

Исследование работы системы управления гребного электропривода автономных подводных аппаратов

Б. А. Авдеев¹, А. В. Вынгра¹, С. Г. Черный^{1,2}

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Керченский государственный морской технологический университет», г. Керчь, Россия

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В статье рассмотрена реализация управления системой «гребной электродвигатель постоянного тока – двунаправленного неизолированного преобразователя постоянного напряжения» в составе автономного необитаемого подводного аппарата. Приведен выбор регулятора частоты вращения, регулятора тока, ограничителя напряжения и задатчика интенсивности, построена двухконтурная система управления. Для регулирования частоты вращения двигателя использован параметрический регулятор. С использованием математического пакета Matlab/Simulink система автоматического регулирования частоты вращения была апробирована и получены показатели качества в различных режимах работы, составлены карты настроек регулятора. На основании анализа работы системы были устранены броски напряжения при переходе с одной скорости на другую, было уменьшено перерегулирование и время переходного процесса за счет параметрической коррекции. Приведено описание лабораторного стенда по исследованию системы управления. Результаты эксперимента подтверждают высокие показатели качества разработанной двухконтурной системы управления гребного электропривода.

Ключевые слова: автономный подводный аппарат, преобразователь постоянного напряжения; моделирование; двигатель постоянного тока; двухконтурное регулирование; параметрическая коррекция.

DOI 10.14357/20718632220310

Введение

В последние десятилетия произошло резкое совершенствование твердотельной силовой электроники и систем хранения электроэнергии. Все это привело к повышенному вниманию разработчиков и эксплуататоров к автономным дронам, которые с недавнего момента стали выполнять действия, недоступные ранее. Особенно актуально это для тех операций, которые раньше были сопряжены с Рисками для жизни или высокими материальными затрата-

ми. Среди дронов можно выделить автономный подводный аппарат (АПА), который может перемещаться под водой и предназначен для проведения широкого спектра работ, в которые входит поиск, инспекции и обследование подводных объектов (трубопроводов и подводных искусственных сооружений), а также обследование морского дна, спасательные, водолазные, судоподъемные работы, патрулирование, и др. [1-3]. АПА оборудуются различными датчиками, (компасы, датчики глубины, бокового ска-

нирования, гидролокаторы, магнитометры, термисторы и датчики электропроводности), манипуляторами или вооружением [3,4]. Несмотря на успехи последних лет в проектировании автономных аппаратов, проблема высокой автономности при малых массогабаритных показателях и невысокой себестоимости стоит достаточно остро.

В процессе подачи электроэнергии из аккумуляторных батарей к потребителям, среди которых наибольшей мощностью обладают гребные электродвигатели, происходит преобразование энергии, что приводит к безвозвратным потерям, поэтому вопрос связанный с выбором типа преобразователя электроэнергии является насущным. Проблеме электродвижения АПА посвящено много работ, но до сих пор отсутствует общепринятое мнение по организации, типу привода и выбору схемы питания электродвигателей [5-7]. Есть несколько способов электродвижения АПА. Некоторые из них используют щеточный или бесщеточный электродвигатель, коробку передач, манжетное уплотнение и винт, который может быть окружен насадкой [8]. Другие АПА используют подруливающее устройство для поддержания модульности [9]. В зависимости от необходимости, подруливающее устройство может быть оснащено соплом для защиты от столкновения гребного винта или для уменьшения шума, или оно может быть оснащено подруливающим устройством с прямым приводом для поддержания эффективности на самом высоком уровне и шума на самом низком уровне [10]. Усовершенствованные двигатели АПА имеют избыточную систему уплотнения вала, чтобы гарантировать надлежащую герметичность. В работах [11, 12] описаны частотные способы управления асинхронными гребными электроприводами, однако стоимость таких систем для АПА непомерно высокой. Даже при небольшом снижении скорости движения аппарата существенно снижается статический момент сопротивления и гребной электродвигатель работает с частичной нагрузкой, что уменьшает его КПД. Для увеличения КПД аккумуляторной батареи целесообразно использовать неизолированные преобразователи постоянного напряжения с помощью которых можно добиться

стабильной частоты вращения гребного электропривода АПА [7].

1. Материалы и методы исследования

Исследования по разработке АПА введутся разными специалистами в разных учебных и научно-производственных заведениях. Каждая группа имеет свое направление исследования и разработки. Исследования разбиты на несколько этапов:

1. Разработка компьютерной модели управления.
2. Создание силовой части лабораторной установки.
3. Настройка системы управления под лабораторную установку.
4. Отладка работы лабораторной установки.
5. Создание прототипа (в том числе и другими специалистами).
6. Тестирование и отладка работы всего комплекса в целом.

По результатам эксперимента может быть принято решение об изменении количества гребных электродвигателей, их мощности и способа управления.

В качестве метода исследования было использование имитационное моделирования в системе Matlab/Simulink с последующей проверкой на стенде, имитирующем нагрузку гребного электропривода.

2. Разработка имитационной модели

2.1. Математические модели преобразователя постоянного напряжения и двигателя постоянного тока

Работа преобразователя постоянного напряжения изучена в достаточной степени и в общем виде напряжение на выходе можно описать следующим выражением [8]:

$$U_{\text{Вых}} = \frac{U_{\text{Вх}} - (U_{\text{VT}} + IR_L)}{(1 - D)} - (U_{\text{VT}} + U_{\text{VD}}), \quad (1)$$

где $U_{\text{Вх}}$ – входное напряжение преобразователя напряжения, В; $D = t_2 / (t_1 + t_2)$ – рабочие циклы, заданные схемой управления, выраженные как

отношение времени включения коммутатора ко времени одного полного цикла переключения, U_{VT} , U_{VD} – падения напряжения на транзисторе и диоде В, соответственно.

Принимая U_{VT} , U_{VD} и R_L равными нулю, можно записать:

$$U_{B_{\text{вых}}} = \frac{U_{Bx}}{(1-D)}. \quad (2)$$

Для описания работы двигателя постоянного тока (ДПТ) воспользуемся классическими уравнениями, описывающими динамику его работы. Напряжение, подаваемое на ДПТ, следующее:

$$U_{B_{\text{вых}}} = e + i_a R_a + L_a \frac{di_a}{dt}, \quad (3)$$

$$e = C\Phi\omega = C\Phi \frac{d\varphi}{dt}, \quad (4)$$

$$M = C_M i_a, \quad (5)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = M - M_C, \quad (6)$$

где e – противоэлектродвижущая сила, В; i_a – ток якоря, А; R_a – активное сопротивление, Ом; L_a – индуктивность якоря, Гн; ω – угловая скорость вращения ДПТ, рад/с; $C\Phi$ – постоянный коэффициент, определяемый конструкцией двигателя, M – электромагнитный момент двигателя, Нм; J – полный момент инерции, равный сумме моментов инерции двигателя, валопровода и гребного винта, кг·м², M_C – момент сопротивления вращения винта, который в общем виде прямо пропорционален квадрату угловой скорости и может быть выражен следующим образом:

$$M_C = k\omega^2 + f, \quad (7)$$

где k – коэффициент сопротивления, Н·с², f – случайные воздействия.

