

Предварительные расчеты показывают, что стандартизация информационной среды по критерию бальности дает повышение ситуационной осведомленности около 25%, по критерию согласованности около 85%. Соответственно можно сделать вывод о том, что формализация информационно-онтологического континуума по вышеуказанным критериям создает предпосылки для формирования нового информационного стандарта на базе дополненной реальности применительно к морским эргатическим системам цифрового типа [5, 6].

Литература

1. Губинский А.И., Евграфов В.Г. Эргономическое проектирование судовых систем управления. – Л.: «Судостроение», 1977. – 224 с.
2. Popov A.N. E-Navigation mixed reality interface / E.V. Khekert, A.I. Kondratiev, D.E. Studenikin // 20 th Annual General Assembly (AGA) of the International Association of Maritime Universities (IAMU), 1-2 November, Tokyo, Japan, 2019. – P. 40-41.
3. Иващенко А.В., Катиркин Г.В., Ситников П.В., Сурнин О.В. Акцентная визуализация в интерфейсах дополненной реальности // Программные продукты и системы. – 2018. – Т. 31. – №4, – С. 740-744.
4. Попов А.Н. Формирование информационного стандарта на примере дополненной реальности // Эксплуатация морского транспорта. – 2020. – №1 (94). – С. 49-58.
5. Popov A.N. Creating a crewless ship in the framework of the technological paradigm of the Russian Federation / V.V. ZaslonoV, A.A. Golovina // ISCI 2019 Conference proceedings, Industry competitiveness digitalization, management and integration, Volume 1, 2020. – P. 468-474.
6. Юсупов Л.Н. Эксплуатационные возможности морских автоматизированных информационно-идентификационных систем, включающих спутниковые подсистемы высокоточного местоопределения (на примере Азово-Черноморского бассейна): диссер-

тация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Специальность 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

7. Кондратьев С. И. Эргономический подход к оцениванию деятельности судовых специалистов: суть проблемы и подход к ее решению / С.И. Кондратьев, А.Н. Печников, Е.В. Хекерт // Морские интеллектуальные технологии. – 2018. – №4-4(42). – С. 166-174.

REFERENCES

1. Gubinskiy A.I., Evgrafov V.G. Ergonomicheskoe proektirovanie sudovykh sistem upravleniya. L., «Sudostroenie», 1977. – 224 s.
2. Popov A.N. E-Navigation mixed reality interface / E.V. Khekert, A.I. Kondratiev, D.E. Studenikin // 20 th Annual General Assembly (AGA) of the International Association of Maritime Universities (IAMU), 1-2 November, Tokyo, Japan, 2019. – P. 40-41.
3. Ivashchenko A.V., Katirkin G.V., Sitnikov P.V., Surnin O.V. Aktsentnaya vizualizatsiya v interfeysakh dopolnennoy real'nosti. Programmye produkty i sistemy. T. 31. №4, 2018. – S. 740-744.
4. Popov A.N. Formirovanie informacionnogo standarta na primere dopolnennoy realnosti. Eksplyuatsiya morskogo transporta. RIO FGBOU VO “GMU im. adm. F.F. Ushakova”. №1(94), 2020 – S. 49-58.
5. Popov A.N. Creating a crewless ship in the framework of the technological paradigm of the Russian Federation / V.V. ZaslonoV, A.A. Golovina // ISCI 2019 Conference proceedings, Industry competitiveness digitalization, management and integration, Volume 1, 2020. – P. 468-474.
6. Yusupov L.N. Eksplyuatsionnye vozmozhnosti morskikh avtomatizirovannykh informacionno-identifikacionnykh sistem, vkluchayushih sputnikovye podsystemy vyisokotochnogo mestoopredeleniya (na primere Azovo-Chernomorskogo basseyna). Dissertatsiya na soiskanie uchenoyi stepeni kandidata tehnikeskikh nauk. Specialnoct 05.12.13. – Sistemy, seti i ustroystva telekommunikaciy.
7. Kondrat'ev S. I. Ergonomicheskij podhod k ocenivaniyu deyatel'nosti sudovykh specialistov: sut' problemy i podhod k ee resheniyu / S.I. Kondrat'ev, A.N. Pechnikov, E.V. Hekert // Morskie intellektual'nye tekhnologii. – 2018. – №4-4(42). – S. 166-174.

УДК 629.5.073.4

DOI: 10.34046/aumsuomt96/11

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЗИПОНОВ КАК ДВИЖИТЕЛЕЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ И МАНЕВРИРОВАНИЯ СОВРЕМЕННЫМИ АРКТИЧЕСКИМИ СПГ ГАЗОВОЗАМИ. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИТУАЦИИ АВАРИЙНОЙ ОСТАНОВКИ

В.В. Тульчинский, аспирант

В статье рассмотрен такой современный и перспективный тип судовых движителей как азипод. Определены особенности его использования для управления и маневрирования современными СПГ газовозами типа ARC7. Рассмотрены различные режимы плавания, конфигурации системы управления, способы управления азиподами в различных типовых ситуациях, а также при ледовом плавании. Приведены параметры судовой пропульсивной установки, а также особенности ее использования при ледовой навигации. В программной среде Matlab произведено упрощенное моделирование динамики движения судна с целью определения оптимальных способов аварийной остановки судна с использованием азиподов.

