

Проектирование и испытания активных движительных комплексов подводных аппаратов

77-48211/536074

01, январь 2013

Северов С. П., Костанди И. М.

УДК.629.127

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

sm42@sm.bmstu.ru

keyinfo@gmail.com

Объект исследования. Активные движительные комплексы и проблемы их оптимизации рассматриваются в настоящей работе применительно к условиям конкурсных соревнований подводных аппаратов. В предыдущих публикациях [1, 2] определены образовательные цели и проблемы указанных соревнований. Здесь обратимся к техническим проблемам. Как известно [3, 4], аппараты данного типа предназначены для работы в предельно интенсивных start-стопных режимах функционирования. Этим, по сути, объясняется стремление авторов исследовать, вместо серийных образцов, в качестве базового элемента движительного комплекса, винтомоторные агрегаты собственной конструкции. При этом, в более общем аспекте, предметом рассмотрения является разработка и оптимизация параметров движителей гидроботов ROV – Remotely Operated Vehicle – многофункциональных аппаратов, предназначенных, в частности, для выполнения конкурсных технических работ подводных миссий ликвидации последствий подводных чрезвычайных ситуаций [5].

Рассматриваемый вид движителя гидробота представлен, в качестве типичного примера, движителем аппарата “Акватор 3D” [3], разработанным в УНМЦ «Гидронавтика» МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2012 г. На рисунках I, II, III, IV можно видеть движитель в различных вариантах декомпозиции, в различных проекциях с различной степенью завершенности условной разборки. Строго говоря, следуя классическим определениям, собственно движителем должен быть назван гребной винт, придающий, в комплексе с такими же или подобными устройствами поступательное или вращательное движение аппарату. Двигателем в рассматриваемом случае является электрический двигатель, трансформирующий электрическую энергию источника питания в механическую энергию, передаваемую валом на гребной винт. Конструктивно целостный блок гребного винта и электродвигателя будем называть ВМА: винтомоторный агрегат

Проектные требования к ВМА конкурсного аппарата. Условия функционирования подводного робота в гидроканалах, опытовых и экспериментальных бассейнах аналогичны, по ряду параметров, условиям их работы на мелководном морском шельфе и в транзитных зонах подводно-подледных акваторий [4-7].

Соответственно, функциональными требованиями к активным движительным комплексам и винтомоторным агрегатам аппаратов указанного назначения являются:

- Взаимное соответствие характеристик крутящего момента электродвигателя и момента гидродинамического сопротивления гребного винта.
- Приемлемость динамических характеристик быстро затухающих переходных процессов в старт-стопных режимах.
- Возможность резервирования и подключения агрегата в адаптивных микропроцессорных программах управления.
- Оперативная ремонтпригодность для замены бортового агрегата в интервале времени продолжительностью от 1 минут до 10 минут.
- Динамическое позиционирование робота на дне, на элементах донного оборудования, на вертикальной и горизонтальной твердых границах и в толще водного пространства акватории в течение не менее 20 секунд в заданной, с точностью до 1° , ориентацией по курсу и дифференту.

В целях достижения указанных характеристик, конструкция ВМА «Гидронавтика» предполагает обеспечение следующих преимуществ:

- повышенную маневренность в условиях фарватеров стесненных донным оборудованием, с возможностью поворота на 360° , для выхода из тупиков;
- обеспечение полного крутящего момента и тяги в любом направлении, в том числе, при скорости обратного хода;
- надежность механической конструкции – один короткий вал и отсутствие конических передач или магнитных муфт в цепи двигатель – винт, означающего, что максимальный крутящий момент электрического двигателя может быть полностью использован без промежуточных механических или электромагнитных ограничений;
- прочность и жесткость корпуса ВМА «Гидронавтика», в том смысле, что агрегат, установленный на рамной конструкции аппарата, выдерживает высокие виброударные нагрузки при авто- и авиа-транспортировке, при падении на твердые поверхности, при соударениях с дном, со стенками, с донным оборудованием и аналогичными роботами;
- гибкий прочный валопровод снижает риски отказа агрегата в области предельных нагрузок и обеспечивает естественное демпфирование за счет упругих деформаций;
- возможность перекомпоновки активного движительного комплекса обеспечивающая большую гибкость проекта и возможность экономии объемов в конструкторском пространстве аппарата для носимого бортового комплекса и полезной нагрузки.