2.2 Недостатки двухконтурной системы управления и пути их решения

Начало исследования работы гребного электропривода постоянного тока, питаемого от неизолированного преобразователя постоянного напряжения, было положено в работе [6], в которой рассматривалось управление электроприводом с использованием одноконтурной схемы управления. Обратная связь была реализована через датчик частоты вращения. Однако

у данного решения, несмотря на простоту схемы, имелись существенные недостатки в виде больших скачков напряжения на якоре электродвигателя постоянного тока, достигающие величины более чем 3 кВ, и пульсаций тока якоря, что плохо сказывается на управляемости всего комплекса в целом. Исходя из вышеперечисленных недостатков, в статье [12] была разработана двухконтурная схема управления, которая позволила уменьшить колебания тока и момента, одновременно уменьшив время переходного процесса и точность регулирования. Скачки напряжения также уменьшились. Однако двухконтурная система управления также обладает недостатками:

- скачки напряжения превышает допустимый уровень, что может повлечь за собой повреждение изоляции с последующим коротким замыканием;

- показатели качества регулирования сильно зависят от заданной частоты вращения и момента нагрузки на валу.

Также к недостаткам можно отнести тот факт, что в работе [13] не была проанализирована работа при случайных воздействиях на винт.

Для устранения вышеперечисленных недостатков было решено модернизировать двухконтурную схему управления электропривода гребного винта (Рис. 1). Система имеет 2 контура управления: основной – по скорости ДПТ, подчиненный – по току ДПТ. Система работает по отклонению скорости двигателя от эталонной (заданной) скорости. Сигнал с регуляторов сравнивается с высокочастотным ($f=2 \cdot 10^5$ Гц) пилообразным сигналом. Полученный сигнал идет на преобразователь постоянного напряжения, работающий на основе широтно-импульсной модуляции. Выходное напряжение подается с преобразователя постоянного напряжения U_{Bx} на ДПТ, заставляя его изменять частоту вращения ω до тех пор, пока ω не станет равной заданной частоте вращения $\omega_{\text{зад}}$.

2.3 Разработка электрической схемы и имитационной модели системы управления гребного электропривода

Принципиальная электрическая схема гребного электропривода автономных подводных аппаратов представлена на Рис. 2; модель, реализованная в Simulink, представлена на Рис. 3.

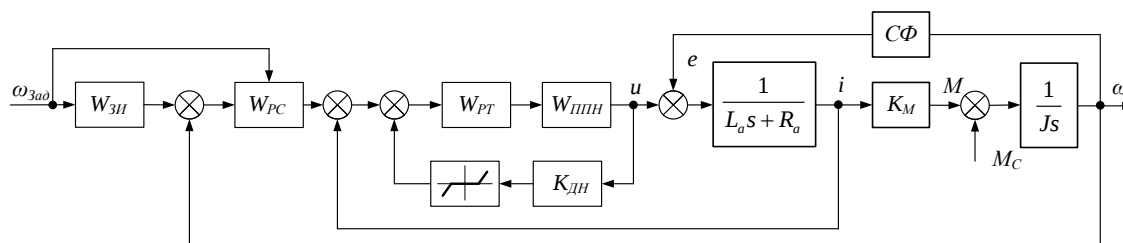


Рис. 1. Структурная схема управления работы двунаправленного неизолированного преобразователя постоянного напряжения на двигатель постоянного тока