Ключевые слова: современные судовые движители, азипод, управление судном, арктическая навигация, СПГ газовоз, Arc7 газовоз.

The article considers modern and perspective type of ship's propulsion system - Azipods. The features of using Azipods for conning and maneuvering the modern ARC7 LNG gas carrier are determined. Various sailing modes, control system configurations, Azipod control methods in various typical situations, as well as during ice navigation, are considered. The parameters of the ship's propulsion system are presented, as well as the features of its use while ice navigation. In Matlab software environment, a simplified simulation of the ship's dynamics was performed in order to determine the optimal methods for LNG vessel emergency stopping with help of azipods.

Keywords: modern ship's propulsion, Azipod, ship's conning, arctic navigation, LNG carrier, Arc7 gas carrier.

Сегодня, в связи с разработкой и вводом в эксплуатацию новых месторождений углеводородов в Арктическом регионе, стремительно растет потребность в их эффективной и безопасной транспортировке к новым рынкам сбыта. Количество газовых и нефтяных танкеров в Арктике стремительно увеличивается. Этим обусловлен научный интерес к разработкам и исследованию ледового плавания, поиску новых возможностей его автоматизации и повышения безопасности. Одновременно с этим, конструктивные особенности и особенности эксплуатации новых проектов подобных судов мало изучены и описаны в научной литературе.

Говоря о новейших проектах судов в Арктике, трудно не упомянуть проект СПГ танкеро-

газовозов, сконструированных для месторождения на полуострове Ямал. Данные суда имеют ледовый класс Arc7 и оснащены множеством современных систем и приборов, позволяющих осуществлять круглогодичную автономную навигацию в районах Обской губы, Баренцева, Карского и других Арктических морей, Северного морского пути. Первое в мире судно данного класса - «Christophe de Margerie» (Рисунок 1). На его примере автор предлагает рассмотреть особенности управления, маневрирования и использования пропульсивного двигательного комплекса.

Рассмотрим основные параметры судна, представленные на Рисунке 2.



Рисунок 1 – Первый в своем классе Arc7 СПГ газовоз

Length Over All	: 299.000 m	- Gross tonnage (International)	: 128.806 tons
Length Between Perpendiculars	: 283.100 m	- Deadweight at Design Draft(Ext.)	: 80,181.7 tons
Breadth (Molded)	: 50.000 m	- Displacement at Design Draft(Ext.)	: 127,268.9 tons
Depth (Molded)	: 26.500 m		
Scantling Draft (Molded)	: 13.000 m		
Design Draft (Molded)	: 11.755 m		
Max. Design Draft for ice strengthening during arctic navigation (Moulded)	: 12.000 m		

Propulsion Unit

- Type and Number	: POD x 3 sets
- Propulsion power of Normal Propulsion Motor	Power : 39,600 kW
- Maker	: ABB

Рисунок 2 – Основные параметр судна

Пропульсивная установка судна состоит из трех азиподов фирмы АВВ, с максимально развиваемой мощностью 15 МВт каждый. Система управления пропульсивной установкой «Christophe de Margerie» имеет 3 основных режима работы: Maneuvering Mode, Sea Mode, Ice Mode. Одновременно с этим, существует еще 2

подрежима контрольной автоматики пропульсивной установки: Speed Mode (контроль оборотов) и Power Mode (контроль нагрузки). Основные особенности режимов приведены в Таблице 1. Изображение главной панели управления азиподами представлено на Рисунке 3.

Таблица 1 – Основные режимы работы пропульсивной установки Arc7 СПП

Maneuvering Mode (Маневренный режим)	Sea Mode (Морской режим)	Ice Mode (Ледовый режим)
<ul style="list-style-type: none"> - Нет ограничений в углах поворота азиподов; - Ограничены обороты и мощность; - Доступен только подрежим контрольной автоматики Speed Mode; 	<ul style="list-style-type: none"> - Поворот азиподов ограничен в пределах 30° от нулевого положения; - Ограничения по номинальным расчетным значениям крутящего момента, числа оборотов и достигаемой мощности; - Автоматический переход между подрежимами Speed Mode и Power Mode по заданной уставке; - Снижение нагрузки на центральном азиподе для уменьшения кавитации. 	<ul style="list-style-type: none"> - Нет ограничений в углах поворота азиподов; - Крутящий момент ограничен до 180% от номинальных значений; - Доступен только подрежим контрольной автоматики Power Mode; - Доступен режим быстрого набора номинальных значений (fast ramp); - Расширенные возможности системы стабилизации нагрузки (превышение крутящего момента, перераспределение нагрузки, аккумулятор лишней нагрузки).



Рисунок 3 – Панель управления

Название режима Ice Mode (Ледовый режим) не означает, что его необходимо использовать при любом характере ледовой нагрузки. Режим спроектирован для использования в местах с достаточным ледовым сопротивлением, рекомендовано не использовать режим при скорости хода более 12 узлов. Например, если судно следует в поле серого или серо-белого льда со скоростью выше указанной, не испытывая при этом предельных нагрузок, следует использовать режим Sea Mode.

