

УДК 532.012.2

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ПЛАВНИКОВОГО ДВИЖИТЕЛЯ С УПРУГИМ ЗАКРЕПЛЕНИЕМ ЛОПАСТИ

В. Н. ГЛУШКО, В. П. КАЯН

Институт гидромеханики НАН Украины, Киев
03680 Киев – 180, МСП, ул. Желябова, 8/4
kayan@ua.fm

Получено 18.06.2012

Приводятся результаты экспериментальных исследований плавникового движителя с рабочим органом в виде подпружиненного жесткого колеблющегося крыла с приводом от электромагнитного двигателя неполноповоротного типа.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: плавниковый движитель, колеблющееся крыло

Наведені результати експериментальних досліджень плавцевого рушія з робочим органом у вигляді підпружиненого жорсткого коливного крила з приводом від електромагнітного двигуна неповноповоротного типу.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: плавцевий рушій, коливне крило

Results of experimental researches of a fin propulsive with executive device in the form of springly rigid oscillating wing with a drive from the electromagnetic engine not full revolving type are shown.

KEY WORDS: fin propulsive, oscillating wing

ВВЕДЕНИЕ

В экспериментальных исследованиях гидродинамических характеристик изолированного колеблющегося крыла с целью использования его как рабочего органа плавникового движителя применяют, как правило, обычные приводы вращательного типа с преобразованием вращательного движения вала тем или иным образом в линейно-угловое колебательное движение рабочего органа [1,2], что приводит к значительному увеличению габаритов приводной системы, снижению ее КПД и надежности.

Однако, если использовать принципиальную схему плавникового движителя гидробионтов [3,4] (что позволит сделать конструкцию плавникового движителя более компактной), то необходимо обеспечить угловые колебательные движения приводного рычага (имитирующего хвостовой стебель дельфина), на свободном конце которого устанавливается лопасть стреловидной либо прямоугольной формы в плане, а соединение ее с рычагом делается либо жестким, либо шарнирным. В последнем случае лопасть может свободно поворачиваться относительно рычага за счет сил гидродинамического напора на некоторый угол, задаваемый либо ограничивающими упорами, установленными на приводном рычаге, либо пружинами, и тогда угол поворота лопасти относительно рычага зависит от упругости пружинных ограничите-

лей и кинематических характеристик лопасти, т.е. амплитуды и частоты ее колебаний.

В случае использования гидробионической схемы для привода колеблющегося крыла угловые колебания рычага наиболее выгодно осуществлять за счет применения в качестве привода линейных либо поворотных электромагнитных двигателей, причем при использовании первых в конструкции привода необходимо иметь дополнительную рычажную систему.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

В Институте гидромеханики НАНУ при участии Института электродинамики НАНУ была разработана конструкция плавникового движителя с приводом угловых колебаний рычага от электромагнитного двигателя неполноповоротного типа [5], преобразующего энергию электромагнитного поля непосредственно в угловые колебания приводного рычага плавникового движителя.

Конструкция электромагнитного двигателя (ЭМД) неполноповоротного типа представлена на рис. 1. Она позволяет реализовать режим вращательно-колебательного движения ротора с угловой амплитудой 18° и частотой колебаний 0.5–5 Гц. В качестве источника питания электромагнитного двигателя использовался электронный силовой блок с форсирующей схемой управления. Статор двигателя разделен на две