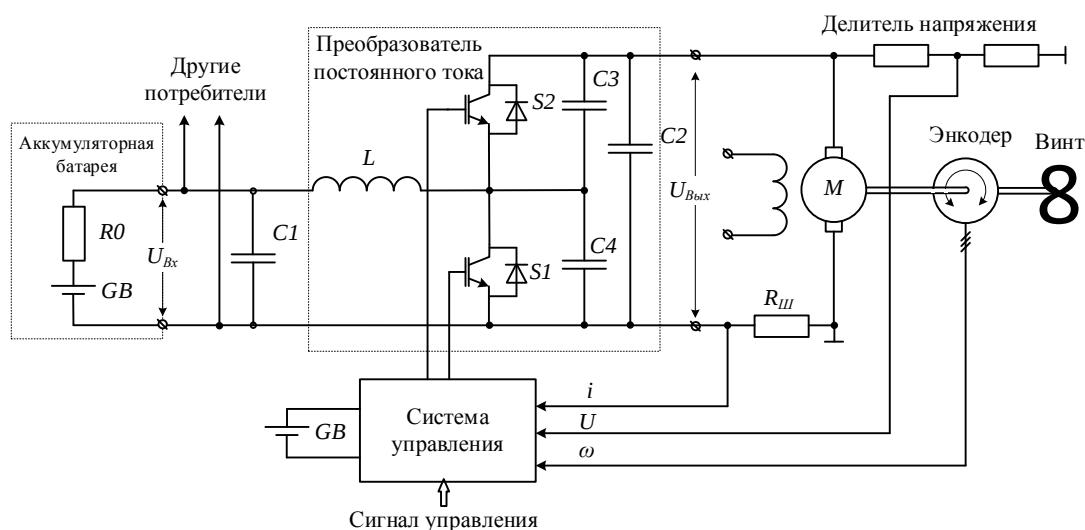


Рис. 2 - Принципиальная электрическая схема гребного электропривода

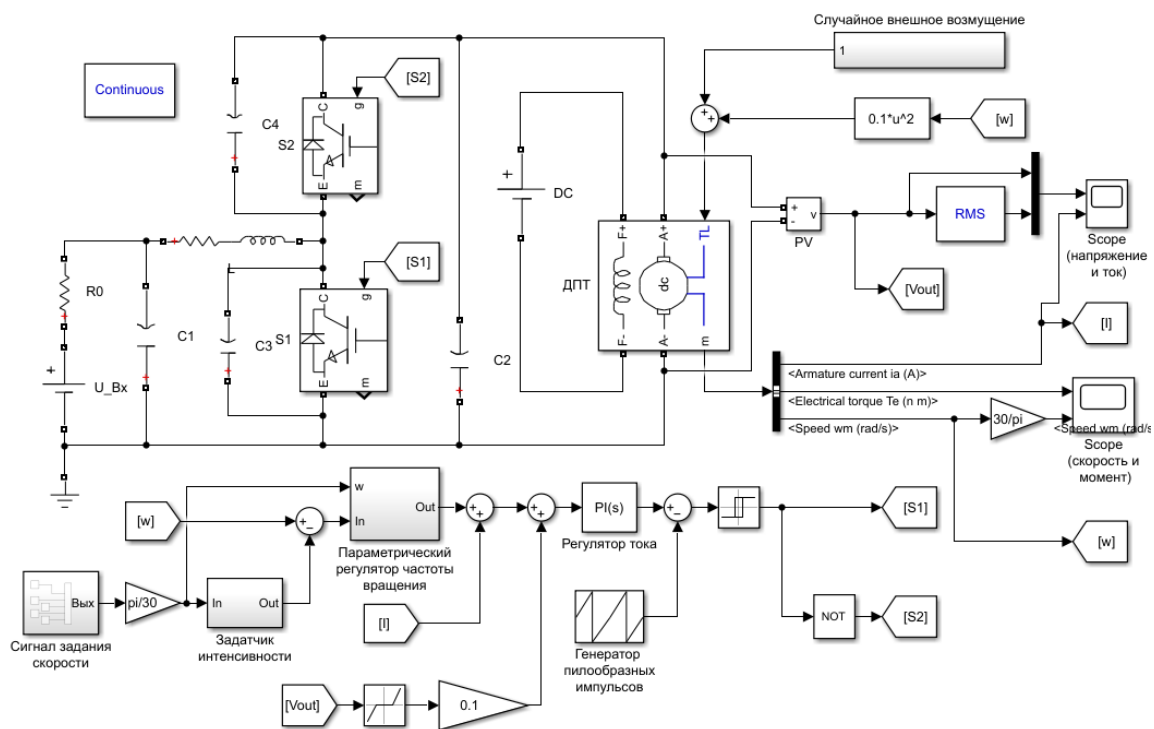


Рис. 3. Simulink-модель автоматического регулирования частоты вращения гребного электропривода

Параметры преобразователя постоянного тока следующие: напряжение аккумулятора $U_{\text{Вх}}=200$ В; внутреннее сопротивление аккумулятора $R_0=0,05$ Ом; емкость входного конденсатора $C_1=10$ мкФ; емкость выходного конденсатора $C_2=10$ мкФ; индуктивность катушки $L=50$ мкГн; активное сопротивление катушки $R_L=0,05$ Ом; $C_3=C_4=10$ мкФ.

Параметры двигателя постоянного тока следующие: активное сопротивление якоря $R_a=2,581$ Ом; индуктивность якоря $L_a=0,028$ Гн; активное сопротивление обмотки возбуждения $R_f=281,3$ Ом; индуктивность обмотки возбуждения $L_f=156$ Гн; начальная индукция между якорем и обмоткой возбуждения $L_{af}=0,9483$ Гн; полный момент инерции, равный сумме моментов инерции двигателя, валопровода и гребного винта $J=0,05$ кг·м².

Момент нагрузки рассчитывается по следующей формуле:

$$M_C = 0,1\omega^2. \quad (9)$$

Применение приведенных выше параметров преобразователя постоянного тока и двигателя постоянного тока для моделирования обусловлено широкой распространенностью компонентов и соответствием модели разработанной лабораторной установке

3. Выбор регулятора частоты вращения

Определим карту настроек пропорциональной части регулятора частоты вращения по перерегулированию и времени переходного процесса. Значения коэффициентов регулятора тока оставим неизменным: $K_{II}=13$; $T_{II}=0,03$. Полученные данные представлены в виде графиков и приведены на Рис. 4 и 5.

Как можно видеть из полученных карт настроек, большой коэффициент пропорцио-

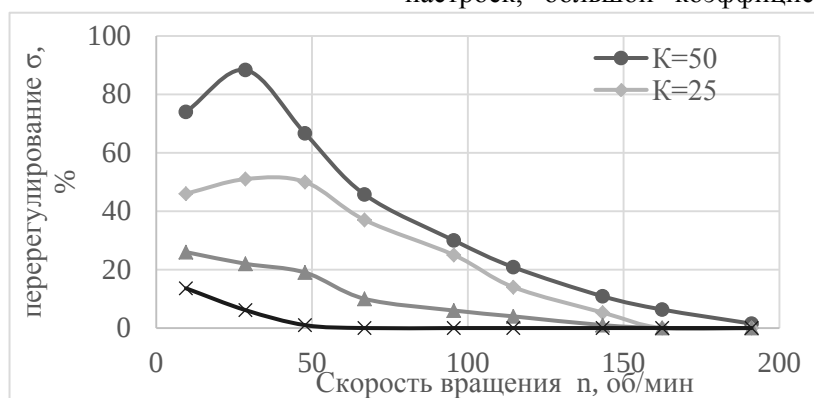


Рис. 4. Зависимость перерегулирования от заданной скорости при различных значениях регулятора

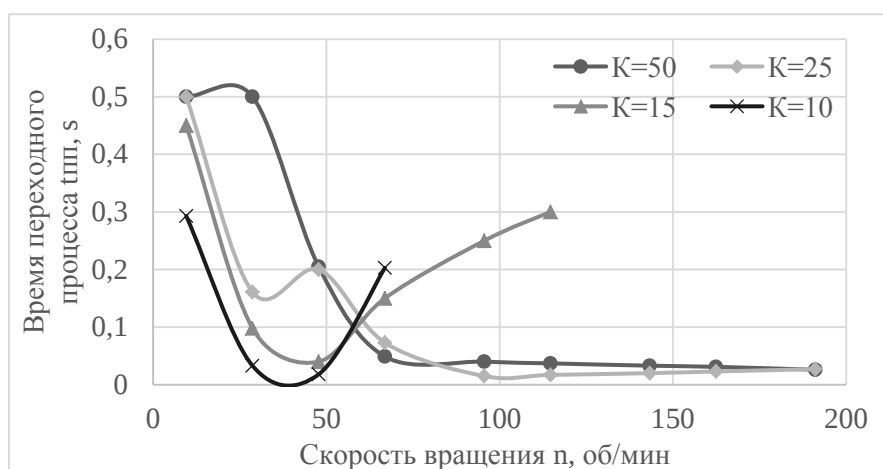


Рис. 5. Зависимость времени переходного процесса $t_{\text{пр}}$ от заданной скорости n при различных значениях регулятора

нальной части регулятора при малых заданных скоростях имеет очень большое перерегулирование, а при больших скоростях малый коэффициент пропорциональной части регулятора не дает достаточной точности, и частота вращения ДПТ не достигает 5% зоны допуска. Таким образом, ни одна из настроек регулятора не позволит гребному электроприводу хорошо работать в широком диапазоне скоростей. Выходом из этой ситуации является применение параметрической коррекции регулятора частоты вращения. С помощью MATLAB Function был реализован параметрический ПИ-регулятор частоты вращения со следующей передаточной функцией:

$$W_{PC}(s) = K_{PI} + 1/T_I s$$

$$K_{PI} = 5 \text{ и } T_I = 0,1 \text{ если } 0 < n < 50;$$

$$K_{PI} = 10 \text{ и } T_I = 0,05 \text{ если } 50 \leq n < 100;$$

$$K_{PI} = 15 \text{ и } T_I = 0,03 \text{ если } 100 \leq n < 150;$$

$$K_{PI} = 25 \text{ и } T_I = 0,015 \text{ если } 150 \leq n < 200;$$

$$K_{PI} = 40 \text{ и } T_I = 0,01 \text{ если } 200 \leq n.$$

Из [14] известно, что самый тяжелый случай из регулированных – это набор скорости, сопровождающийся скачками напряжения. Для уменьшения скачков напряжения введем дополнительную обратную связь по напряжению на якоре ДПТ. Для сигнала введем зону нечувствительности в размере 500 В, превышение которого будет поступать в систему управления с коэффициентом ослабления равным 0,1. Тем самым, бу-

дут компенсироваться скачки напряжения. Напряжение снимается через безынерционный делитель напряжения с передаточной функцией $W_{ДН}(s) = K_{ДН}$, и подается через зону нечувствительности с коэффициентом ослабления, измененное в $K_{ДН}$ раз, как показано на Рис. 2.