Поскольку целевое назначение данного судна заключается в периодическом следовании в ледовых условиях, то, рассматривая особенности его управления и маневрирования, необходимо выделить несколько основных направлений. Это использование азиподов в обычных условиях, при

ледовом плавании, а также в аварийных ситуациях. Рассмотрим отдельно каждый.

Общие особенности управления

Как правило, рекомендуется работать азиподами как можно более плавно, поскольку с помощью их азимутального поворота возможно быстрое ускорение судна в любом направлении. А чтобы остановить движение необходимо использовать уровни высокой мощности. Также высокий уровень мощности на низких скоростях хода приведет к опасной повышенной вибрации, сокращающий срок службы механических компонентов системы и увеличивающий расхода топлива. Особенно большие углы поворота азиподов в сочетании с высокой скоростью движения корпуса относительно воды также создают сильные негативные вибрации.

Общие рекомендации к различным маневрам приведены на *Рисунке 4*.

При ежедневной эксплуатации судна необходимо учитывать ряд правил, направленных на самый безопасный и оптимальный способ его управления с помощью азиподного движителя. Правила выработаны на основе ежедневной эксплуатации, а также тестирования моделей и различных конфигураций систем.

- Рекомендовано использовать специальную программу увеличения / уменьшения мощности (это предварительно запрограммированная функция, которую можно активировать или деактивировать на мосту).
- В условиях открытого моря и полных ходов, углы поворота азиподов должны быть не более до $\pm 10^\circ$. Это следует учитывать при настройке авторулевого.
- Рекомендованный способ осуществить аварийное торможение - это поворот азиподов, а не реверс винтов (метод описан далее в статье).

- Поскольку вращение винта рассчитано на положительные обороты, он всегда будет более эффективным с положительными, чем с отрицательными оборотами. Однако в некоторых ситуациях (например, при маневрах в порту, швартовке выполнить реверс будет эффективнее поворотов азиподов).

- Азимутальный механизм вращения азипода выполняет поворот кратчайшим путем от своей текущей позиции. Поэтому при быстром повороте следует избегать применения больших углов ($\sim 180^\circ$). Это может привести к ситуации, когда азипод будет вращаться в противоположном направлении от задуманного.

- Необходимо избегать попадания азиподной струи на соседние азиподы. Поэтому при осуществлении маневра следует всегда иметь во внимании данный факт.



Speed values stated in following table are recommended vessel maximum speeds when starting the operation			
Vessel speed	Daily	Occasionally	Emergency
Both side Azipod's turning inwards 	10 knots	16 knots	Allowed at Any ship speed
Both side Azipod's turning outwards 	10 knots	16 knots	Allowed at Any ship speed
Ship slowing (start speed) by rotating both side Azipods 35 to 90 degrees outwards (3 windmilling propellers or with low power)	10 knots	16 knots	Allowed at Any ship speed
Maximum ship speed during the use of FAST Mode	< B knots	B - 20 knots	Allowed at Any ship speed
Maximum allowed ship speed During the ordinary use of NFU ² (Non Follow Up) steering tillers	NOT Recommended	NOT Recommended	Allowed at Any ship speed

Рисунок 4 – Основные указания при обычной эксплуатации

Обычная эксплуатация

Маневрирование на небольших скоростях хода и эффективная тяга при различных азимутальных углах поворота. Корпус судна оказывает существенное влияние на развиваемую эффективную тягу азиподов. Если струя воды от винта направлена на корпус, сила тяги винта значи-

тельно снижается. Это снижение может достигать 50%. Кроме того, если струя от одного азипода направлена против другой такой же струи, то тяга также может значительно упасть. Пример доступной тяги на судне с тремя азиподами, как на СПГ газовозе «Christophe de Margerie» представлен на *Рисунке 5*.

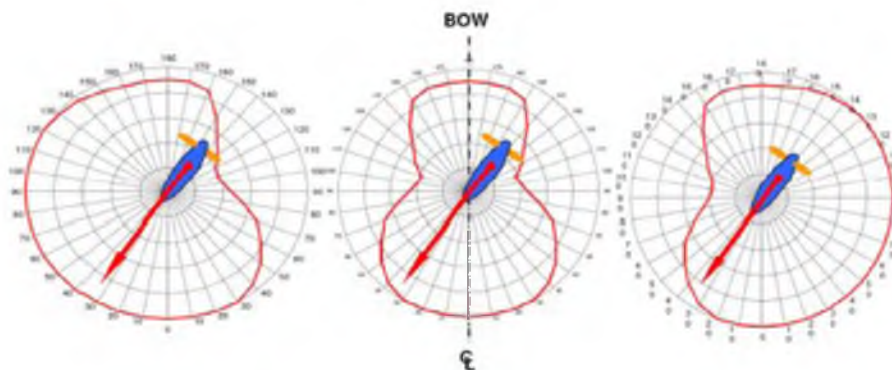


Рисунок 5 – Изменение силы тяги при различных положениях азипода, вызванное влиянием корпуса. Красным обозначена область тяги, а красной стрелкой - направление струи

Наибольшая боковая сила смещения кормы судна может быть получена, когда все обороты имеют положительное вращение. Диапазон углов поворота азиподов должен составлять от 75° до 105°. Положение азиподов представлено на Рисунке 6 ниже.