Анализ. При разработке конкурсного гидробота «Акватор 3D» для соревнований по программе MATEC ROV-2012 [5, 8] команда проекта «Гидронавтика» столкнулась с проблемой дефицита вариантов выбора базовых элементов движительного комплекса. Предварительный выбор винтомоторов производился на основании общей схемы расположения и взаимного координирования движителей, требуемых для обеспечения заданной маршевой скорости, скороподъемности и ограничений на максимальную электрическую мощность конкурсного ПА, при выполнении транспортных и технических операций подводной миссии. Было проведено исследование рынка компонентов малых аппаратов и аппаратов мини классов, на основании которого было выявлено следующее:

1) В малобюджетном студенческом проекте коммерчески доступным вариантом может быть использование винтомоторов нижнего уровня семейства аппаратов ГНОМ, с магнитными муфтами, но они, в отличие от тяговооруженных модификаций [9,11], обладают недостаточной тягой, в среднем около 5 ньютон. Кроме того, двигатели не отличаются высокой надежностью и не лучшим образом зарекомендовали себя на конкурсе прошлого 2011 года в Хьюстоне, штат Техас, в бассейне Лаборатории нейтральной плавучести НАСА. В процессе тестирования двигательного комплекса обмотки 2 из 6 двигателей были сожжены и потребовалась срочная замена моторов.

2) Более приемлемыми в качестве базовых двигателей конкурсного аппарата являются винтомоторные агрегаты компании SeaBotix. Эти двигатели соответствуют ограничениям по тяге, не менее 20 ньютон, и не выходят за пределы максимально допустимой суммарной мощности аппарата, до 2000 Вт, при полной 6-ти степенной эффекторной достаточности комплекса. Данные двигатели выпускаются в маслозаполненном варианте исполнения, что не вызовет сложностей связанных с эко-правилами соревнований, если использовать биоразлагающиеся гидравлические масла класса ISO 32/46, SAE класса 20. В профессиональном варианте двигатели SeaBotix рассчитаны на глубины до 1 км. Несмотря на то, что выбор BMA SeaBotix гарантирует достаточно хорошую тягу в основных режимах движения и большой запас по глубине, необходимость в котором проявляется позже при разработке аналогичных промышленных аппаратов, мы вынуждены были отказаться от этого варианта по причине дороговизны, не приемлемой для студенческого малобюджетного проекта.

Промежуточный результат. В итоге, на стадии предварительного проектирования, принято решения о разработке собственного ВМА «Гидронавтика» с диапазоном глубин до 250 м, тягой до 2кг, электрической мощностью одного агрегата до 220 Вт, работающего в условиях кратковременных включений на полную мощность или в режиме продолжительной работы с уровнем тяги не более 50% от максимальной.

При работе в режиме включений на не продолжительное время предусматривается превышение номинальных режимов работы двигателей и смещение рабочей точки по характеристике двигателя к точке с максимальной электрической мощностью и, тем самым, большей механической мощностью. В подобной ситуации резко теряется КПД двигателя, и большая часть электрической энергии уходит на нагрев обмоток. Подобный режим работы двигателя на воздухе возможен только в течение небольших интервалов времени. При работе в воде, в случае превышения допустимых температур обмоток, возможно расплавление изоляции и, в итоге, значительное сокращение ресурса долговечности работы двигателя. Для конкурсных аппаратов подобный режим работы является оптимальным, так как подводно-технические операции выполняются в акваториях с небольшими глубинами < 20 м и в малом секторе донного пространства < 20х20м. При этом основное время работы двигательного комплекса гидробота приходится на стабилизацию глубины и переориентацию по курсу, на что требуется не более 50% от максимальной тяги двигателей при упоре одного гребного винта > 2кг.

Высокие ускорения и скорости перемещения и переориентации аппарата необходимы для минимизации времени, затрачиваемого на погружение-всплытие и горизонтальные перемещения в оперативной зоне, а также времени на выполнение заданий подводных

миссий. Продолжительность конкурсных миссий ограничена, не более 15 минутами, при общем числе 30-45 подводных операций. Исходя из предлагаемого технического задания 2012 г. и требуемой функциональности, студенческим центром «Гидронавтика» было принято решение о собственной разработке ВМА с использованием, двигателей MAXON мощностью 150 Вт, латунных гребных винтов с 4-мя лопастями, диаметром 80 мм (Brass Kort 4 Blade Propeller M5 80mm) и концентрической, по отношению к винту, профилированной в меридиональном направлении направляющей насадки в виде короткой оболочки вращения.

