

УДК532.5; 629.5

METHODOLOGICAL BASIS OF STEERING A VESSEL WITH TWO AZIPODS**МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ СУДНОМ С ДВУМЯ ПОВОРОТНЫМИ КОЛОНКАМИ АЗИПОД****V. Golikov, Ph.D., associate professor****В.В. Голиков, к.т.н., с.н.с., доцент***Odessa National Maritime Academy, Ukraine**Одесская Национальная Морская Академия, Украина***ABSTRACT**

The article describes the basic methodological principles of ship handling with two Azipods during maneuvering and rectilinear motion with further analysis and suggestions.

Keyword: Azipod, ship handling, maneuvering.

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными или практическими задачами.

С точки зрения пропульсивных качеств судна, наиболее эффективной является одновальная движительная установка. Это позволяет существенно уменьшить выступающие части и достигнуть наиболее эффективного взаимодействия винта и корпуса судна.

На больших судах для достижения большой скорости требуемая мощность столь велика, что затруднительно использование суммирующего редуктора большой мощности, что обуславливает применение двухвальных установок. Если используются два гребных винта одинакового вращения, то требуется значительная перекладка руля для удержания на заданном курсе. По этой причине используют противоположное направление вращения гребных винтов.

С эксплуатационной точки зрения более предпочтительным является наружное вращение гребных винтов, при котором уменьшается вероятность повреждения лопастей винта плавающими предметами и заклинивание гребного винта битым льдом.

Около 20 лет назад была введена новая движительная установка Азипод (Azipod), и система используется в качестве основной для роскошных круизных лайнеров, буксиров и судов, плавающих во льдах. Указанная движительная установка имеет много преимуществ. Прежде всего, она уменьшает расход топлива на 15%, экономит пространство внутри корпуса судна и дает большую свободу для проектирования судов, облегчает маневренность на ограниченном пространстве и существенно повышает производительность ледовых операции. Однако, наиболее важным преимуществом системы является уменьшение расхода топлива и выбросов CO₂.

В основу работы системы положены принципы работы известных движителей типа поворотные винтовые колонки. Приводом является электрический двигатель, помещенный в гондole, выступающей за пределы корпуса судна и которая может поворачиваться вокруг вертикальной оси. Это позволяет изменять упор винта, в любом направлении, изменяя частоту вращения электродвигателя привода с винтом фиксированного шага. Судну не нужны рули, рулевые машины и длинные валопроводы внутри корпуса судна. Схема расположения установки с тремя винтами представлена на рис.1. В современных движителях дополнительно под гондолой размещают стабилизатор, который в совокупности с креплением к корпусу образует обтекаемый руль (рис.2). Мощность таких установок достигает $4,5 \div 25$ МВт.