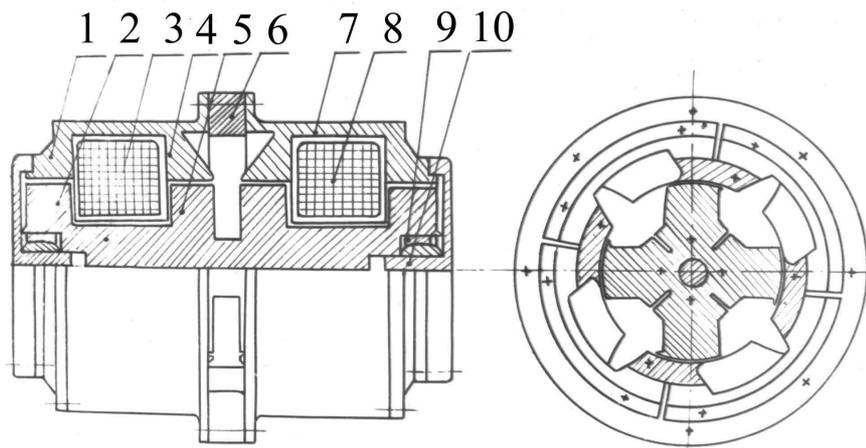


Рис. 1. Схема электромагнитного двигателя неполноповоротного типа

магнитно не связанные половины, разделенные немагнитным кольцом 6. Каждая половина статора состоит из двух кольцевых систем магнитных полюсов, между которыми находятся катушки 3 и 8 соленоидного типа. Каждая система имеет по четыре симметрично расположенных полюса статоров 1 и 4, расположенных по обеим сторонам каждой из катушек.

Якорь выполнен из двух половин, каждая из которых имеет два ряда полюсов – выступов, а сами половины разделены центральной вставкой из немагнитного материала. Рычаг-качалка (с крылом на свободном конце) крепится в центральной части якоря 2. Для обеспечения углового перемещения рычага в кольце 6 статора сделан вырез.

Вершины прямых углов в сечении катушки, статора и якоря округлены, что уменьшает потери магнитного потока, якорь 2 посажен на полюсы 10 статора через шарикоподшипники 9.



Рис. 2. Вид в сборке ПД с подпружиненным крылом и электромагнитным двигателем

Якорь 2 осесимметричен статору, установлен в нем с минимальным зазором и имеет возможность поворота вокруг своей оси на некоторый угол.

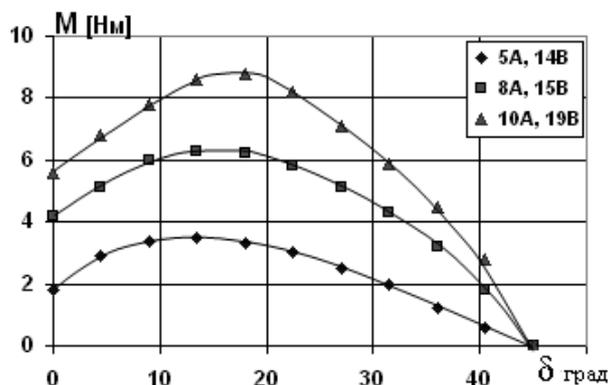


Рис. 3. Статические характеристики ЭМД неполноповоротного типа

Полюса якоря сориентированы относительно полюсов левой и правой половины статора таким образом, что когда справа они находятся друг против друга, то слева – отстоят от этого положения на угол, равный величине рабочего хода (углу поворота) якоря. На полюсах статора и якоря имеются небольшие остроконечные выступы, которые

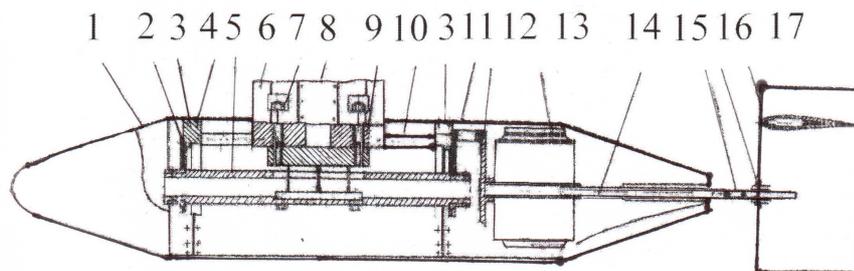


Рис. 4. Измерительный стенд с плавниковым движителем с ЭМД неполноповоротного типа

позволяют увеличить поворачивающий момент M в начальный момент поворота якоря. Фотография ЭМД неполноповоротного типа с установочным кронштейном и с приводным рычагом–качалкой со стреловидным крылом (лопастью) ПД с ограничивающими поворот крыла плоскими пружинами представлена на рис. 2. Масса ЭМД с рычагом–качалкой и кронштейном равна 8.7 кг.