Скачки тока и напряжения можно уменьшить введя задатчик интенсивности входного сигнала. В качестве задатчика интенсивности лучше всего использовать инерционное звено 2-го порядка с коэффициентом усиления по постоянному току равному одному и малыми постоянными времени, что сделает изменения эталонной скорости более плавными. Постоянная времени должна быть меньше, чем механическая постоянная времени электродвигателя.

В моделировании был использован задатчик интенсивности со следующей передаточной функцией:

$$W_{ЗИ}(s) = \frac{1}{(0.001s + 1)(0.002s + 1)}. \quad (10)$$

4. Результаты моделирования

На Рис. 6 представлен график зависимости частоты вращения при увеличении со 100 до 200 об/мин с параметрическим регулятором и со стандартным ПИ-регулятором ($K=25$, $I=1/0,07$).

Как можно видеть из Рис. 6, перерегулирование при выходе на частоту вращения 100 об/мин составила для стандартного и параметрическо-

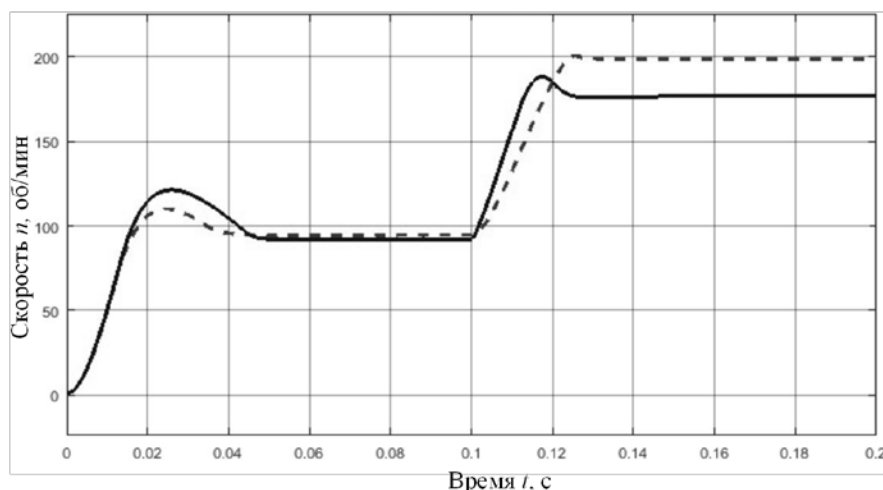


Рис. 6. Изменение частоты вращения ДПТ АПА со 100 до 200 об/мин

— стандартный ПИ-регулятор
 ---- параметрический регулятор

го регуляторов 28,5% и 11,6% соответственно. Rise time при пуске составило 1,6 секунды в обоих случаях. Абсолютная ошибка к моменту переключения скорости составила 8,11 и 6,2 об/с для стандартного и параметрического регуляторов соответственно.

Увеличение скорости с помощью стандартного регулятора не позволило достичь заданной скорости в 200 об/мин с точностью в 5%. Абсолютная ошибка составила 19,4 об/мин, что составляет 7,7% от установившегося значения, в то время как параметрический регулятор обеспечил точность в 0,7% через 0,1 секунды. Наличие интегральной части позволит сделать нулевую ошибку регулирования, однако при случайных возмущениях добиться этого со стандартным регулятором нереально.

Рассмотрим изменение момента при увеличении скорости со 100 до 200 об/мин (Рис. 7). Время роста и параметрического регулятора и стандартного ПИ-регулятора отличаются друг от друга. Время переходного процесса у параметрического регулятора составляет 0,4 с в отличие от стандартного с 0,49 с. Такая разница объясняется тем фактом, что провал напряжения у параметрического регулятора меньше стандартного: 3,107 Нм против -4,828 Нм.

Стандартный регулятор в 0,42 с переходит в режим противовключения, и, соответственно, на непродолжительное время работа ДПТ теряет контроль. В момент переключения скоростей время нарастания у модели, представленной на Рис. 3, выше, чем у классического ПИ-регулятора (0,046 с и 0,0024 с соответственно)

из-за ограничения напряжения на якоре и датчике интенсивности, который выводит напряжение на заданное значение тем дольше, чем больше заданное значение. Максимальное значение напряжения у новой схемы также выше: 62,41 Нм и 59,07 Нм соответственно. Однако имеются и меньшие пульсации момента после перерегулирования: 19,88 Нм и 5,22 Нм. В целом представленная схема работает более плавно, чем в [8].

Рассмотрим осциллограммы напряжения, представленные на Рис. 8.

С введением датчика интенсивности и контура ограничения напряжения максимальное напряжение снизилось с 2669 и 690 В в самом опасном моменте – в моменте перехода на большую скорость. В целом напряжение не превышает 500 В, поэтому использование преобразователя будет более безопасным для изоляции и с точки зрения теплового пробоя.

Осциллограммы тока имеют точно такую же форму, что и момент. Таким образом, параметрический регулятор обладает лучшим переходным процессом по сравнению со стандартным, при этом организовать его работу программно несложно.

5. Работа гребного электропривода при случайных воздействиях со стороны винта

Процесс управления пропульсивным комплексом АПА должен обеспечивать надежную эксплуатацию аппарата, в особенности при

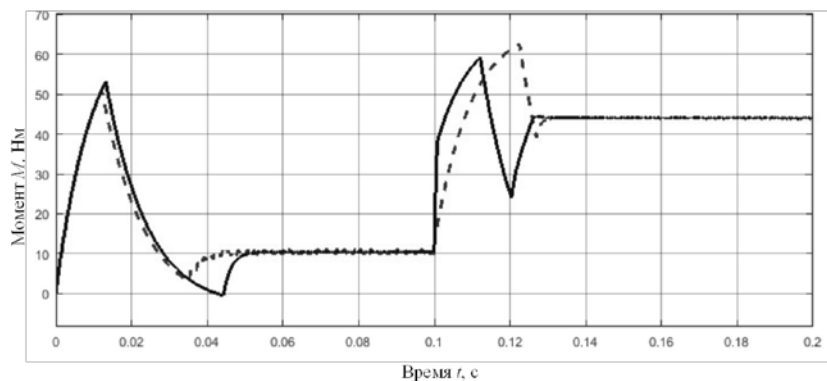


Рис. 7. Изменение момента ДПТ АПА со 100 до 200 об/мин

— стандартный ПИ-регулятор
 ---- параметрический регулятор с ограничителем напряжения