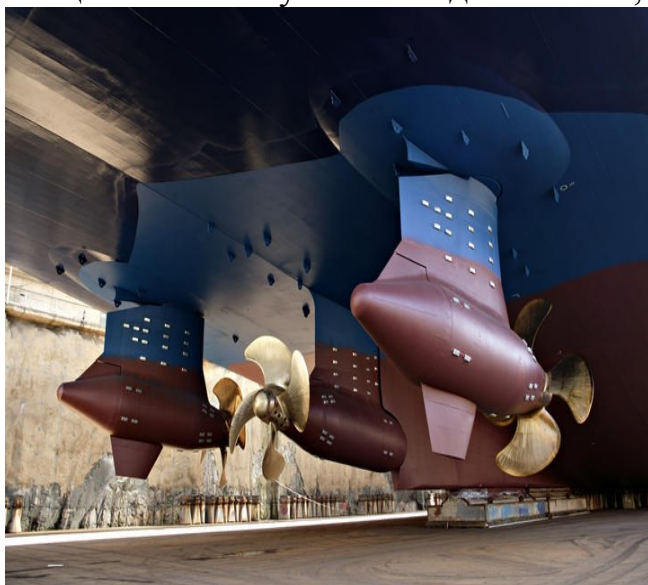


Рис.1. Расположение трех движителей Аzipод в кормовой части судна

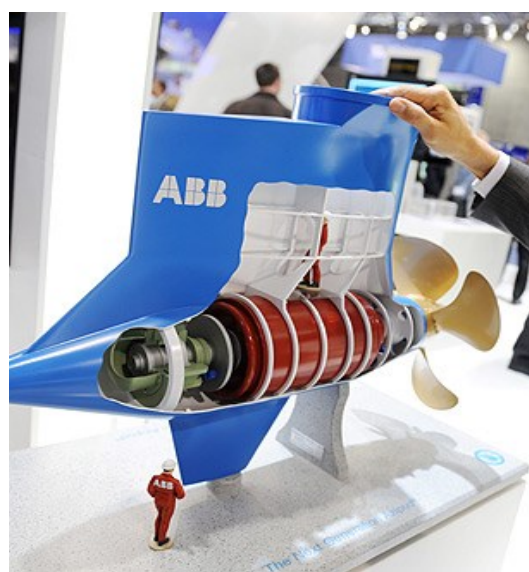


Рис.2. Расположение движителя Аzipод в гондole

Маневренные характеристики судов с такой движительной установки исследованы не достаточно, что затрудняет судоводителям планирование траектории движения судна и обеспечивать управление положением его центра тяжести по траектории.

Управление поворотом судна осуществляется за счет гидродинамической силы на корпусе гондole и боковой силы упора винта.

Винто-рулевая колонка Аzipod состоит из высокомоментного электродвигателя, расположенного в отдельном корпусе – поде (рис.2). Гребной винт установлен непосредственно на валу электродвигателя, что позволило передавать вращающий момент с двигателя непосредственно на винт, минуя промежуточные валы или редукторы. Отказ от промежуточных элементов пропульсивной системы позволил исключить потери механической энергии, возникающие в них при передаче энергии с вала двигателя на винт. Установка закреплена вне корпуса судна с помощью шарнирного механизма и может вращаться вокруг вертикальной оси на 360° , что позволяет получить лучшую маневренность судна как по курсу, так и по скорости по сравнению с традиционными движительными установками. Такое техническое решение

сокращает объем машинного отделения, повышая грузовместимость судна. Сведения об устройстве и работе Азиподов при движении судна носят рекламный характер, что также не позволяет судоводителям в полной мере использовать преимущества судовых энергетических установок такого типа.

Анализ последних достижений и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и выделение нерешенных ранее частей общей проблемы.

В работе [1] рассмотрены общие принципы управления двумя винтовыми колонками и приведена методика графического определения точки приложения равнодействующей силы и ее величины без комментариев по управлению маневрированием.

В работе [2] приведены технические характеристики судов ледового класса с установками Азипод на корпусе судна без изложения принципов управления маневрированием при выполнении морских операций.

В работе [3] описаны результаты исследований ходкости танкера «Капитан Готский» с двумя движительными установками в мелкобитых льдах, а также его ледопробиваемость.

В работе [4] изложены пути совершенствования пропульсивных комплексов судов с рассмотрением возможности использования движителей Азипод.

Приведенные публикации не содержат информации необходимой для теоретического обоснования процесса управления маневрированием судов с движителями Азипод, теоретическая база по управлению судами отсутствует, что создает дополнительную навигационную угрозу судоходству.

Формулирование целей статьи (постановка задачи).

Процесс движения судна с двумя Азиподами (рис. 3) осуществляется при:

- симметричной работе движителей с $P_{ел} = P_{еп}$;
- двух видах движения: переход с одного постоянного курса на другой, активное маневрирование при выполнении морских операций;
- движении точки G и вращении вокруг нее центра тяжести судна, расположенного на линии OX диаметральной плоскости с координатами $G(0,5L; 0)$;
- приложении к точке G суммарных векторов сил P_{Σ} и скорости судна V ;
- прямопропорциональной зависимости суммарной мощности Азиподов N_{Σ} от P_{Σ} ($N_{\Sigma} = 0,0972P_{\Sigma}$);
- углах поворота Азиподов $\delta p \in [0; 360^\circ]$;
- устойчивости, обеспечиваемой постоянной времени задержки поворота и характеристик одерживания;
- скоростью движения судна постоянная $V = const$.

Изложение материала исследования с обоснованием полученных научных результатов.