Если при показанном на рис. 1 положении якоря включить левую катушку статора, то под действием магнитных сил притяжения кольцевые системы магнитных полюсов статора повернут системы магнитных полюсов якоря так, что якорь повернется по часовой стрелке и таким образом полюса якоря левой половины двигателя установятся против соответствующих полюсов статора ЭМД. При этом полюса правой половины двигателя будут отстоять от соответствующих полюсов статора на угол, равный величине рабочего хода, для обеспечения обратного хода якоря, для чего необходимо включить правую катушку статора, отключив левую.

Смещение статорных секций друг относительно друга, осуществляемое с помощью немагнитного кольца, позволяет выбирать нужные углы поворота якоря двигателя и развиваемый в начале поворота момент. При этом, за счет уменьшения угла поворота якоря, обеспечивается возможность повышения частоты угловых колебаний якоря двигателя при неизменных параметрах источника питания.

На специальном испытательном стенде были определены статические характеристики электромагнитного двигателя (рис. 3), а именно, зависимости величины крутящего момента M на оси якоря от угла поворота якоря δ при различных значениях тока статора. При подводимой мощности электропитания $N = 0.3$ кВт максимальный крутящий момент на оси якоря M_{\max} составил 10 Н·м.

Для исследования гидродинамических характе-

ристик плавникового движителя приводом от ЭМД неполноповоротного типа был спроектирован и изготовлен стенд для измерения силы тяги ПД и моментов, возникающих на крыле при колебаниях его в воде. Конструкция и общий вид стенда представлены на рис. 4, а фотография в рабочем положении в биогиродинамической трубе [6] – на рис. 5.

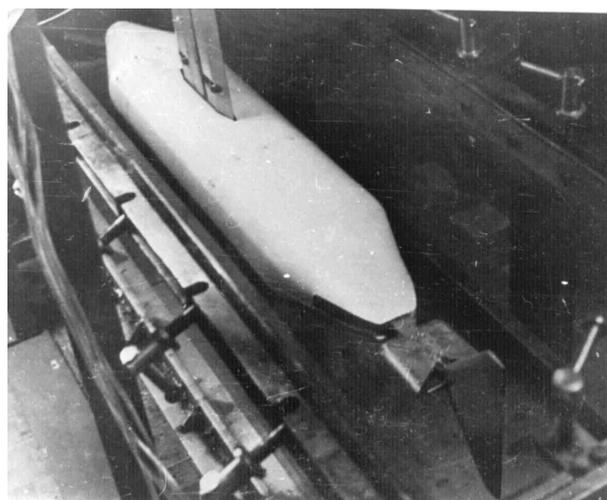


Рис. 5. Стенд в рабочем положении в биогиродинамической трубе

ЭМД неполноповоротного типа 13 с рычагом–качалкой 14 и крылом 17 с помощью кронштейна 12 крепился к силовому шпангоуту 3 (рис. 4). Шпангоуты 3 с оболочкой 4 жестко соединены между собой четырьмя стяжками 10, образуя силовой каркас стенда, к которому крепится ЭМД с рычагом и крылом. С помощью крестообразных тензобалок 2 шпангоуты 3 соединены с центральным трубчатым основанием 5 и ножом–державкой 6. С помощью крестообразных тензобалок измерялись тяга и поперечные силы, создаваемые ко-

леблющимся в горизонтальной плоскости крылом. Между трубой 5 и ножом 6 размещена дополнительно рамочная однокомпонентная тензобалка 9 для контрольного измерения тяги, создаваемой плавниковым движителем.

Корпус имел в сечении форму, близкую к овалу (образован двумя полуокружностями $R = 75$ мм, центры которых разнесены по оси на 50 мм). Носовая и хвостовая части установки имели обтекатели конической формы со сферическим окончанием в носовой части. Внутри ножа-обтекателя имелся герметичный вырез 8 для размещения проводов электропитания ЭМД 13 и тензобалок 2 и 9.

Габаритные размеры измерительного стенда были $L \times B \times H = 1.15 \times 0.2 \times 0.15$ м. Стенд был установлен по оси рабочей части биогидродинамической трубы [6] Института гидромеханики НАНУ. Габаритные размеры рабочей части трубы $L \times B \times H = 1.8 \times 0.4 \times 0.4$ м. Испытание проходили на швартовых, т.е. вода была неподвижной, заглубление корпуса (по центральной продольной оси) составляло 0.2 м. Крыло совершало колебания в горизонтальной плоскости, расстояние от верхней кромки крыла до свободной поверхности воды составляло около 0.07 м.

2. АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Для проведения экспериментальных исследований плавникового движителя с ЭМД из алюминиевого сплава Д16АТ были изготовлены пустотелые крылья стреловидной и прямоугольной формы в плане (рис. 2 и 4) нулевой плавучести. Крыло прямоугольной формы в плане имело симметричный профиль НАСА-0015, удлинение крыла $\lambda = l/b = 2$, размах крыла $l = 0.24$ м, хорда $b = 0.12$ м, площадь $S = 0.288$ м². Исследуемое крыло подсоединялось шарнирно к концу рычага-качалки 6 привода и подкреплялось с обеих сторон либо двумя плоскими пружинами толщиной 0.8 мм (рис. 2), которые служили ограничителями поворота крыла, либо круглыми витыми пружинами с предварительным натяжением (рис. 5). Поворот крыла относительно оси шарнира в течение периода колебания осуществлялся за счет поперечной силы гидродинамического напора, а максимальный угол поворота крыла ограничивался частотой f угловых колебаний рычага и крыла и жесткостью пружин ограничителей.

Измерения мгновенной силы тяги, развиваемой крылом, осуществлялось однокомпонентной тензобалкой 9 балочного типа, которая реагировала

только на действие горизонтальной силы. Внутри переднего шпангоута 3 была установлена крестообразная тензобалка – мембрана 2 (рис. 4), вертикальные тензодатчики 1 которой измеряли величину тяги, а горизонтальные тензодатчики 2 – величину поперечных сил на колеблющемся крыле (рис. 6).

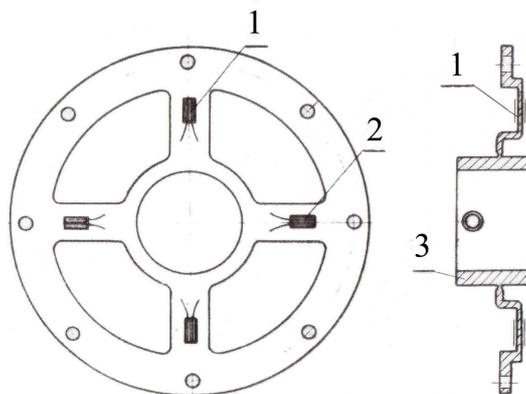


Рис. 6. Крестообразная тензобалка – мембрана

Внутренняя часть 3 (рис. 6) крестообразной тензобалки крепилась к трубе – основанию 5 (рис. 4), а внешняя – к силовому шпангоуту 3. С тензодатчиков 1 и 2 сигналы поступали на тензостанцию и далее на записывающее устройство. Там же записывались величины тока и напряжения, подаваемые на катушки ЭМД неполноповоротного типа.

Для устранения наводок, возникающих от ЭМД и питающей сети, в измерительную схему каждого датчика после усиления сигнала тензостанцией ставился фильтр низкой частоты – дроссель Dr_1 (рис. 7). Так как такие фильтры в некоторой степени искажают полезный сигнал, для корректировки полученных данных были проведены амплитудные и фазовые тарировки этих фильтров.

Тарировочные контрольные характеристики снимались на частотах $f = 0-10$ Гц с интервалом 0.5 Гц. Сигнал от генератора сигналов подавался одновременно на два шлейфа $R_{ш1}$ и $R_{ш2}$ (рис. 7). На $R_{ш1}$ сигнал подавался через фильтр низкой частоты (дроссель Dr_1 на рис. 7), а на $R_{ш2}$ – через активные сопротивления R_4 и R_5 . Полученный сигнал уменьшался по амплитуде и сдвигался по фазе.

Имея контрольные тарировочные характеристики для всех режимов работы измерительного стенда с электромагнитным приводом, пересчетом получали истинные значения результирующей гидродинамических сил, действующих на крыло.

