дт}(s) \cdot R \cdot W_1(s) \\ U_1(s) &= U_0(s) + U_{к2}(s) \\ U_{21}(s) &= U_1(s) - I(s) \cdot R \\ U_{22}(s) &= U_{21}(s) \cdot W_2(s) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

а



б

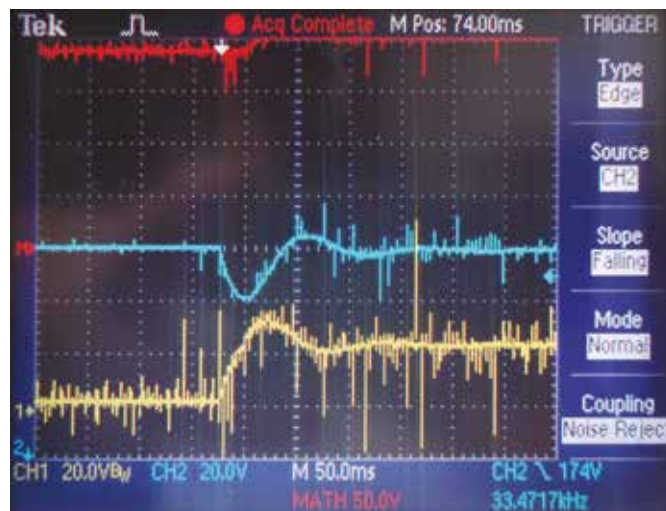


Рис. 2. Натурный эксперимент:

а – общий вид макета; б – вид регистрируемых переходных процессов

где $P_{22}(s)$, $P_{21}(s)$ – мощности на входе и на выходе DC-DC преобразователя на борту ПНПА; $I(s)$ – ток в кабеле; $U_{22}(s)$ – напряжение на входе DC-DC преобразователя; $U_{k2}(s)$ – падение напряжения на ТВЖ кабеля; $U_1(s)$ – выходное напряжение верхнего преобразователя КАН5000Ц300, формируемого как сумма уставки $U_0(s)$ и сигнала $U_{k2}(s)$ компаундирующей связи по току; $K_{дт}$ – коэффициент передачи датчика тока; R_k – сопротивление ТВЖ кабеля; $W_1(s)$, $W_2(s)$, $W_3(s)$ – динамические звенья, отображающие запаздывания в обработке сигналов.

Представление приведенных уравнений в операторной форме через передаточные функции предполагает выполнение линеаризации операции деления, показанной в приведенной структуре. Кроме того, для первого приближения динамические связи $W_1(s)$, $W_2(s)$, $W_3(s)$ между координатами представлены в виде линейных дифференциальных уравнений первого порядка, что упрощает получение аналитической зависимости между входным воздействием в виде изменения мощности $P_{21}(s)$ и соответствующей реакцией $U_{22}(s)$.

Вместе с тем, при сопоставлении результатов натурного эксперимента и математического моделирования необходимо учитывать, что в действительности в контроллере КИП в канале обработки управляющего сигнала присутствует чистое запаздывание $e^{-\tau s}$ с постоянной времени τ , определяемой работой интерфейса RS-485.

Результирующая передаточная функция имеет вид:

$$W(s) = \frac{U_{22}(s)}{P_{21}(s)} = \frac{\psi R_k T_1 s}{2\psi U_{22}^0 T_1 T_2 s^2 + (T_1 + 2\psi U_{22}^0 T_2)s + 1} \cdot \frac{K_3}{1 + T_3 s}, \quad (2)$$

где $\psi = 1/(2U_{22}^0 - U_0)$; T_1 , T_2 , T_3 – постоянные времени динамических звеньев первого порядка $W_1(s)$, $W_2(s)$, $W_3(s)$ соответственно.

Выражение (2), с учетом его приближенного характера, можно использовать для качественной оценки функциональных взаимосвязей между параметрами системы и ее реакцией на входное воздействие. Так, из выражения (2) следует условие положительности коэффициентов характеристического уравнения, являющееся необходимым и достаточным условием устойчивости. Кроме того, коэффициент демпфирования оказывается пропорционален постоянной времени T_2 , которая определяется звеном $W_2(s)$. Понимая под этим звеном емкостной фильтр первого порядка, для снижения колебательности процесса регулирования и уменьшения перенапряжений на входе DC-DC преобразователя получаем рекомендацию в виде увеличения емкости конденсатора фильтра. Максимальная емкость фильтра ограничена размерами прочного контейнера, который можно использовать для установки конденсатора, и составляет 820 мкФ при допустимом напряжении 450 В.