Как видно из рисунка, струи в данном случае никак не взаимодействуют с корпусом, так как

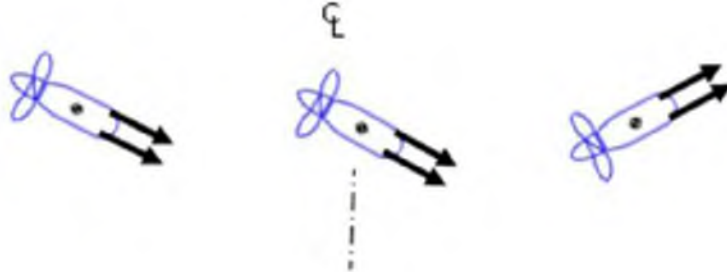


Рисунок 6 – Положение азиподов для получения наибольшей боковой силы смещения кормы влево

направленны в сторону «чистой воды», чем и достигается максимальная боковая тяга на невысоких скоростях.

Ниже на Рисунке 7 представлены дополнительные рекомендации при маневрировании на невысоких скоростях.

Azipod positions for slow forward- or backward motion.			
<p>Toe-Out Position</p>		<p>Toe-In Position</p>	
Azipod positioning for side thrust avoiding slip-stream thrust on the other unit.			
Maximum side thrust to PORT with three Azipods		Maximum side thrust to PORT with one Azipod	
<p>Should be avoided</p>	<p>Recommended</p>	<p>Should be avoided</p>	<p>Recommended</p>

Рисунок 7 – Работа тремя азиподами

При дрейфе, особенно в районах с переменными ледовыми условиями наилучшим способом будет направить винты боковых азиподов внутрь к осевой линии диаметральной плоскости. Для боковых азиподов такой угол поворота составляет от -10° до -150° для правого и от 10° до 150° для левого. Центральный азипод направлен

по ДП и используется для управления осевым движением судна (Рисунок 8).

Задний ход. Использование отрицательных оборотов. Рекомендации по использованию отрицательных оборотов при эксплуатации судна приведены на Рисунке 9.

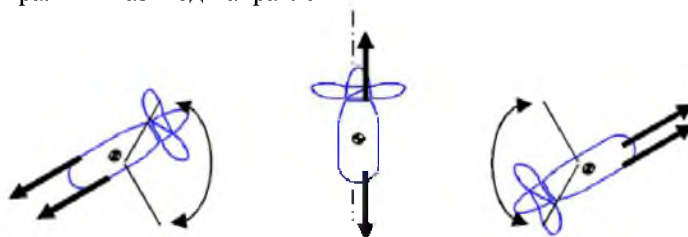


Рисунок 8 – Работа азиподов при дрейфе судна

Manoeuvring with low speed ~2-4 kts. (docking/undocking)	Position keeping (anchoring, DP)	Channel keeping or approach to pilot station	Normal service speed
Negative RPM's allowed	Negative RPM's allowed	Occasionally allowed	Negative RPM's NOT recommended

Рисунок 9 – Использование отрицательных оборотов

Движение назад с положительными оборотами

В этом режиме аzipоды сначала поворачиваются на 180° с помощью азимутального поворота так, что винты направлены в корму. Это можно делать только в режиме маневрирования. При этом мощность аzipода будет не ограничена. Поскольку в этом случае винты работают в «нормальных» условиях (положительные об/мин), способ разворота аzipодов для движения назад – самый эффективный и правильный.

Движение назад с отрицательными оборотами

В этом режиме аzipоды расположены как обычно (винты направлены в нос). Задание тяги осуществляется установкой отрицательных оборотов.

Однако, конструктивно винты рассчитаны на положительные обороты, поэтому аzipоды при отрицательных оборотах не будут работать так же эффективно, как при положительных. Кроме того, возникают повышенная шум и вибрация, вызванная кавитацией винтов.

Тем не менее, подобный маневр может быть выполнен как в режиме обычного хода, так и в режиме маневрирования. Крутящий момент электродвигателей на заднем ходу не ограничен.

Сброс скорости на переднем ходу.

Сами аzipоды имеют существенное статическое тормозное сопротивление. Поэтому наиболее эффективный способ снизить скорость судна (здесь не имеется в виду аварийную остановку) – это установить их в положении от 35° до 90° (винтами наружу) и в то же время позволить винтам свободно вращаться на нулевой мощности. Это можно сделать даже на большой скорости, не вызывая предельных нагрузок на механизмы, однако, чтобы свести к минимуму ненужные вибрации, не стоит забывать рекомендации из *Рисунка 4*.

Рекомендуемые углы поворота аzipода – примерно от 35° до 45° винтами наружу. Описанный маневр может быть выполнен только в режиме маневрирования. Поэтому, когда судно входит стесненные прибрежные районы с высокой скоростью, режим обычного хода надо перевести в режим маневрирования, прежде чем выполнить описанный выше маневр торможения. Тем не менее, перед переходом в режим маневрирования, желательно снизить скорость примерно до 12-14 узлов.

Следует также учесть, что центральный аzipод должен оставаться в ДП и свободно вращаться. А в ледовых условиях подобное снижение скорости хода желательно проводить иначе, только с изменением направления вращения винтов.