Для оптимизации проектных представлений существенно важно, что двигатели MAXON имеют достаточное информационное обеспечение, Таблица 1, в то время как для гребных винтов фирма-производитель Brass Kort не предоставляет никаких данных, кроме диаметра и числа лопастей. Потому для получения предварительной оценки проектных параметров разрабатываемого ВМА, следуя итерационной процедуре, был использован пробный вариант агрегата, включавший указанный гребной винт, квазицилиндрическую профилированную насадку с радиально-концентрической направляющей решеткой конфузора и двигатель RE 40 Ø40 mm, Graphite Brushes, 150 Watt Article number 218012, с характеристиками представленными в таблице 1:

Таблица 1.

Значения при номинальном напряжении
Номинальное напряжение питания 48,0 V
Число оборотов холостого хода 1550,0 мин ⁻¹
Ток холостого хода 11,8 mA
Номинальная частота 1500,0 мин ⁻¹
Номинальный крутящий момент (макс. длительный момент) 189,0 мНм
Номинальный ток (макс. постоянный ток) 0,898A
Пусковой момент 641,0 мНм Пусковой ток 3,0 A
Максимум КПД 87,5%

В результате пробных испытаний было выявлено, что данный двигатель MAXON, по совокупности характеристик, в основном, подходит для работы с выбранным винтом Brass Kort в насадке. Ток при 100 % тяге (напряжение 48 В) не превышал 1,2 А, что не чрезмерно далеко от номинала, а с учетом внешнего водного охлаждения корпуса вполне подходит для длительной работы. Однако, тяга ВМА с таким двигателем на форсированных режимах составила всего лишь 1 кГ. Для конкурсного гидробота такое техническое решение частично соответствует его функциональности, но преимущество длительных режимов движения оборачивается недостатком тяги на форсированных режимах.

Критерии оптимальности. Исходя из полученных данных, на следующей проектной итерации агрегата, Таблица 2, была выбрана, с теми же винтом и насадкой, другая, более высоко скоростная модель двигателя серии RE 40 Ø40 mm, Graphite Brushes, 150 Watt Article number 218010:

Таблица 2

Значения при номинальном напряжении
Номинальное напряжение 48,0 В
Число оборотов холостого хода 2430,0 мин ⁻¹
Ток холостого хода 20,1 мА
Номинальная частота 2700,0 мин ⁻¹
Номинальный крутящий момент (макс. длительный момент) 187,0 мНм
Номинальный ток (макс. постоянный ток) 1,38
Пусковой момент 995,0 мНм Пусковой ток 7,26
Максимум КПД 89,3%

В качестве основного критерия оптимальности ВМА конкурсного аппарата принято отношение мощности электродвигателя к полезной тяге гребного винта в условиях испытаний агрегата при работе на швартовых режимах испытаний.

В качестве иллюстрации, на Рис. 1, представлены обобщенные области типичных зависимостей характеристик тяги винта (кН) от мощности электрического привода (Вт) [7-9]. Можно заметить, что при всех индивидуальных особенностях типоразмеров, все зависимости укладываются в область близкую к глобальной линейной зависимости $T = k_{ef}N$.

Для представленных на Рис. 1 изолированных модульных ВМА коэффициент эффективности $k_{ef} = 10 \text{ кГ/кВт}$. Аналогичные зависимости известны и для других типов ВМА, в том числе с винтами фиксированного шага в направляющих насадках.