Исследования системы на математической модели с вариациями параметров фильтра и в натурном эксперименте на макете с выбранным фильтром показали правильность принятых решений. Полученные результаты приведены на рис. 4.

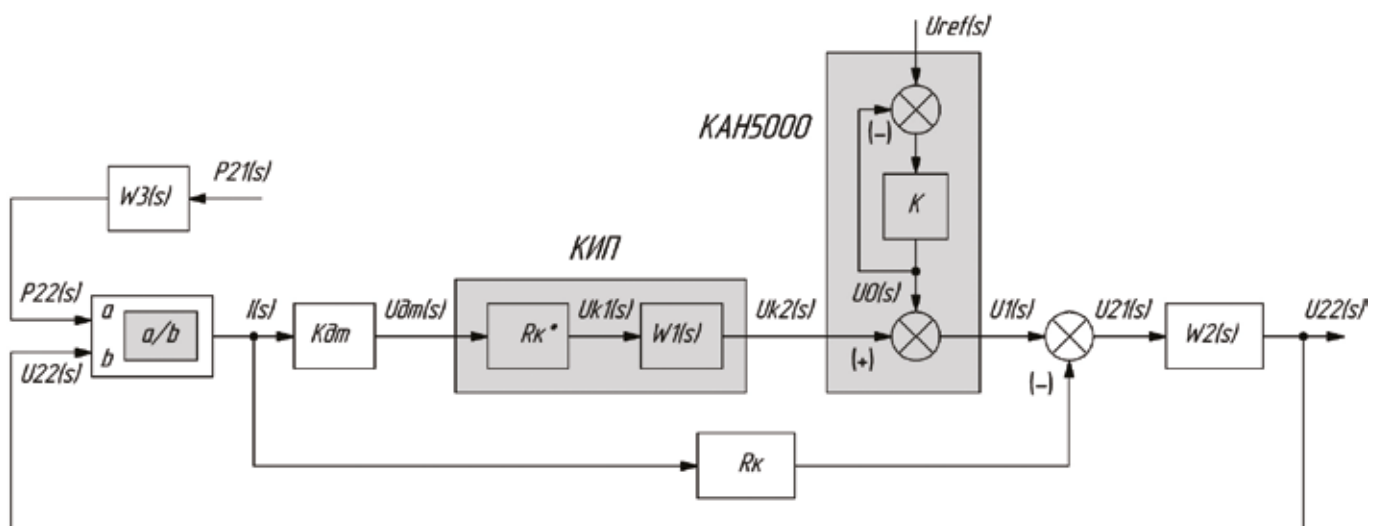


Рис. 3. Структура системы регулирования напряжения питания ПНПА

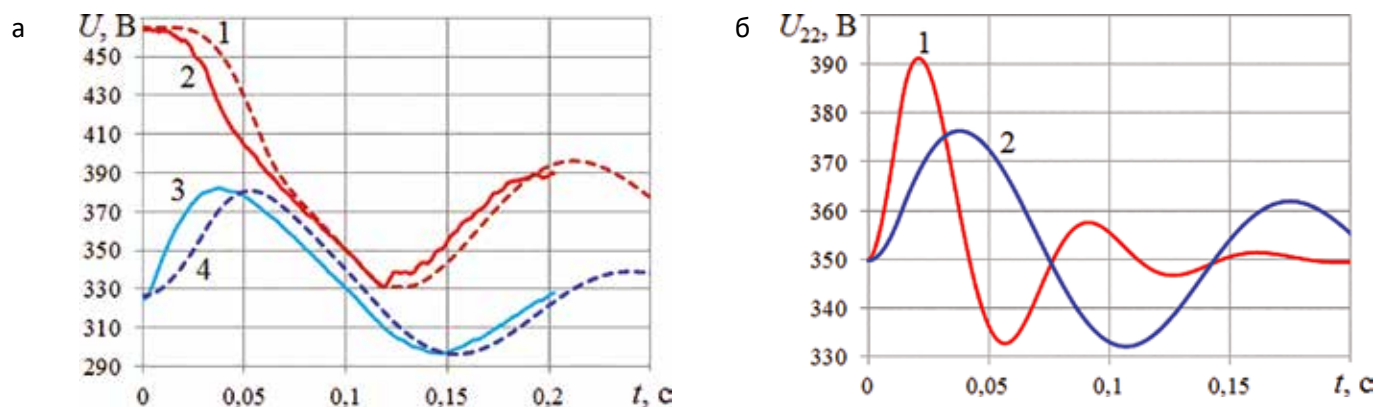


Рис. 4. Результаты исследования системы электрообеспечения ПНПА:

а – режим сброса нагрузки (1, 4 изменение тока в кабеле и напряжения на его нижнем конце в модели; 2, 3 – то же, в макете); б – изменение напряжения на нижнем конце кабеля в модели при изменении емкости конденсатора (1 – исходное значение емкости на входе DC-DC преобразователя 200 мкФ, 2 – скорректированное суммарное значение емкости 1060 мкФ)

Экспериментальные переходные характеристики (графики 2, 3 на рис. 4, а) получены путем усреднения 50 точек измерения регистрируемых в эксперименте координат (рис. 2, б) за время 5 мс. Хорошая повторяемость и устойчивость сигналов определяется, в том числе, некоторыми схемотехническими решениями, например введением гальванической развязки при измерении тока и использованием изолированного интерфейса RS-485 контроллера КИП.

Эффект от введения корректирующего фильтра на входе DC-DC преобразователя иллюстри-

руется графиками на рисунке 4, б, где показаны переходные процессы изменения напряжения на входе этого преобразователя при сбросе 30 % нагрузки, значение которого определялось практическими возможностями экспериментального стенда и превышало реальное вероятно возможное значение (25 %). Тем самым эксперимент проводился в более жестких условиях по сравнению с реальной ситуацией, и его результаты показывают надежное ограничение входного напряжения преобразователя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wernly R. The ROV Manual: A User Guide for Observation-Class Remotely Operated Vehicles. Oxford: Elsevier Ltd, 2007. 679 p.
2. Герасимов В.А., Львов О.Ю. Организация информационного и энергетического взаимодействия с глубоководным буксируемым подводным модулем // Восьмая Всерос. НТК «Технические проблемы освоения мирового океана»: материалы конф. Владивосток: ИПМТ ДВО РАН, 2019. С. 359–366.
3. Qi Chena, Zhaobing Liub. A novel voltage regulation strategy for the electric power delivery system of a 6000-m ROV // Applied Ocean Research, 2018. 6 p.
4. Правикова А. А. Система электроснабжения телеуправляемого подводного аппарата / А. А. Правикова, Д.Ю. Ляпунов // Современные технологии, экономика и образование : сб. материалов II Всерос. науч.-метод. конф. Томск, 2–4 сентября 2020 г. Томск: Изд-во ТПУ, 2020. С. 80–82.
5. Патент RU 2694069, МПК H02J 3/2 (2006.1), B63G 8/00 (2006.1). Устройство для электроснабжения подводного объекта с борта судна-носителя / Герасимов В.А., Костенко В.В., Филоженко А.Ю. – № 201901777; заявл. 23.01.2019; опубл. 09.07.2019, Бюл. № 19.

Для цитирования:

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. 00–00. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_36_02_08.

Об авторах

ГЕРАСИМОВ Владимир Александрович, канд. техн. наук, профессор, заведующий лабораторией энергетики подводных робототехнических комплексов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а

Область научных интересов: энергетика подводных аппаратов, бесконтактная передача электроэнергии, силовая преобразовательная техника

Тел.: +79025223824

E-mail: gerasimov@marine.febras.ru, fobos_v@mail.ru

ORCID ID: 0000-0003-0246-475X

КОМЛЕВ Антон Владимирович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории энергетики подводных робототехнических комплексов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а

Область научных интересов: энергетика подводных аппаратов, бесконтактная передача электроэнергии, силовая преобразовательная техника

Тел.: +79502884801

E-mail: kom86@bk.ru

ORCID 0000-0001-8862-8676

НАЙДЕНКО Николай Александрович, научный сотрудник лаборатории систем навигации и обработки сенсорной информации

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а

Область научных интересов подводная робототехника, электроника, микропроцессорная техника

Тел.: +79510076596

E-mail: nna0502@gmail.com

ORCID 0000-0002-5685-1838

ФИЛОЖЕНКО Алексей Юрьевич, канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории энергетики подводных робототехнических комплексов ИПИТ ДВО РАН

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а

Область научных интересов энергетика подводных аппаратов, бесконтактная передача электроэнергии, силовая преобразовательная техника

Тел.: +79140678041

E-mail: filozhenko_a@mail.ru

ORCID 0000-0003-1684-3849