Основным конструктивным условием работы гидропропульсивного комплекса судов, является

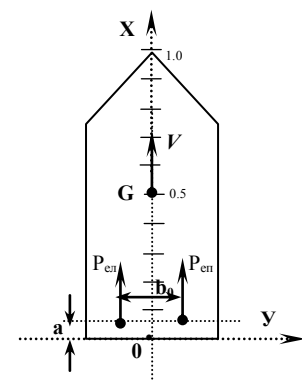


Рис.3. Расположение сил упора вперед двухвинтового Азипода

симметричность работы движителей $P_{ел}$, $P_{ен}$ при движении постоянным курсом и при маневрировании.

Движение постоянным курсом требует устойчивости движения при определяющих параметрах: постоянной времени задержки и характеристики одерживания поворота [5]. Упор винтов (рис.3.) обеспечивает движение со скоростью V силой P_e (кН), которая в условиях эксплуатации судна может быть определена по величине предельной мощности Азипода N (КВт) [3] (на швартовых).

$$P_e = 0,0972N.$$

Вторым, режимным условием движения таких судов, является отказ от работы винтов в противоположных направлениях и ограничения по перекадки руля до 35° , хотя поворот Азиподов на большие углы приводит к потере упора винтов.

При выполнении поворотов при движении постоянной скоростью на переходе. Удержание на постоянном курсе производится за счет симметричной перекадки корпусов подов рулевым приводом. Удержание на курсе происходит за счет боковой составляющей гидродинамической силы на корпусе пода и поперечной составляющей силы упора винта. Для того, чтобы понять порядок гидродинамической силы на поде, отметим, что площадь пера руля судна длиной 305 м составляет около 90 м^2 , а длиной 220 м около 45 м^2 . По оценкам, площадь проекции пода, стабилизатора и конструкции крепления вращающейся части к корпусу на линию, параллельную диаметральной плоскости составляет $50 \div 55 \text{ м}^2$. При симметричной работе винтов на упор переднего хода управление происходит за счет минимальных углов перекадки привода до 3° .

При появлении внешних возмущений их компенсацию предлагается производить двумя способами – путем незначительного уменьшения упора винта на борту, который противоположен стороне сноса. Другим способом является

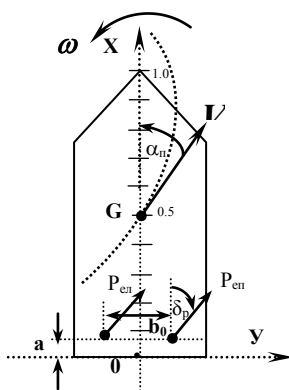


Рис.4. Поворот влево синхронной перекадкой колонок

постоянная перекадка движителей на постоянный угол, при котором боковая сила компенсирует снос и манипулирование, для удержания на курсе, вокруг этого положения.

Выполнение поворота на новый курс при движении полным ходом, возможно, выполнять двумя способами – перекадкой приводов обоих движителей в сторону противоположную повороту или сохранение одного из движителей неизменным, и перекадка другого на определенный угол.

При синхронной перекадке обоих колонок для поворота на угол δ_p (рис.4) гидродинамическая сила на колонке может быть рассчитана по следующей формуле:

$$R_{py} = 0,5 \cdot C_{py} \cdot \rho \cdot S_{np} \cdot V_l^2, \quad (1)$$

где C_{py} – безразмерный гидродинамический коэффициент колонки, отн. ед.; ρ – плотность морской воды, г/см³; S_{np} – площадь проекции подводной части корпуса колонки, м²; $V_{л}$ – скорость судна, узлы.

Расчет коэффициента поперечной гидродинамической силы на колонке можно произвести по формуле Л. Прандтля:

$$C_{py} = \frac{2 \cdot \pi}{1 + \left(\frac{2}{\lambda_p} \right)} \cdot \delta_p^0, \quad (2)$$

где λ_p – относительное удлинение колонки, отн. ед.; δ^0 – угол перекадки колонки, °.

Относительное удлинение колонки может быть получено из выражения:

$$\lambda_p = \frac{h_{np}^2}{S_{np}}, \quad (3)$$

где h_{np} – высота колонки по баллеру.

Относительная площадь колонки находится по выражению:

$$S_{p\%} = \frac{S_p \cdot 100}{L \cdot T_{CP}}. \quad (4)$$

Поперечную составляющую R_{zy} определяется зависимости (1).