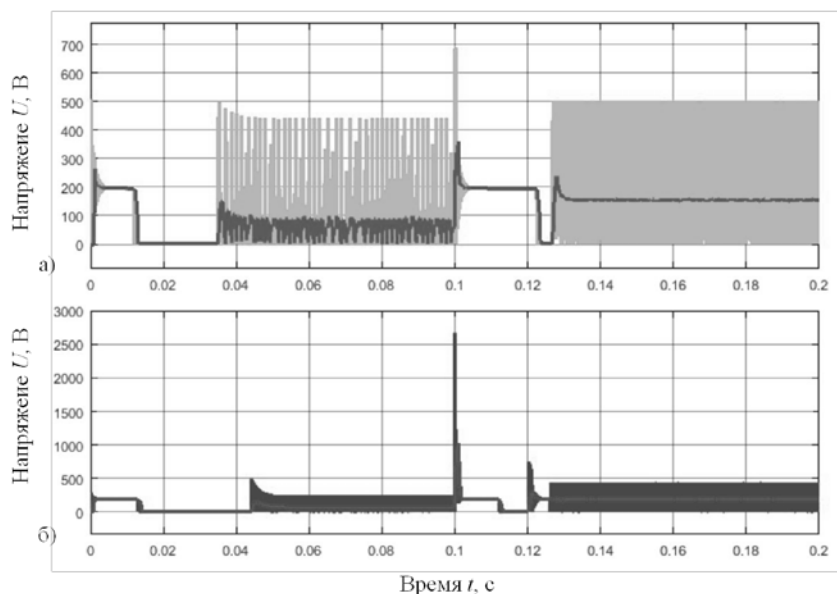


Рис. 8. Осциллограммы напряжения на якоре ДПТ

а) стандартный ПИ-регулятор; б) параметрический регулятор с ограничителем напряжения

работе в условиях значительных колебаний нагрузки со стороны внешних воздействий. Колебания нагрузки на валу гребного электродвигателя может привести к серьезным негативным и даже катастрофическим последствиям, среди которых можно отметить выход из строя двигателей гребного винта, перегрев преобразователя, провалы напряжения, пробой изоляции вследствие скачков перенапряжения и быстрый разряд батареи.

Рассмотрим, как поведет себя гребной электропривод в условиях значительных колебаний нагрузки со стороны внешних воздействий. Под внешними воздействиями будем понимать

стохастическое влияние течения, изменяемый рельеф дна, ветер, волнения и прочие мало прогнозируемые причины. Все эти факторы можно учесть в виде случайных колебаний момента сопротивления на валу электродвигателя гребного винта.

График колебаний нагрузки со стороны внешних воздействий представлен на Рис. 9.

Рассмотрим следующий случай: набор скорости от 0 до 100 об/мин с последующим резким изменением скорости до 150 об/мин, резкое уменьшение скорости до 100 об/мин с последующим сбросом скорости.

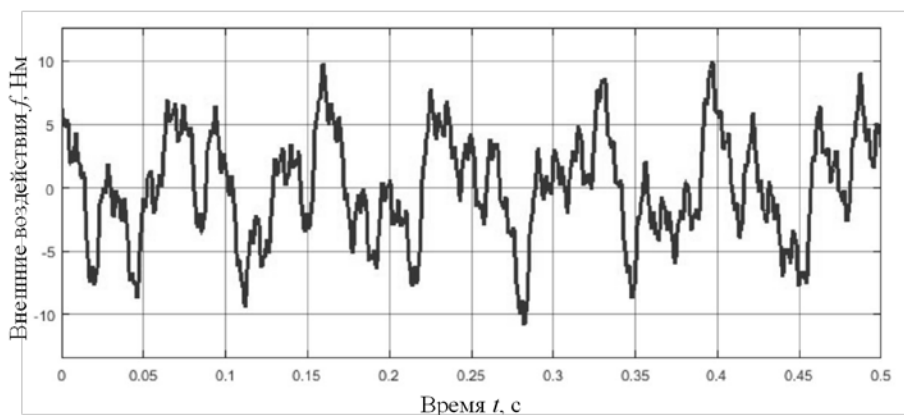


Рис. 9. Возмущающие внешние воздействия со стороны гребного винта

Частота вращения и момент на валу двигателя представлены на Рис. 10, осциллограммы токов и напряжений – на Рис. 11. На осциллограмме напряжения пунктиром выделено среднеквадратичное значение напряжения за период.

Как можно видеть, система стремится к заданным значениям и обеспечивает нормальный переходный процесс. Несмотря на пульсации момента, скорость менялась незначительно. На основании этого можно сделать вывод о работоспособности приведенной схемы.

6. Лабораторное исследование работы системы управления

Для исследования работы системы управления ДПТ с двунаправленным преобразователем постоянного напряжения была собрана лабораторная установка, показанная на Рис. 12. Установка состоит из гребного ДПТ, получающего питание через преобразователь постоянного напряжения, и асинхронного двигателя с преобразователем частоты, имитирующего нагрузку на валу ДПТ.

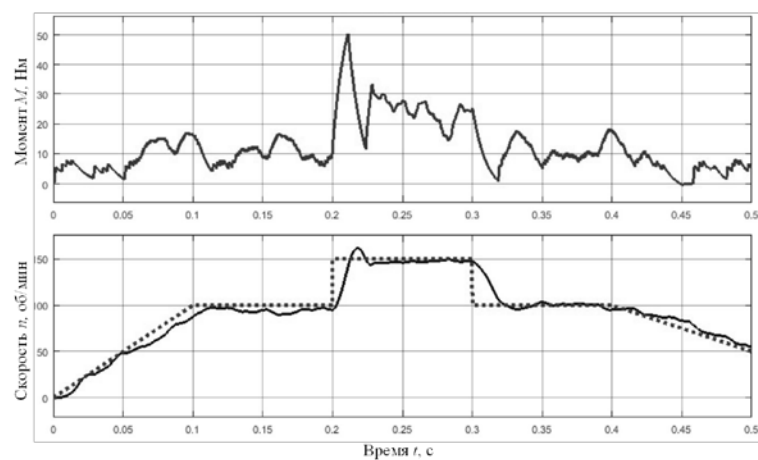


Рис. 10. Графики момента и скорости гребного электродвигателя

---- заданная скорость
— реальная скорость

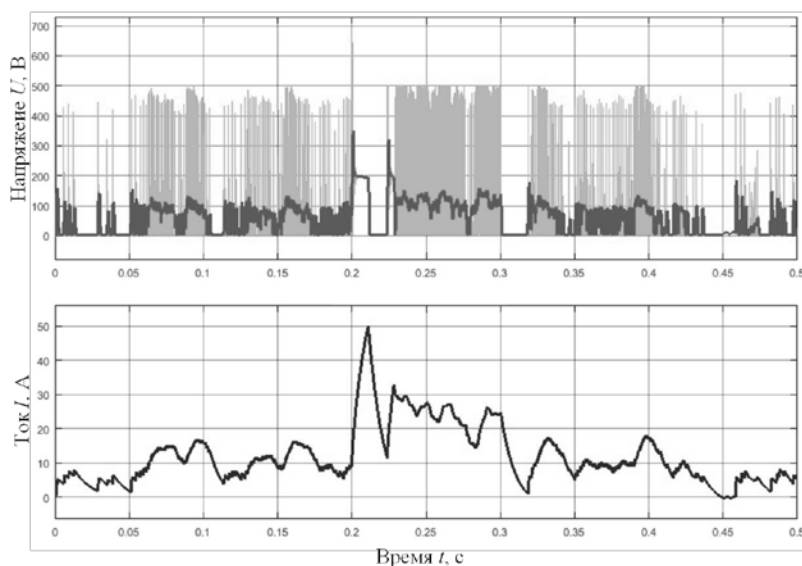


Рис. 11. Графики напряжения (мгновенного и среднего) и тока гребного электродвигателя