Управление в аварийной ситуации

В случае возникновения чрезвычайной ситуации на скорости в режиме обычного хода, возможна перекладка аzipодов до угла в 35° (что соответствует максимальному углу поворота рулевого колеса). Конструктивно как сами аzipоды, так и их винты рассчитаны для противостояния всем силам и моментам, возникающим в результате подобного маневра. Однако производить такие большие перекладки разрешено только в чрезвычайных ситуациях, таких как экстренное изменение курса для предупреждения столкновения. При этом стоит также учитывать, что при значительной перекладке руля крен судна может достигать высоких значений из-за достаточной эффективности трех аzipодов по созданию боковой силы смещения и, как следствие, небольшого радиуса циркуляции.

Аварийная остановка в стесненных условиях

При использовании традиционных движителей аварийная остановка выполняется путем реверса.

Так как движители в виде аzipодов имеют возможность азимутального вращения, то существует возможность выполнить маневр аварийной остановки посредством их поворота. Это и есть наиболее эффективный и рекомендованный способ осуществления маневра аварийной остановки на судах, оснащенных аzipодами. Он позволяет поворачивать аzipоды на 180°, не меняя направление вращения гребного винта и сохраняя силу тяги «положительной» все время. При этом центральный аzipод не поворачивается, а его мощность устанавливается в нулевое положение, винт вращается от встречного потока. Рекомендовано поворачивать боковые аzipоды наружу (*Рисунок 11*). Тем не менее, поворачивать их внутрь также не запрещено.

Описанный способ аварийной остановки с помощью поворота аzipодов является более «мягким» для силовой установки, снижая время и расстояние остановки по сравнению с классическим реверсом.



Рисунок 11 – Аварийная остановка

Процедура выполнения маневра аварийной остановки описана ниже, на *Рисунке 12*. Она выполняется путем одновременного поворота азиподов в противоположных направлениях на 180°

вокруг их оси поворота. Центральный азипод не разворачивается, и винт имеет свободное вращение.

On Bridge	Azipod Position
Cruise mode is changed to maneuvering mode.	
Power on the side Azipod units are reduced to 10MW. Centerline Azipod power is set to zero from azimuth lever. Propeller is windmilling.	
Side Azipod units are turned 35...45 degrees outwards. <ul style="list-style-type: none"> • PORT side pod to 35...45 STBD • STBD side pod to 35...45 PORT • Centerline Azipod unit is not turned Wait until ship speed is about 15 knots.	
Turn the azimuth levers of side Azipod units simultaneously around to 180 degrees. Centerline Azipod unit is NOT turned.	

Рисунок 12 – Порядок действий при аварийной остановке

Работа в ледовых условиях

В ледовых условиях эксплуатация и управление судном требует особой внимательности и осторожности. Определение опасных ледовых условий и возможных тяжелых ситуаций зависит, в основном, от опыта капитана, судоводителя экипажа. При движении во льду существуют два режима хода: классический носом вперед и специальный кормой вперед. В специальном режиме, см. *Рисунок 13*, следует избегать высоких скоростей хода. Азипод оснащен винтом «тянущего»

типа и при нормальной работе его поверхность должна быть направлена против встречного потока воды.

Особенность «двойного действия» позволяет судну сначала идти либо носом, либо кормой в зависимости от преобладающих ледовых условий. Максимальная производительность по разрушению льда в непрерывном режиме движения достигается при движении кормой вперед.

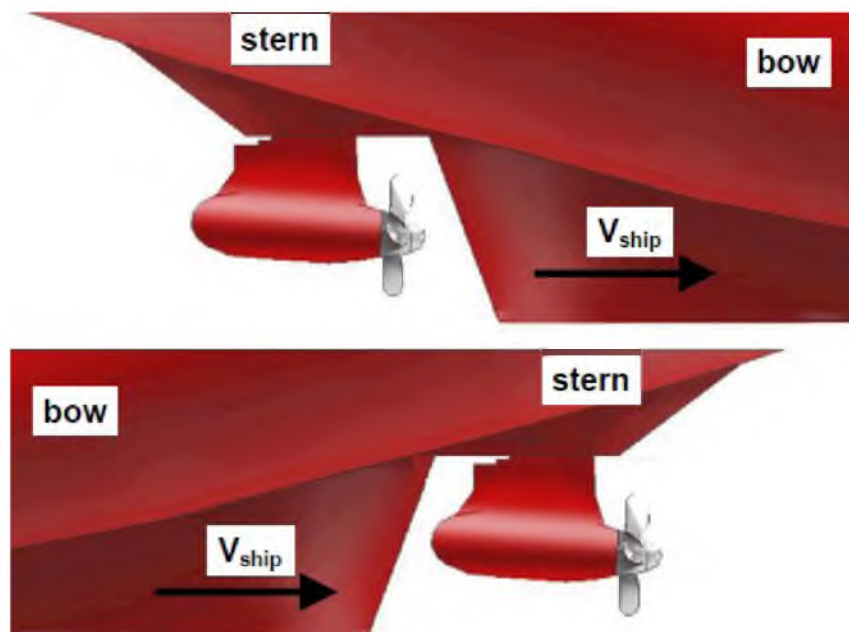


Рисунок 13 – Два типа хода судна

При следовании в ледовых полях умеренной толщины судно следует носом вперед. Когда ледовые условия значительно ухудшаются и скорость судна сильно падает необходимо развернуться и следовать кормой вперед. При следовании на низких скоростях нет ограничений в угле поворота азиподов и используется режим работы «Ice Mode» (Таблица 1). Но при достижении более высоких скоростей, вращение азиподов должно быть ограничено до $\pm 30^\circ$, а при невысокой ледовой нагрузке желательно сменить режим работы на «Sea Mode» (Таблица 1).