Недостатком синхронного управления колонками для поворота является падение упора винтов, практически пропорционально углу перекадки колонки.

Другим способом экономичного удержания судна на курсе является выставление одной из колонок в положение параллельно ДП, а другой манипулировать относительно среднего положения. При этом для того, чтобы достигнуть максимального эффекта, манипулировать рекомендуется колонкой, которая находится на наветренном борту. Это незначительно уменьшает упор колонки и компенсирует снос, позволяя удерживать судно на курсе манипуляцией перекадкой вокруг линии, параллельной ДП.

Если необходимо выполнить поворот на угол более 30°, то можно использовать перекадку колонки стороны поворота на угол до 90° (рис.5). Это соответствует результирующему упору на угол 45° (при симметричном упоре обоих винтов), однако при этом гидродинамическая сила на колонке будет уменьшаться, за счет срыва потока воды.

Таким образом, выполнение операции удержания судна курсе и поворот на полном ходу может быть выполнен оптимальным образом, при манипуляции одной из колонок. Однако получить расчетным способом значения сил на колонках затруднительно, из-за отсутствия корректных методик определения

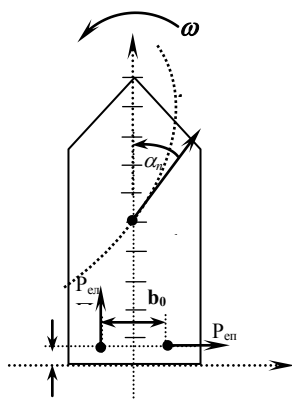


Рис.5. Поворот влево перекадкой одной колонки

гидродинамических сил на корпусе пода.

Для исследования алгоритмов управления ходкостью судов, с движителями Азипод, было произведено имитационное моделирование управления буксиром водоизмещением 549 тонн, длиной 39,3 м, шириной 9,8 м с двумя движителями Азипод мощностью по 1250 КВт каждый.

Были выполнены эксперименты пассивного и активного торможения, поворота и одерживания поворота.

Величину коэффициента общего сопротивления K_{Σ} из эксперимента пассивного торможения можно получить по известной формуле [5]:

$$K_{\Sigma} = \frac{m_x}{0,514V_0 t''} \cdot \left(\frac{V_0}{V_K} - 1 \right). \quad (6)$$

где m_x – масса судна, с учетом присоединенной массы воды по оси X , т; V_0 – скорость судна в момент остановки двигателя, м/с; V_K – скорость судна в момент остановки секундомера, м/с; t'' – время падения скорости от V_0 до V_K , с.

При 3-х кратных наблюдениях торможения среднее время падения скорости от $V_0=12,6$ уз до $V_K=2,3$ уз составило $t''=98$ с при времени прохождения команды равном $t'=3$ с.

В результате значение коэффициента сопротивления равно:

$$K_{\Sigma} = \frac{m_x}{0,514 \cdot V_0 \cdot t''} \cdot \left(\frac{V_0}{V_K} - 1 \right) = \frac{1,1 \cdot 549000}{0,514 \cdot 12,6 \cdot 98} \left[\frac{12,6}{2,3} - 1 \right] = 4261 \quad \text{кг/м.}$$

Зависимость падения скорости от времени приведена на графике на рис.6.

Активное торможение производилось работой обоих машин на задний полный ход от скорости до полной остановки судна.

Торможение производилось задним полным (ЗП), задним средним (ЗС) и задним малым (ЗМ). Зависимость падения скорости от времени приведена на графике на рис.7.