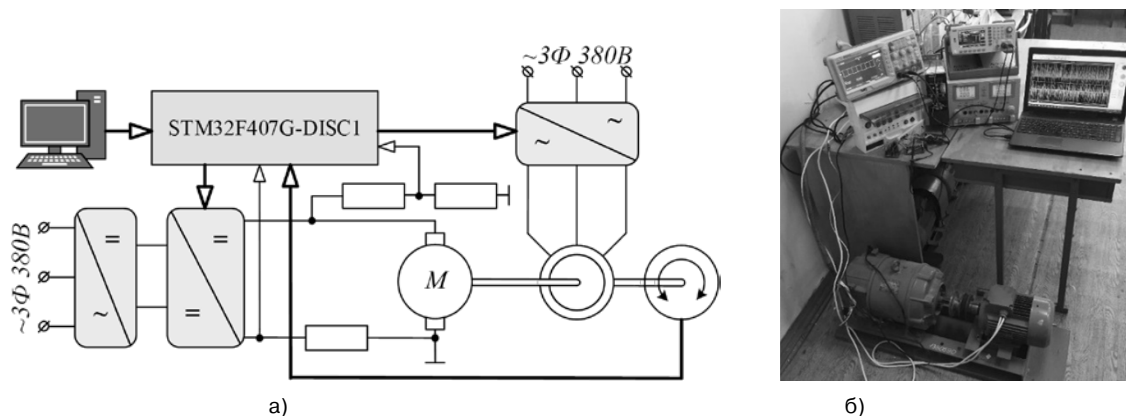


Рис. 12. Лабораторная установка
а) структурная схема, б) фотография установки

Установка включает в себя силовые модули и схему управления. В качестве ДПТ был выбран 2ПН132МУХЛ4 мощностью 2,5 кВт с частотой вращения 1000 об/мин и КПД 83,5% ($R_a=1,08$ Ом, $R_{доп}=0,763$ Ом, $L=22,9$ мГн). В качестве АД был выбран короткозамкнутый 4А100S4У3 мощностью 3 кВт. Преобразователь частоты OWEN PChV103-3K0-V with LPO 3 с выходной номинальной мощностью 3 кВт работает в режиме управления моментом с обратной связью по скорости. Датчиком скорости выступает энкодер ХСС1510PS10У. В обратную связь вводится поправочный коэффициент, создающий возмущающее воздействие на валу ДПТ по форме, применяемой в модели (Рис. 9).

Преобразователь постоянного напряжения был собран из IGBT-транзисторов FGL40N120ANDTU (1200В, 64А, 500 Вт), конденсаторов 780В 10μF. Индуктивность была

намотана самостоятельно из Н07Z1-К 450/750В (6мм²). Преобразователь получает питание с силового выпрямителя R4850G2 мощностью 3000 Вт.

Модуль управления преобразователем включает в себя отладочную плату STM32F407G-DISC1, драйверы управления IGBT Semiconductor FAN7383MX и блок питания цепей управления ADD-155A. Программирование отладочной платы производится с ПК по протоколу ST-link на языке программирования Matlab. Измерительные приборы – осциллограф АКИП-4115/3, датчик тока на основе эффекта Холла ACS758-100.

На Рис. 13 представлены осциллограммы тока, на Рис. 14 приведено напряжение на якоре ДПТ и на Рис. 15 представлена скорость ДПТ при изменении заданной скорости с 100 до 200 об/мин. Данные были предварительно обработаны с помощью фильтра средней скользящей.

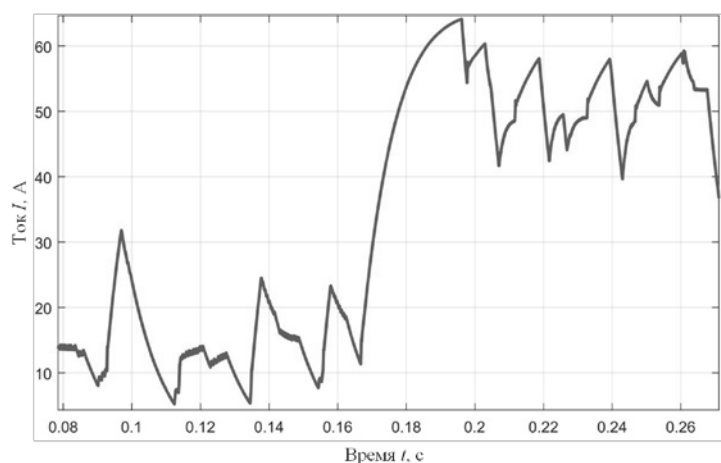


Рис. 13. Ток ДПТ экспериментальной установки при изменении заданной скорости с 100 до 200 об/мин

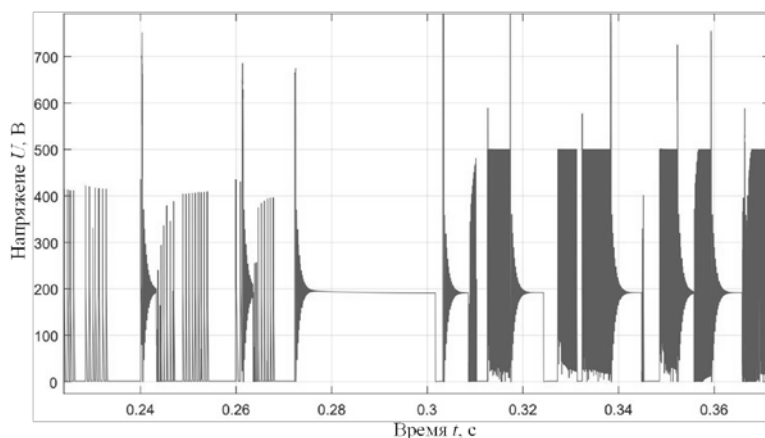


Рис. 14. Напряжение на якоре ДПТ экспериментальной установки при изменении заданной скорости с 100 до 200 об/мин