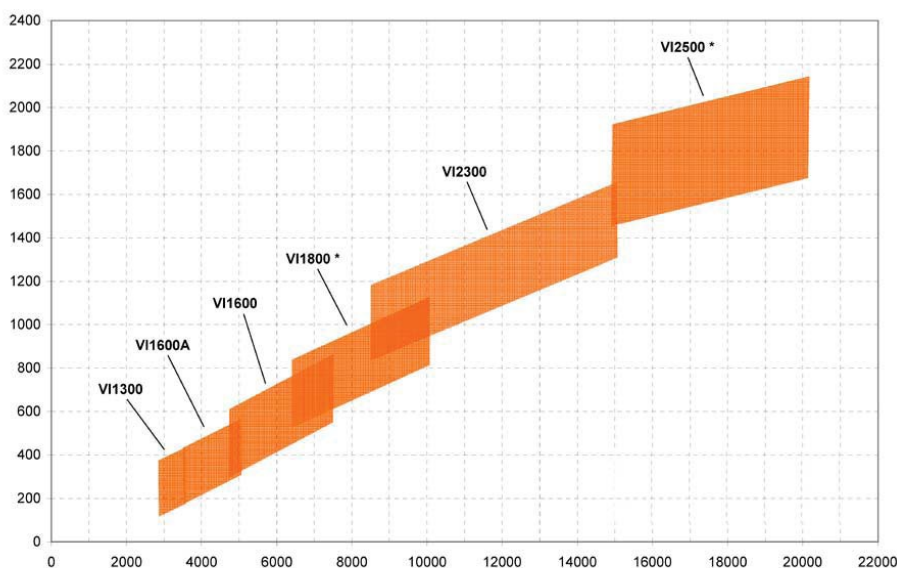


Рисунок 1. График зависимости тяги гребного винта (кН) при испытаниях на швартовых режимах от мощности электродвигателя (Вт) для модульных ВМА.

Для начала были проведены швартовые испытания на 4-х лопастном винте. Испытания проводились при напряжении $U = 48 \text{ В}$ и включали в себя, главным образом, визуальные наблюдения картины обтекания и замеры тока и тяги в двух состояниях: 1) Момент пуска; 2) Установившийся режим. (Рис. 2) Там же на графике нанесена кривая КПД двигателя и отмечена точка его штатного (номинального) режима работы. По характеристике двигателя, графически или с использованием аналитической интерполяции, получаются достаточно точные для проектных целей значения момента и скорости вращения.

В результате предварительного исследования выявлены, в области соизмеримой с размерами ВМА, при малой глубине погружении, эффекты кавитации на гребных винтах. В целях исследования и повышения кавитационной устойчивости были проведены испытания винтомоторного агрегата с 2-х лопастным винтом, с тем же двигателем и по той же схеме.