При следовании в ледовых каналах (или ледовых «треках») скорость судна, как правило, настолько высока, что эффективнее следовать в классическом режиме носом вперед. Это особенно актуально в свежих каналах. Ледовые условия при этом настолько легкие, что скорость может значительно подниматься, и в случае, если судно следует кормой, можно потерять управляемость, что повлечет произвольный выход судна из канала. Дело в том, что при движении кормой вперед центр вращения («pivot point») сильно смещен корму, обеспечивая неустойчивость судна, но курсе с ростом скорости. В старых и закрывшихся каналах сопротивление льда может быть настолько высоким, что эффективней сначала развернуться и продолжить движение кормой.

На участках с тяжёлыми ледяными полями или сильными торосами, правильной сразу начать движение кормой вперед. Однако, для преодоления торосов эффективным может быть также использование «тарана» (способ, при котором судно отходит назад и, разгоняясь, ударяет в лед, тем самым ослабляя ледовое сопротивление). Способ

«таран» эффективен при единично заторошенных участках. Если многократное пробитие ледяного сопротивления не приводит к появлению устойчивой скорости на определённом участке, и средняя скорость продвижения становится низкой, как правило, наиболее целесообразно развернуть судно и следовать кормой. Решение по выбору режима движения во льду (носом или кормой) зависит от ряда факторов, принимается на основе опыта экипажа, оценки навигационной ситуации, прогноза ледовой обстановки, требуемой скорости для выполнения рейсового задания.

При остановке судна в тяжелых ледяных полях из-за их сильного сжатия или толщины ледовых образований, эффективным будет «размыть лед» по бортам судна с помощью азиподов. Азипод под нагрузкой следует повернуть вперед-назад или даже на 360° градусов вокруг оси. Поток, создаваемый винтом, «сметет» куски льда вокруг кормы и задней части корпуса, тем самым ослабляя общее ледовое напряжение. При движении в тяжелом ледяном поле с низкой скоростью может быть полезным повернуть боковые азиподы на $5-15^\circ$ наружу. Это будет способствовать «размытию» ледовых образований в районе корпуса, снижая общее ледовое сопротивление движению судна.

При использовании традиционного режима хода носом вперед, не рекомендуется выполнять аварийную остановку с помощью поворота азиподов в ледовых условиях. Традиционная аварийная остановка путем изменения скорости вращения винтов (реверс) более приемлема. Однако, при движении кормой вперед применять реверс не рекомендовано. В поле толщиной до 1

метра, снижение скорости до 8 узлов, а при наличии торосов до 5 узлов, будет достаточным для

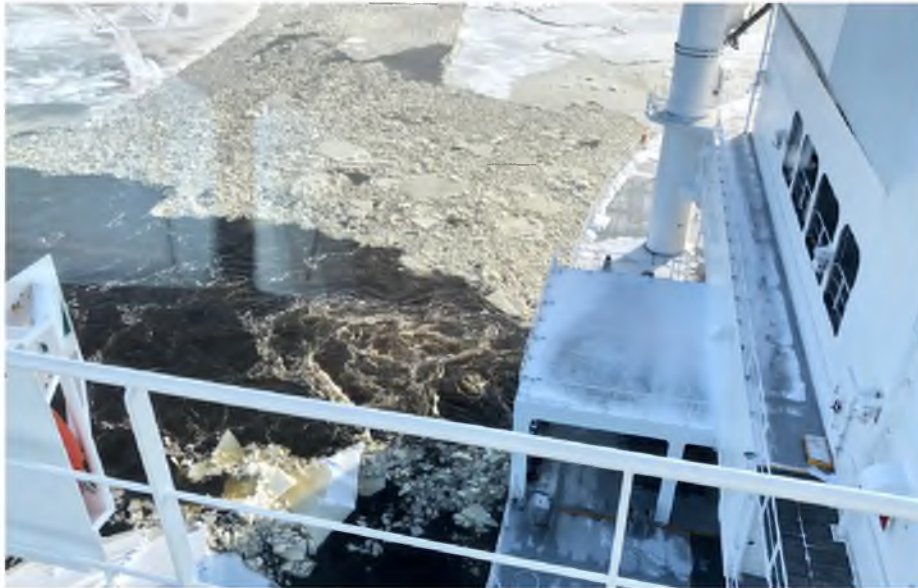


Рисунок 14 – «Размытие» льда вокруг корпуса

Моделирование аварийной остановки судна с целью поиска оптимального способа выполнения маневра

Лучшим способом определения реальных динамических параметров и выработки рекомендаций по управлению судном являются его ходовые испытания. Однако, к сожалению, при ходовых испытаниях невозможно провести все варианты и комбинации замеров и расчетов. К тому же, в процессе дальнейшей эксплуатации судна возможно появление свежих вопросов, связанных с нюансами управления. Поэтому полезным может быть создание упрощенных динамических моделей, на основе имеющихся данных с целью решения тех или иных задач, связанных с теоретическими возможностями судна. Автор предлагает пример решения поставленной задачи в виде создания упрощенной динамической модели Arc7 LNG в программной среде Matlab.