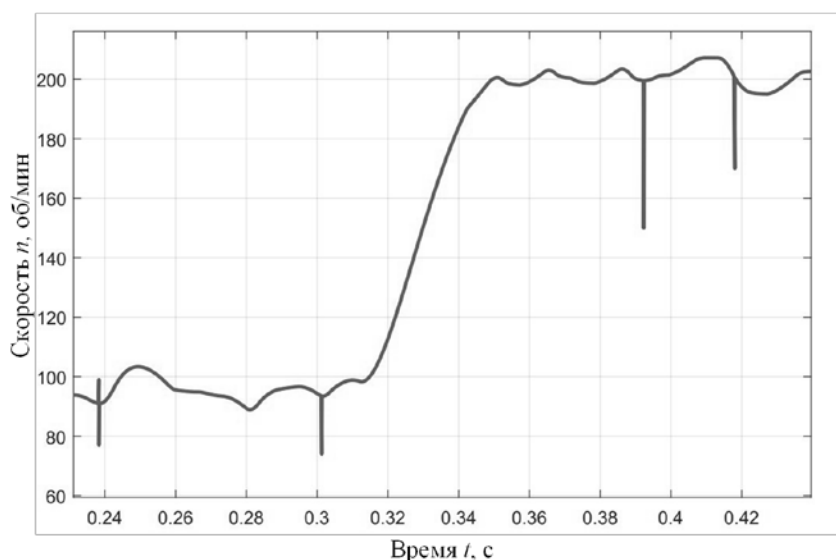


Рис. 15. Скорость якоря ДПТ экспериментальной установки при изменении заданной скорости с 100 до 200 об/мин

В целом лабораторная установка хорошо справляется с регулированием частоты вращения, однако имеются и недостатки. Как можно видеть из графиков, пульсации скорости, тока и частоты вращения в лабораторных испытаниях намного больше, чем при моделировании. Это обуславливается дополнительными помехами при работе частотного преобразователя, задержкой обратной связи и другими воздействиями, которые не учитывались при испытании. Особенно опасными становятся скачки напряжения, достигающие до 1100 В.

Дальнейшие исследования будут направлены на совершенствование работы лабораторной установки в области уменьшения напряжения

пульсаций, точности регулирования и фильтрации сигналов.

Заключение

Разработана и смоделирована в пакете Matlab/Simulink система управления гребным электродвигателем постоянного тока автономного подводного аппарата с двунаправленным неизоллированным преобразователем постоянного напряжения. Определены показатели качества работы в различных режимах работы, составлены карты настроек регулятора и на основе этого была разработана параметрическая коррекция управления, которая обеспечивает

лучшее управление гребным электродвигателем. Разработана лабораторная установка, включающая систему управления ДПТ через преобразователь постоянного тока с параметрической коррекцией и имитацию возмущающего воздействия гребного винта на электродвигатель. Проведены испытания для различных режимов работы гребного электропривода. Сравнение обработанных результатов лабораторных испытаний с результатами моделирования показало, что система управления хорошо справляется с регулированием частоты вращения.

Литература

1. Volyanskaya, Y., Volyanskiy, S., Volkov, A., Onishchenko, O., 2017. Determining energy-efficient operation modes of the propulsion electrical motor of an autonomous swimming apparatus. In: Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. vol. 6, 8 (90), pp. 11-16.
2. H. Fang, Z. Li and X. Wei, "Design and Optimization of Magnetic Gear Composite Motor for Autonomous Underwater Vehicle," 2021 24th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2021, pp. 421-425, doi: 10.23919/ICEMS52562.2021.9634506.
3. Герасимов, В. А. Средства повышения эффективности системы бесконтактного заряда аккумуляторных батарей автономного подводного аппарата / В. А. Герасимов, А. В. Комлев, А. Ю. Филоженко // Подводные исследования и робототехника. – 2020. – № 1(31). – С. 4-12. – DOI 10.37102/24094609.2020.31.1.001.
4. Быкова, В. С. Применение автономного необитаемого подводного аппарата для проводки судов через заминированный район / В. С. Быкова, А. И. Машошин, И. В. Пашкевич // Подводные исследования и робототехника. – 2021. – № 1(35). – С. 31-40. – DOI 10.37102/1992-4429_2021_35_01_03.
5. Дегтярева, С. Г. Повышение маневровых характеристик движителя автономного необитаемого подводного аппарата / С. Г. Дегтярева, В. В. Горда // Морской вестник. – 2020. – № S1(14). – С. 101-102.
6. Волянская, Я. Б. Уточнение параметров математической модели трехфазного асинхронного электродвигателя системы электродвижения автономного плавательного аппарата / Я. Б. Волянская, С. М. Волянский, О. А. Онищенко // Морские интеллектуальные технологии. – 2017. – № 4-3(38). – С. 132-138.
7. Zhukov, V.A., Sherban, S.A., Melnik, O.V., Sokolov, S.S., Kolesnichenko, S.V., 2019. Improvement of methods and means of thermal control of ship power plants. In: 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ELCONRUS 2019. pp. 389-392.
8. Моделирование работы двунаправленного преобразователя постоянного напряжения в составе привода гребного винта автономных подводных аппаратов / Б. А. Авдеев, А. В. Вынгра, С. П. Голиков, Б. П. Новак // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2019. – № S2. – С. 152-159. – DOI 10.24937/2542-2324-2019-2-S-I-152-159.
9. Шурпак, В. К. Оценка влияния основных судовых систем на показатели энергетической эффективности судна / В. К. Шурпак, А. А. Серов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. – 2017. – № 48-49. – С. 95-103.
10. Вынгра А.В. Разработка имитационной модели асинхронного электропривода с применением векторного управления, как компонента структурного программного модуля / А.В. Вынгра, Б.А. Авдеев, С.Г. Черный // Информационные технологии и вычислительные системы, 2020. – №2. С 75–84. DOI 10.14357/20718632200207
11. Вынгра, А. В. Идентификация настройки ПИ-регулятора на платформе нейросетевой структуры / А. В. Вынгра, С. Г. Черный // Датчики и системы. – 2020. – № 8(250). – С. 20-26. – DOI 10.25728/datsys.2020.8.3.
12. Avdeev, B. A. Evaluation and Procedure for Estimation of Interharmonics on the Example of Non-Sinusoidal Current of an Induction Motor with Variable Periodic Load / B. A. Avdeev, A. V. Vyngra, S. G. Chernyi [et al.] // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 158412-158419. – DOI 10.1109/ACCESS.2021.3130442.
13. Моделирование работы двунаправленного преобразователя постоянного напряжения в составе привода гребного винта автономных подводных аппаратов / Б. А. Авдеев, А. В. Вынгра, С. П. Голиков, Б. П. Новак // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2019. – № S2. – С. 152-159. – DOI 10.24937/2542-2324-2019-2-S-I-152-159.
14. Vyngra, A. V. Modeling the Operation of an Uninsulated DC-DC Converter as a Part of a Propeller Drive of Autonomous Underwater Vehicles / A. V. Vyngra, B. A. Avdeev // Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2020, St. Petersburg and Moscow: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. – P. 2431-2434. – DOI 10.1109/ElConRus49466.2020.9039023.

Авдеев Борис Александрович. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Керченский государственный морской технологический университет» г. Керчь, Россия. Доцент, кандидат технических наук. Количество печатных работ 84. Область научных интересов: системы электроснабжения, силовая преобразовательная техника, морской транспорт. E-mail: dirigeant@mail.ru

Вынгра Алексей Викторович. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Керченский государственный морской технологический университет» г. Керчь, Россия. ассистент. Количество печатных работ 46. Область научных интересов: электроника, морской транспорт. E-mail: elag1995@gmail.com.