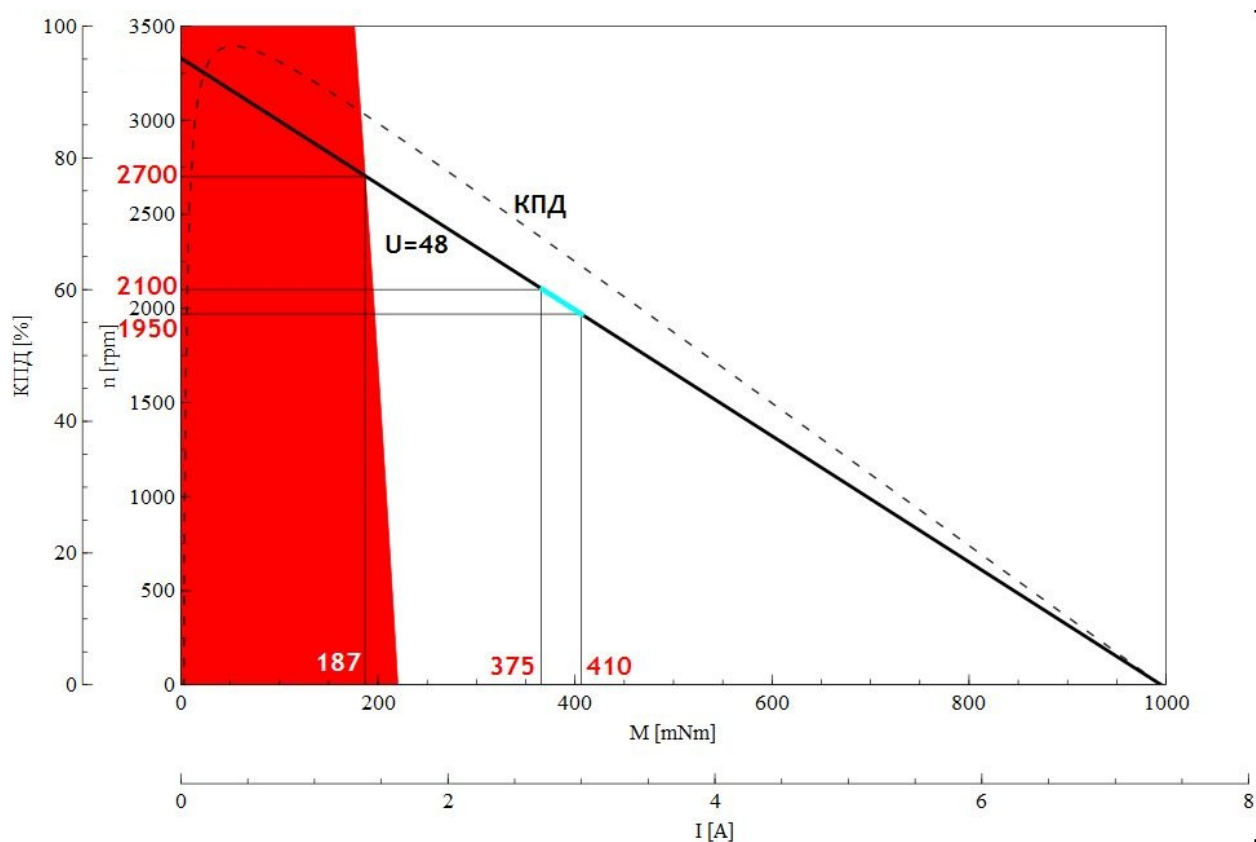


Рис. 2

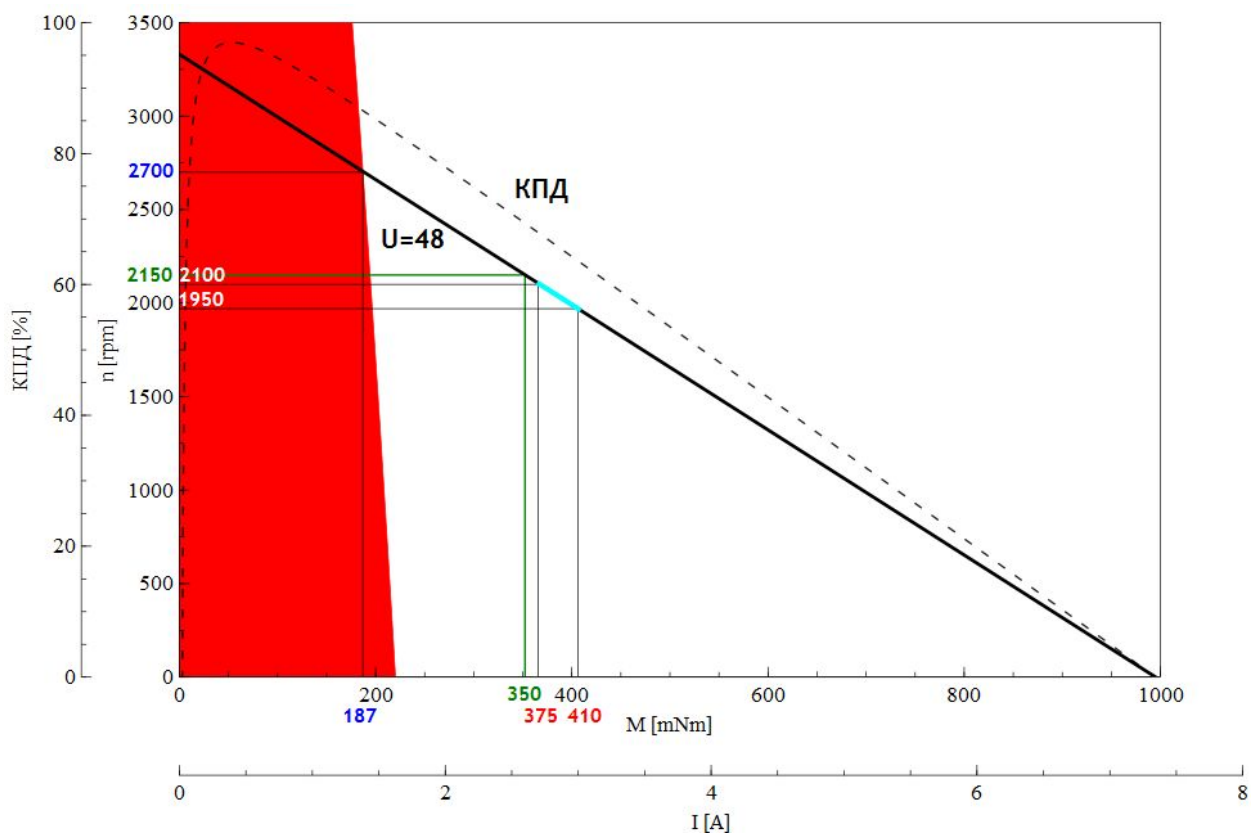


Рис. 3

На предыдущий график, Рис. 2, были наложены зависимости установившегося режима работы двигателя с 2-х лопастным винтом. В параметрах двигателя сильных изменений не наблюдается, однако тяга в установившемся режиме увеличилась на 600 Грамм, Рис. 3.