Для построения упрощенной модели, обратимся к элементарной динамике движения судна. Учитываем нахождение судна в чистой воде, без ледовых образований. Определим упрощенное уравнение динамики судна. Согласно 3 закону Ньютона:

$$\sum_{i=0}^n F_n = MA = M \frac{dv}{dt} \tag{1}$$

$$\sum_{i=0}^n F_n = F - \sum_{i=0}^n R_n \tag{2}$$

$$\sum_{i=0}^n R_n = R_{water} \tag{3}$$

$$M \frac{dv}{dt} = F - R_{water} \tag{4}$$

где M – массовое водоизмещение судна, F – суммарная тяга пропульсивной установки, R_{water} – сопротивление движению от среды (вода).

Сопротивление движению от среды, можно вычислить по упрощенной формуле [4]:

начала осуществления остановки с разворотом боковых азиподов.

$$R_{water} = 0.5\rho C_b \epsilon v^2 \tag{5}$$

где ρ – плотность воды, C_b – коэффициент полноты мидель-шпангоута, ϵ – коэффициент сопротивления среды, v – скорость хода.

Используя Таблицы 2 и 3 маневренных характеристик, экспериментально найдем коэффициент сопротивления ϵ .

Таблица 2 – Маневренные характеристики. Скорости и обороты

Engine Order	RPM	Speed (Knots)	
		Loaded	Ballast
Full Sea Ahead	135.0	20.0	21.4
Full Ahead	93.8	14.4	15.3
Half Ahead	75.0	11.6	12.0
Slow Ahead	56.3	8.5	9.4
Dead Slow Ahead	37.5	4.6	5.5

Таблица 3. Маневренные характеристики. Режим работы и время остановки

Changes in Telegraph Settings	Time (sec)
Full Astern from Full Sea Ahead	406
Full Astern from Full Ahead	364
Full Astern from Half Ahead	258
Full Astern from Slow Ahead	199
Engine Stop from Full Sea Ahead	1605
Engine Stop from Full Ahead	1437
Engine Stop from Half Ahead	239
Engine Stop from Slow Ahead	170

Если с определенного хода судна был остановлен движитель, а известна скорость указанного хода и время полной остановки, то на чистой воде имеем:

$$M \frac{dv}{dt} = -R_{water} = -0.5\rho C_b \epsilon v^2 \tag{6}$$

$$\epsilon = -2M \frac{dv}{dt} \frac{1}{\rho C_b v^2} \quad (7)$$

В Таблице 4 приведены данные с рассчитанными коэффициентами.

Таблица 4 – Рассчитанные коэффициенты

V, узлы	ε
8.5	176.068
11.6	91.768
14.4	12.295
20	7.926

Применив экспоненциальную аппроксимацию (Рисунок 15), опираясь на данные из маневренных характеристик судна, найдем примерный закон распределения значений ε в зависимости от скорости хода:

$$\epsilon = 1754.6e^{-0.286v} \quad (8)$$

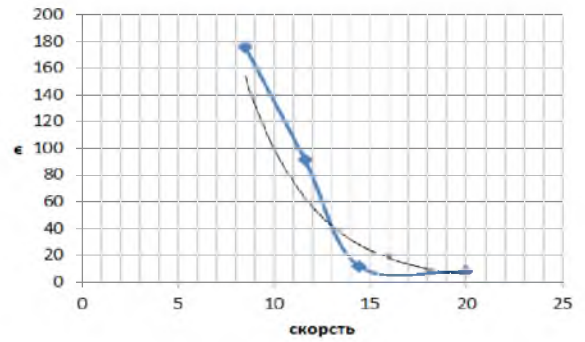


Рисунок 15 – Аппроксимация значения рассчитанного коэффициента

Для удобства построения модели, заменим:
 $a = 0.5\rho C_b \epsilon \Rightarrow R_{water} = av^2 \quad (9)$

Итак, в программной среде Matlab Simulink построим динамическую модель и проверим ее адекватность, используя данные из маневренного буклета судна. На Рисунке 16 представлена структура модели, а на Рисунке 17 представлена реализация блоков управления тягой азипода посредством переходной функции и динамикой посредством дискретно-временного интегратора.