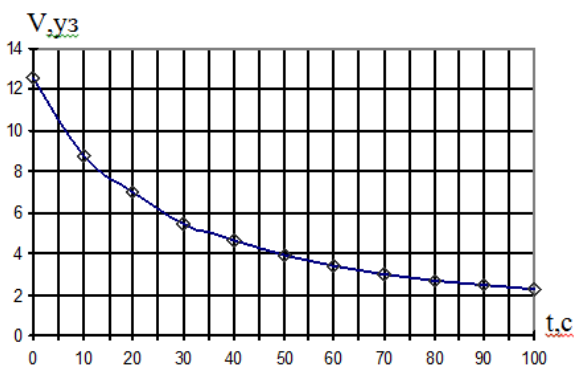


Рис. 6. Пассивное торможение

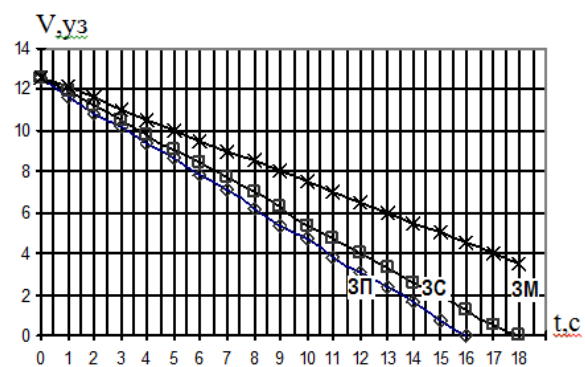


Рис. 7. Активное торможение

Из полученных результатов можно сделать вывод, что использование режима торможения задним полным не дает существенных преимуществ, поэтому при маневрировании целесообразно использование режима ЗС.

Режим поворота исследовался при использовании синхронной перекладки двух рулевых колонок, и по одной рулевой колонке правого и левого бортов, при

этом поворот выполнялся на 360° . Исследования поворотливости производились при скорости хода 12,6 узлов.

Диаграмма управляемости при использовании двух колонок определялась три раза, а результаты усреднялись. Результаты исследования приведены в таблице 1.

Безразмерная угловая скорость рассчитана по формуле:

$$\bar{\omega} = \frac{\omega_{уст}}{V_{уст}} L, \quad (6)$$

где $\bar{\omega}$ – безразмерная угловая скорость; $\omega_{уст}$ – установившаяся угловая скорость, рад/с; $V_{уст}$ – установившаяся линейная скорость, м/с.

Таблица 1. Результаты поворота при переключке обеих колонок

Угол переключки	Линейная скорость, уз начало/конец	Угловая скорость градусы/мин градусы/с	Безразмерная угловая скорость	Время поворота
Право 10°	12,6 /11,6	262/4,4	0,51	1 мин 40 с
Право 20°	12,6 /10,6	338/5,6	0,7	1 мин 25 с
Право 30°	12,6 /9,4	387/6,45	0,92	1 мин 15 с
Право 40°	12,6 /8,6	447/7,45	1,18	1 мин 10 с
Право 50°	12,6 /7,8	527/8,8	1,50	1 мин 05 с
Право 60°	12,6 /7,0	577/9,6	1,82	1 мин 00 с
Право 70°	12,6 /6,2	627/10,5	2,2	0 мин 55 с
Право 80°	12,6 /5,8	656/10,9	2,5	0 мин 50 с
Право 90°	12,6 /5.4	686/11,4	2,8	0 мин 45 с

Диаграмма управляемости влево симметрична, поэтому результаты приводить нецелесообразно. В безразмерном виде диаграмма управляемости для двух рулевых колонок имеет вид, приведенный на рис.8.

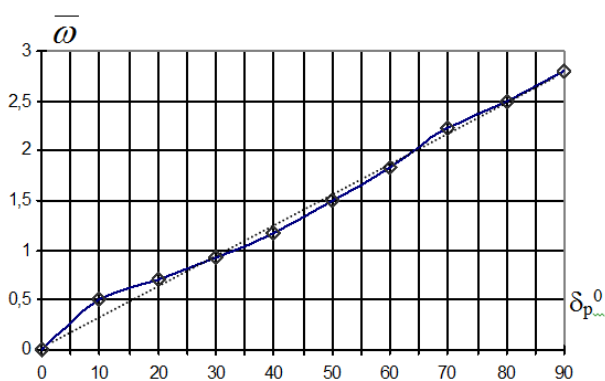


Рис.8. Диаграмма управляемости

Указанная зависимость близка к линейной, как показано на рис.8 штриховой линией.

Поворот вправо/влево выполнялся правой колонкой влево и левой колонкой вправо. Как показал анализ результатов испытаний при повороте на 360° диаграмма симметрична, поэтому приведем результаты поворота вправо левой колонкой.

Результаты исследования приведены в табл. 2.