Затем, при помощи приборов блока питания, были проведены замеры тяги и тока при напряжениях от 0 до 30 вольт с шагом 2 вольта. (Табл. 3). По результатам этих испытаний графически были определены момент и обороты двигателя. (Рис. 3) Получив, таким образом, обороты, мы построили зависимость тяги ВМА от оборотов (Рис. 4)

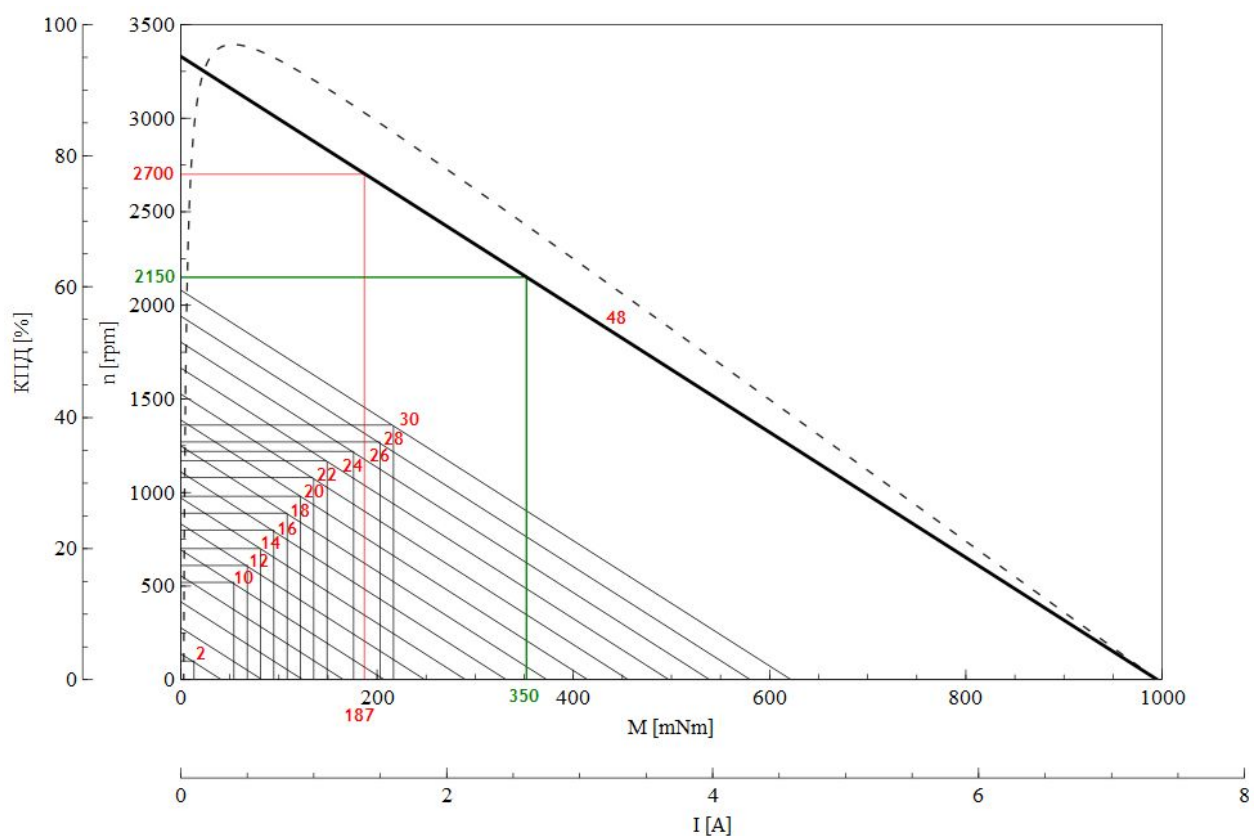


Рис. 4

Таблица 3.