Черный Сергей Григорьевич. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Керченский государственный морской технологический университет» г. Керчь, Россия. Доцент, кандидат технических наук. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет» г. Санкт-Петербург, Россия. Доцент, кандидат технических наук. Количество печатных работ 180. Область научных интересов: информационные системы, морской транспорт, распределенные системы. E-mail: sergiiblack@gmail.com

Investigation of the Operation of a Two-Circuit Control System for a Direct Current Propulsion Electric Drive of Autonomous Underwater Vehicles with Parametric Correction

B. A. Avdeev¹, A. V. Vyngra¹, S.G. Chernyi²

¹ Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Russia

² St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

Abstract. The article considers the implementation of the control system "DC propulsion electric drive - bidirectional non-isolated DC voltage converter" as part of an autonomous uninhabited underwater vehicle. The choice of speed controller, current controller, voltage limiter and intensity generator is given, a two-circuit control system is built. A parametric controller is used to control the engine speed. Using the Matlab/Simulink mathematical package, the automatic speed control system was tested and quality indicators were obtained in various operating modes, maps of controller settings were compiled. Based on the analysis of the system operation, voltage surges were eliminated during the transition from one speed to another, overshoot and the time of the transient process were reduced due to parametric correction. The work of the system was analyzed. The description of the laboratory stand for the study of the control system is given. It is shown that the proposed system performed well under conditions of random impacts from the side of the propeller. The results of the experiment confirm the high quality indicators of the developed dual-circuit control system of the propulsion electric drive.

Keywords: autonomous underwater vehicle, DC-DC converter; modeling; DC motor; double-circuit regulation; parametric correction.

DOI 10.14357/20718632220310

References

1. Volyanskaya, Y., Volyanskiy, S., Volkov, A., Onishchenko, O., 2017. Determining energy-efficient operation modes of the propulsion electrical motor of an autonomous swimming apparatus. In: Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. vol. 6, 8 (90), pp. 11-16.
2. H. Fang, Z. Li and X. Wei, "Design and Optimization of Magnetic Gear Composite Motor for Autonomous Underwater Vehicle," 2021 24th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2021, pp. 421-425, doi: 10.23919/ICEMS52562.2021.9634506.
3. Gerasimov, V. A. Komlev A. V. Filozhenko A. YU. 2020. Sredstva povysheniya effektivnosti sistemy beskontaktnogo zaryada akkumulyatornyh batarej avtonomnogo podvodnogo apparata [Means to improve the efficiency of the system for non-contact charging of accumulator batteries of an autonomous underwater vehicle]. Podvodnye issledovaniya i robototekhnika [Underwater research and robotics]. № 1(31). S. 4-12.
4. Bykova, V. S. Mashoshin A. I., Pashkevich I. V. 2021. Primenenie avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata dlya provodki sudov cherez zaminirovannyj rajon [Use of an autonomous uninhabited underwater vehicle for escorting ships through a mined area] Podvodnye issledovaniya i robototekhnika [Underwater Research and Robotics]. № 1(35). S. 31-40.
5. Degtyareva S. G., Gorda V. V., 2020. Povyshenie manevrovyykh harakteristik dvizhitelya avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata [Improving the maneuvering characteristics of the propulsion unit of an autonomous uninhabited underwater vehicle] Morskoj vestnik [Marine messenger]. № S1(14). S. 101-102.
6. Volyanskaya YA. B., Volyanskiy S. M., Onishchenko O. A. 2017. Utochnenie parametrov matematicheskoy modeli trekhfaznogo asinhronnogo elektrodvigatelya sistemy elektrodvizeniya avtonomnogo plavatel'nogo apparata [Refining the parameters of the mathematical model of a three-phase asynchronous electric motor of the electric propulsion system of an autonomous swimming appa-

- ratus]. Morskie intelektual'nye tekhnologii [Marine Intelligent Technologies]. № 4-3(38). S. 132-138.
7. Zhukov, V.A., Sherban, S.A., Melnik, O.V., Sokolov, S.S., Kolesnichenko, S.V., 2019. Improvement of methods and means of thermal control of ship power plants. In: 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ELCONRUS 2019. pp. 389-392.
 8. Avdeev B. A., Vyngra A. V., Golikov S. P., Novak B. P. 2019. Modelirovanie raboty dvunapravlenno preobrazovatelya postoyannogo napryazheniya v sostave privoda grebnogo vinta avtonomnyh podvodnyh apparatov [Modeling the operation of a bidirectional DC voltage converter as part of the propeller drive of autonomous underwater vehicles]. Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra [Proceedings of the Krylov State Scientific Center]. № S2. S. 152-159.
 9. SHurpyak, V. K., Serov A. A. 2017. Ocenka vliyaniya osnovnyh sudovyh sistem na pokazateli energeticheskoy effektivnosti sudna [Evaluation of the influence of the main ship systems on the indicators of the energy efficiency of the vessel]. Nauchno-tekhnicheskij sbornik Rossijskogo morskogo registra sudohodstva [Scientific and technical collection of the Russian Maritime Register of Shipping]. № 48-49. S. 95-103.
 10. Vyngra A.V. Avdeev B.A., CHernyj S.G. 2020. Razrabotka imitacionnoj modeli asinhronnogo elektroprivoda s primeneniem vektornogo upravleniya, kak komponenta strukturnogo programmnogo modulya [Development of a simulation model of an asynchronous electric drive using vector control as a component of a structural software module]. Informacionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy [Information technologies and computing systems]. №2. C. 75–84.
 11. Vyngra, A. V., CHernyj S. G. 2020. Identifikaciya nastrojki PI-regulyatora na platforme nejrosetevoj struktury [Identification of the PI controller setting on the platform of the neural network structure]. Datchiki i sistemy [Sensors and systems]. № 8(250). S. 20-26.
 12. Evaluation and Procedure for Estimation of Interharmonics on the Example of Non-Sinusoidal Current of an Induction Motor with Variable Periodic Load / B. A. Avdeev, A. V. Vyngra, S. G. Chernyi [et al.] // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 158412-158419. DOI 10.1109/ACCESS.2021.3130442.
 13. Avdeev B. A., Vyngra A. V., Golikov S. P., Novak B. P. 2019. Modelirovanie raboty dvunapravlenno preobrazovatelya postoyannogo napryazheniya v sostave privoda grebnogo vinta avtonomnyh podvodnyh apparatov [Modeling the operation of a bidirectional DC voltage converter as part of the propeller drive of autonomous underwater vehicles] Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra [Proceedings of the Krylov State Scientific Center]. № S2. S. 152-159.
 14. Vyngra, A. V. Modeling the Operation of an Uninsulated DC-DC Converter as a Part of a Propeller Drive of Autonomous Underwater Vehicles / A. V. Vyngra, B. A. Avdeev // Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIConRus 2020, St. Petersburg and Moscow: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. – P. 2431-2434. – DOI 10.1109/EIConRus49466.2020.9039023.

Avdeev B. A. PhD, Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Ordzhonikidze 82, Russia, 298309, email: dirigeant@mail.ru

Vyngra A. V. Assistant, Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Ordzhonikidze 82, Russia, 298309, e-mail: elag1995@gmail.com

Chernyi S. G. PhD, Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Ordzhonikidze 82, Russia, 298309., St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, email: sergiiblack@gmail.com