Таблица 2 Результаты поворота при перекладке левой колонки

Угол перекладки	Линейная скорость, уз начало/конец	Угловая скорость градусы/мин градусы/с	Безразмерная угловая скорость	Время поворота
Лево 10°	12,6 /12,4	82/1,4	0,15	4 мин 05 с
Лево 20°	12,6 /12,2	139/2,3	0,25	2 мин 45 с
Лево 30°	12,6 /12,1	171/2,9	0,32	2 мин 15 с
Лево 40°	12,6 /11,8	200/3,3	0,37	2 мин 00 с
Лево 50°	12,6 /11,5	225/3,8	0,44	1 мин 40 с
Лево 60°	12,6 /10,4	250/4,2	0,54	1 мин 33 с
Лево 70°	12,6 /8,9	275/4,6	0,7	1 мин 28 с
Лево 80°	12,6 /7,6	290/4,8	0,84	1 мин 23 с
Лево 90°	12,6 /6.2	305/5,1	1.1	1 мин 20 с

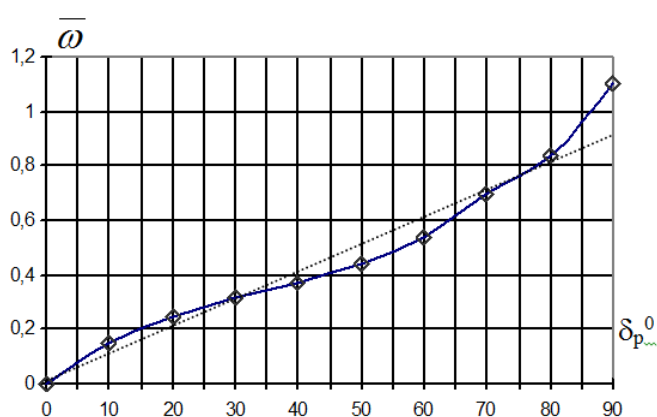


Рис. 9 Диаграмма управляемости

В безразмерном виде диаграмма управляемости для одной рулевой колонки имеет вид, приведенный на рис.9.

Характеристики одерживания поворота исследовались при повороте на угол 60° – 100°. Время одерживания от 3с (при углах перекладки колонки на 10°) до 10 с (при углах перекладки 90°), а углы одерживания колебались в пределах 10° – 15°.

Выводы и перспектива дальнейшей работы по данному направлению.

Удержание судна на курсе рекомендуется производить одной рулевой колонкой, той, которая находится на наветренном борту. Выполнение такой процедуры двумя колонками приводит к снижению скорости движения.

Выполнение поворота судна рекомендуется производить одной колонкой, той, которая противоположна стороне поворота.

Одерживание судна необходимо выполнять перекладкой колонки прямо, и при необходимости, обратной перекладкой в случае, если необходимо ускорить остановку поворота.

Активное торможение весьма эффективно, и при небольших скоростях переднего хода торможение происходит на расстоянии 2-х корпусов и занимает время менее 15 с. Однако для получения более полных результатов необходимы дальнейшие исследования на крупнотоннажных судах и в натуральных условиях.

Результаты исследования планируется использовать судоводителям для работы на судах с движителями Азипод и в морских учебных заведениях при обучении курсантов старших курсов, а также при создании интеллектуальных систем при принятии решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Демин С.И. Управление судном./ С.И.Демин и др.–М.: Транспорт, 1991. – 359 с.

2. Разработка проекта оснащения судна движительной – рулевой системой Азипод. Компания АВВ Оу. –Хельсинки, 2005. – 34 с.
3. Таровик О.В. Анализ результатов попутных исследований ходкости танкера «Капитан Готский» в мелкобитых льдах./ О.В. Таровик. Труды ЦНИИ им.акад. А.Н.Крылова, №63, 2011. –С. 59-68.
4. Шостак В.П. Направление усовершенствования пропульсивных комплексов транспортных судов / В.П. Шостак, Б.М. Личко, А.Ю. Манзюк // Сб.научн.трудов НУК.– Николаев, 2010, № 5(434). С.82-90.
5. Вильский Г.Б. Навигационная безопасность при лоцманской проводке судов. //Г.Б. Вильский,А.С. Мальцев, В.В. Бездольный, Е.И. Гончаров / Под ред. А. С. Мальцева, Г. Б. Вильского. – Одесса-Николаев: Феникс, 2007. – 456 с.