U, [V]	I, [A]	T, [Kg]	n, [rpm]	M [mNm]
2	0,1	start	100	15
10	0,4,	0,	520	56
12	0,5	0,	610	70
14	0,6	0,	700	82
16	0,7	0,	800	95
18	0,8	0,	890	110
20	1,9	0,	980	123
22	1,0	0,	1080	135
24	1,1	0,	1170	150
26	1,3	0,	1220	178
28	1,5	1,02	1270	204
30	1,6	1,20	1360	215
48	2,6	2,22	2150	350

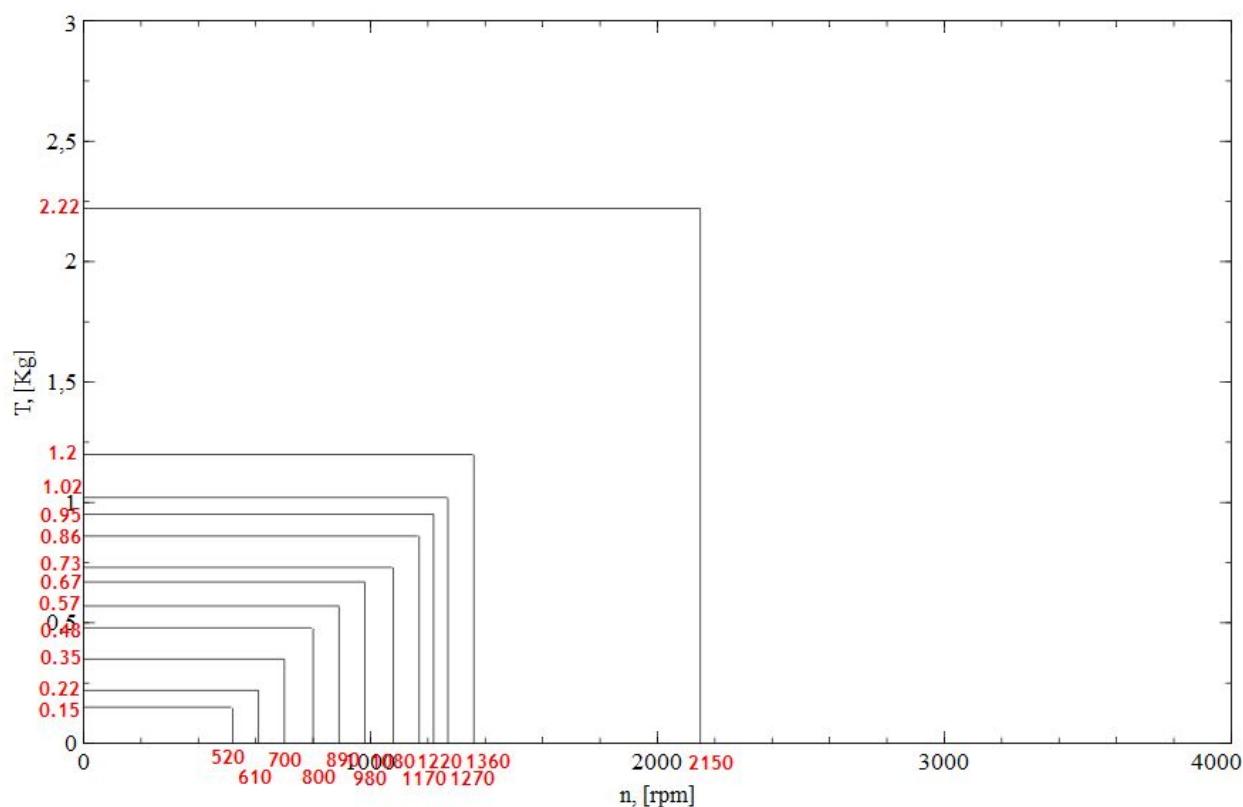


Рис.5

Анализируя полученные нами данные можно отметить высокую степень линейности характеристик в основных рабочих зонах ВМА, что не маловажно для синтеза систем ручного и автоматического управления аппарата.