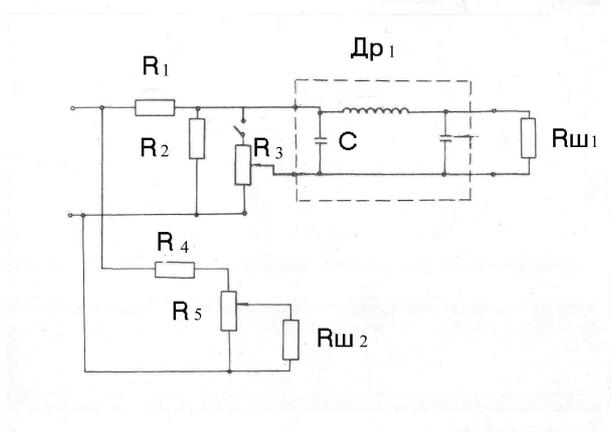


Рис. 7. Схема прохождения сигнала от тензодатчиков

Все тензобалки прошли статическую тарировку по нагрузке в диапазоне измеряемых сил. Статическая тарировка показала, что погрешность от влияния поперечных гидродинамических сил на тензоэлементы крестообразной тензобалки, измеряющие величину силы тяги плавникового движителя, не превышала 5–7%.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Во время работы на измерительном стенде плавникового движителя с ЭМД исследуемое крыло (прямоугольной формы в плане) совершало угловые колебательные движения относительно рычага-качалки ЭМД, обусловленные гидродинамическим напором, возникающим при поперечных движениях крыла, и жесткостью пружин (рис. 2), служащих ограничителями поворота крыла. Максимальный угол поворота крыла (амплитуда угловых колебаний β_0) зависел от величины частоты f колебаний рычага и крыла, а также от жесткости пружин-ограничителей.

Величина тяги F , создаваемая колеблющимся крылом в течении периода колебаний, дважды менялась от 0 до F_{max} . По осциллограммам интегрированием по площадям определялась величина средней за период колебаний величины силы тяги $F_{ср}$, развиваемой колеблющимся крылом.

Жесткость пружин-ограничителей в эксперименте менялась посредством изменения места точек крепления плоских пружин вдоль рычага-качалки, а именно: положение 1 – мягкое, точка крепления пружины максимально удалена от оси поворота крыла, 2 – среднее и 3 – жесткое, точка

закрепления пружины максимально приближена к оси поворота крыла.

Зависимости величины средней за период колебаний тяги $F_{ср}$, создаваемой плавниковым движителем, от частоты колебаний приводного рычага ЭМД при разных значениях жесткости пружинных упоров показаны на рис. 8.

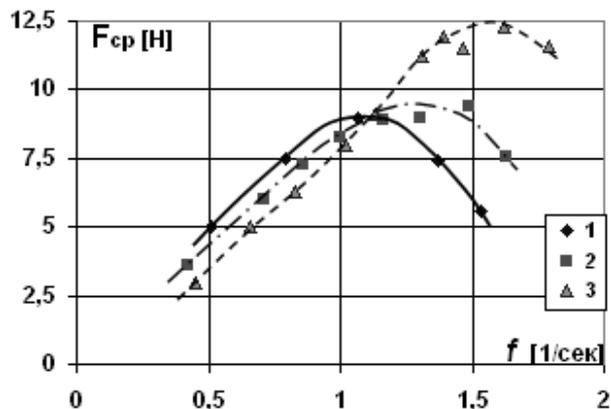


Рис. 8. Влияние величины жесткости плоских пружин-ограничителей на величину средней за период колебаний тяги $F_{ср}$ в зависимости от частоты f колебаний крыла (обозначения 1, 2 и 3 – см. в тексте)

Из графиков на рис. 8 хорошо видно, что величина жесткости пружин-ограничителей существенно влияет на пропульсивные характеристики плавникового движителя с колеблющимся крылом. При малых величинах частоты колебаний крыла ($f < 1$) более податливые пружины-ограничители позволяют крылу сделать больший поворот относительно рычага-качалки привода. При этом угол отклонения хорды крыла относительно продольной оси рычага-качалки будет максимальным в момент прохождения им нейтральной оси колебаний, а в момент максимального углового отклонения рычага хорда профиля крыла будет совпадать с продольной осью рычага, обеспечивая максимальную амплитуду линейных колебаний задней кромки крыла. Величина этой амплитуды, как известно [2], существенно влияет на создаваемую колеблющимся крылом силу тяги. В этом диапазоне величин частоты колебаний крыла ($f < 1$), величины средней силы тяги $F_{ср}$ плавникового движителя имеют линейную зависимость от частоты колебаний f и обратно пропорциональны величине жесткости пружин-ограничителей.