Тяга, снятая в эксперименте с 78 Ватт механической мощности, составила 2.2 Кг. Общепринято считать, что с 1 кВт мощности изолированного гребного винта снимают максимум 10 кг тяги на швартовых режимах испытаний [10]. С 1 кВт мощности гребного винта в насадке снимают максимум 30 кг тяги на тех же режимах испытаний, что соответствует 2,34 Кг снимаемых с 78 Вт винтомотора «Гидронавтика». Таким образом, максимально возможное значение всего на 140 грамм больше того, что снято в эксперименте. Различие в 6% вполне объясняется сопротивлением защитной решетки на входе в насадку и влиянием спутного потока в использовавшемся опытовом бассейне параллелепипедной формы с размерами водного тела $L \times B \times H = 3 \times 2 \times 1,5$ м. После удаления решетки и устранения спутных течений, путем диафрагмирования водного тела, указанные расхождения могут быть исключены полностью. Таким образом, здесь показано, что тяговые характеристики ВМА «Гидронавтика» выведены на оптимум.

Резюме. Из предварительных наблюдений следует, что на характеристики ВМА, кроме рассмотренных параметров, существенное влияние оказывают глубина, дистанция и ориентация агрегата относительно свободной и твердых границ. Причем указанное влияние существенно различно для вертикальных и горизонтальных движителей.

Достижением оптимума тяговых характеристик винтомоторным агрегатом «Гидронавтика» не исключается необходимость исследования указанных факторов его взаимодействия со смежными элементами донного полигона и с границами оперативной акватории в целом.

Список литературы

1. Северов С. П. Инновационные технологии профессиональной подготовки инженеров подводной робототехники и морской индустрии в России. Электронное научно-техническое издание: Наука и образование. № 10, октябрь 2011 77-30569/233419. Изд. МГТУ, М.: 2012
2. Северов С. П. Практическое управление качеством проекта MATEC ROV-гидробота в конкурентной среде соревнований: Электронное научно-техническое издание. Наука и образование. № 03, март 2012. 77-30569/330374. Изд. МГТУ, М.: 2012
3. Костанди И.М. Под ред. Северова С.П. Проектирование, изготовление и испытания активных движительных комплексов малых подводных аппаратов. Студенческий научный вестник. Сборник тезисов докладов общеуниверситетской н.-т. конференции «Студенческая научная весна-2012», том XII ч.3
4. Подводные технологии и средства освоения Мирового океана.- М.: Издательский дом «Оружие и технологии», 2011. -780 с. с илл. УДК 551.461/.467:62
5. Remotely Operated Vehicle of the World.-London England/ Houston USA: Clarkson research services limited, 2010/2011/ 9th edition.-429 p.
6. Наумов Л.А., Матвиенко Ю.В. Состояние и перспективы развития работ ИПМТ ДВО РАН по созданию подводных робототехнических средств. Материалы 4-й Всероссийской научно-технической конференции "Технические проблемы освоения Мирового океана" (ТПОМО-4). Изд. Института проблем морских технологий ДВО РАН, Владивосток, 2011
7. Вельтищев В.В. «Робототехника в МГТУ им. Н.Э.Баумана»– материалы . XII Международной научно-технической конференции «Современные методы и средства океанологических исследований». Изд. ИОРАН. Москва, 2011.
8. Steven W. Moore, Harry Bohm, Vickie Jensen. Underwater Robotics. Science, design and fabrication. – Monterey, CA: MATE, 2010. 769 с.
9. Северов С.П., Розман Б.Я., Ёлкин А.В. Малые подводные аппараты в инженерной океанологии и океанотехнике. В тр. VIII Межд. Научно-технической конференции Современные методы и средства океанологических исследований. Изд. ИОРАН, М.: 2009 – с. 201
10. Судовые движители [azipod® www.abb.com/guide.ru/pdf](http://www.abb.com/guide.ru/pdf)
11. Комолов М.В., Мысливец И.В., Елкин А.В., Розман Б.Я., Шерстов Е.А. Телеуправляемые необитаемые подводные аппараты ТНПА Супер Гном ПРО-2 – продолжение линии мощных мини-роботов. В тр. XII Межд. Научно-технической конференции Современные методы и средства океанологических исследований. Изд. ИОРАН, М.: 2012 – с. 147