С увеличением частоты колебаний крыла ($f > 1$) мягкое упругое закрепление крыла на рычаге ПД не может уже серьезно противостоять силе гидро-

динамического напора, действующей перпендикулярно нейтральной оси колебаний крыла. Эта вертикальная сила пропорциональна квадрату скорости поперечного движения крыла, а скорость эта зависит и от частоты, и от амплитуды линейных колебаний крыла. Угол поворота крыла относительно рычага в районе нейтральной оси становится очень большим, а угол атаки весьма малым, что приводит к резкому снижению подъемной силы на крыле, вносящей основной вклад в создание силы тяги ПД.

Более выгодным становится иметь более жесткие пружины-ограничители колебаний крыла (кривые 2 и 3 на рис. 8). Пружины большей жесткости при больших частотах колебаний крыла не позволяют крылу увеличить угол поворота относительно рычага и сохраняют в области нейтральной оси колебаний крыла приемлемые величины угла атаки.

Следует также отметить, что такая же картина наблюдается и у дельфинов [3]. При разгоне, когда линейная скорость дельфина еще очень мала, хвостовая лопасть дельфина совершает колебания с большой амплитудой и линейных, и угловых колебаний, тем самым обеспечивая необходимую величину угла атаки на лопасти (крыле) и обеспечивая большую величину силы тяги, необходимой для создания ускорения тела дельфина. Когда же дельфин плавает с крейсерской скоростью, когда на первый план выходит оптимизация энергетических затрат, частота колебаний хвостового плавника значительно выше, а амплитуда линейных колебаний задней кромки лопасти и угловых колебаний лопасти относительно хвостового стебля дельфина существенно уменьшается. Здесь роль упругих регулируемых ограничителей поворота лопасти относительно хвостового стебля играют определенные мышцы, которые автоматически меняют свою упругость в зависимости от режима плавания дельфина.

Таким образом, если обеспечить переменную жесткость упругого закрепления лопасти плавникового движителя, можно оптимизировать работу ПД в зависимости от режима его работы. На конструкцию такого устройства авторами получен патент Украины [7].

Подобный движитель может быть использован в качестве основного или дополнительного движителя двигательно-движительного комплекса для малогабаритных подводных и надводных аппаратов, а также как движитель, использующий энергию волнения моря [8].

1. Глушко В. Н., Каян В. П., Козлов Л. Ф. Гидродинамические характеристики прямоугольного колеблющегося крыла // Бионика.- 1984.- Вып.18.- С. 40-44.
2. Каян В. П., Глушко В. Н. Экспериментальное исследование гидродинамики жесткого колеблющегося крыла // Бионика.- 1992.- Вып.25.- С. 71-75.
3. Каян В. П. О гидродинамических характеристиках плавникового движителя дельфина // Бионика.- 1979.- Вып.13.- С. 9-15.
4. Козлов Л. Ф. Теоретическая биогидродинамика // К.: "Вища школа". - 1983. - 238 с.
5. Афонин А. А., Дыхненко Ю. И., Каян В. П., Козлов Л. Ф., Мельничук Л. П. Плавниковый движитель // А.С. СССР №977272, Бюллетень ГК СМ СССР по делам изобретений и открытий.- 1982.- №44. - С. 57.
6. Каян В.П., Пятецкий В.Е. Биогидродинамическая установка замкнутого типа для исследования гидродинамики плавания морских животных // Бионика.- 1971.- Вып.5.- С. 75 121-125.
7. Глушко В.Н., Каян В.П. Плавцевий рупій // Патент України на корисну модель №81736. Бюлетень.- 2013.-№13.
8. Глушко В.Н. Исследование влияния параметров морского волнения на величину тяги создаваемой волновым движителем в виде колеблющегося крыла с упругой заделкой. // Прикладна гідромеханіка- Т. 11(83) - № 4.- 2009.- С. 47-53.