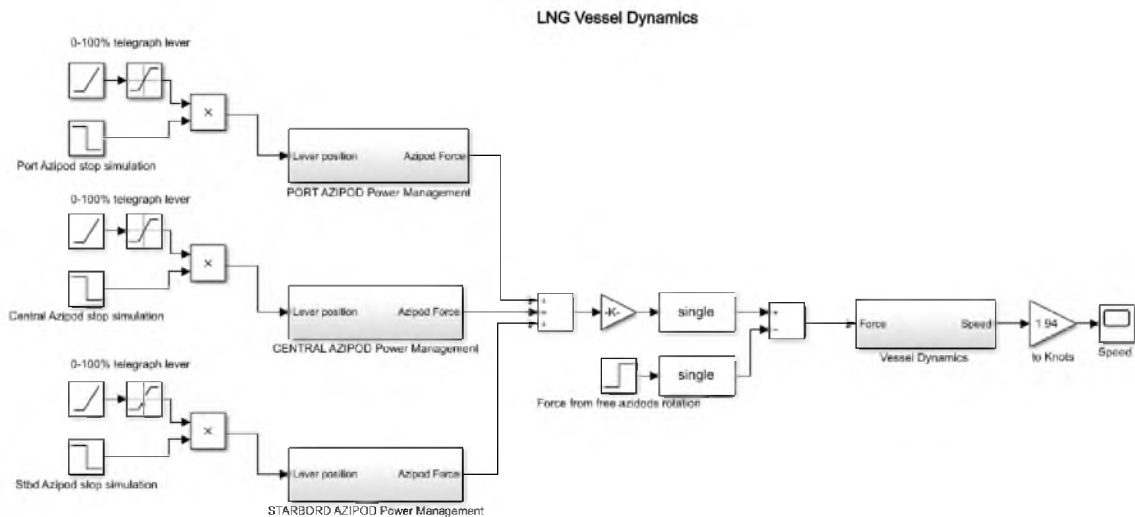


Рисунок 16 – Структура упрощенной динамической модели судна

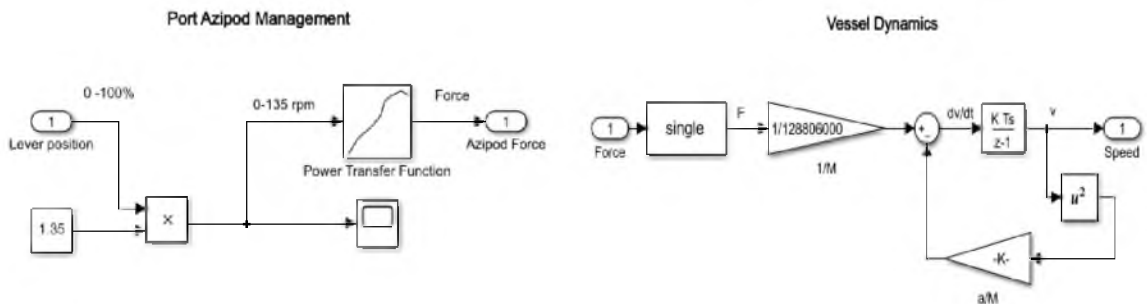


Рисунок 17 – Блоки управления тягой и динамикой

Из буклета маневренных характеристик судна известно, что торможение с полного при стопе азиподов занимает порядка 1605 секунд (Таблица 3). Проверим имеющуюся модель, при

этом начало остановки определим с 2000-ой секунды. Из полученного графика на Рисунке 18 видно, что время остановки модели при стопе составляет 1586,8 что вполне соответствует экспериментальным данным.

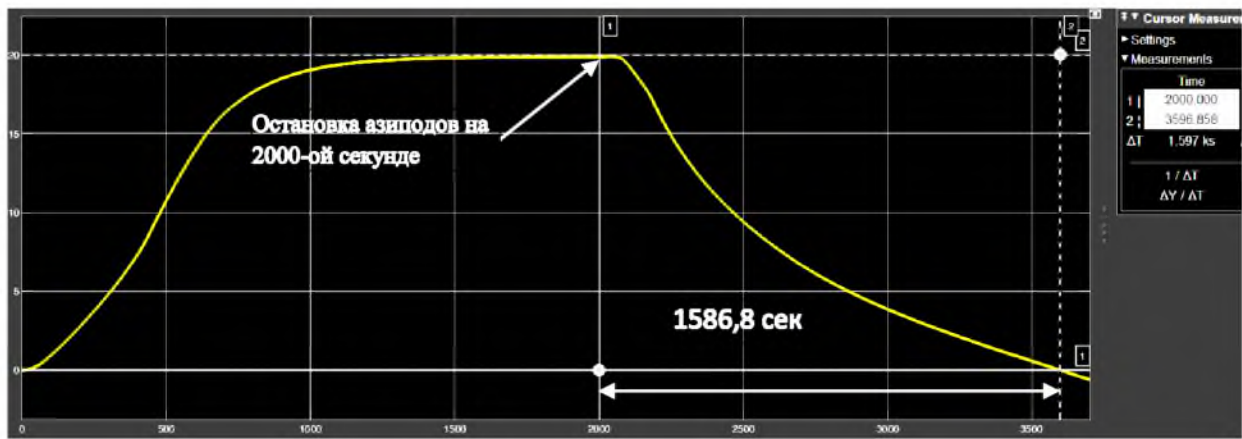


Рисунок 18 – График динамики судна (остановка на стоп)

Полученные данные говорят о том, что данная упрощенная динамическая модель оптимальна и ее параметры, и коэффициенты могут быть использованы для дальнейшей симуляции маневра аварийной остановки судна. Как было сказано выше, особенности Arc7 LNG таковы, что возможно выполнение маневра аварийной остановки 2-мя принципиально разными способами.

Это либо реверс всех трех азиподов одновременно по заданной программе, либо остановка центрального азипода с одновременным разворотом крайних на 180 градусов (схема представлена на *Рисунке 12*). Структурная модель для симуляции классического реверса представлена на *Рисунке 19*, а соответствующий график скорости на *Рисунке 20*.

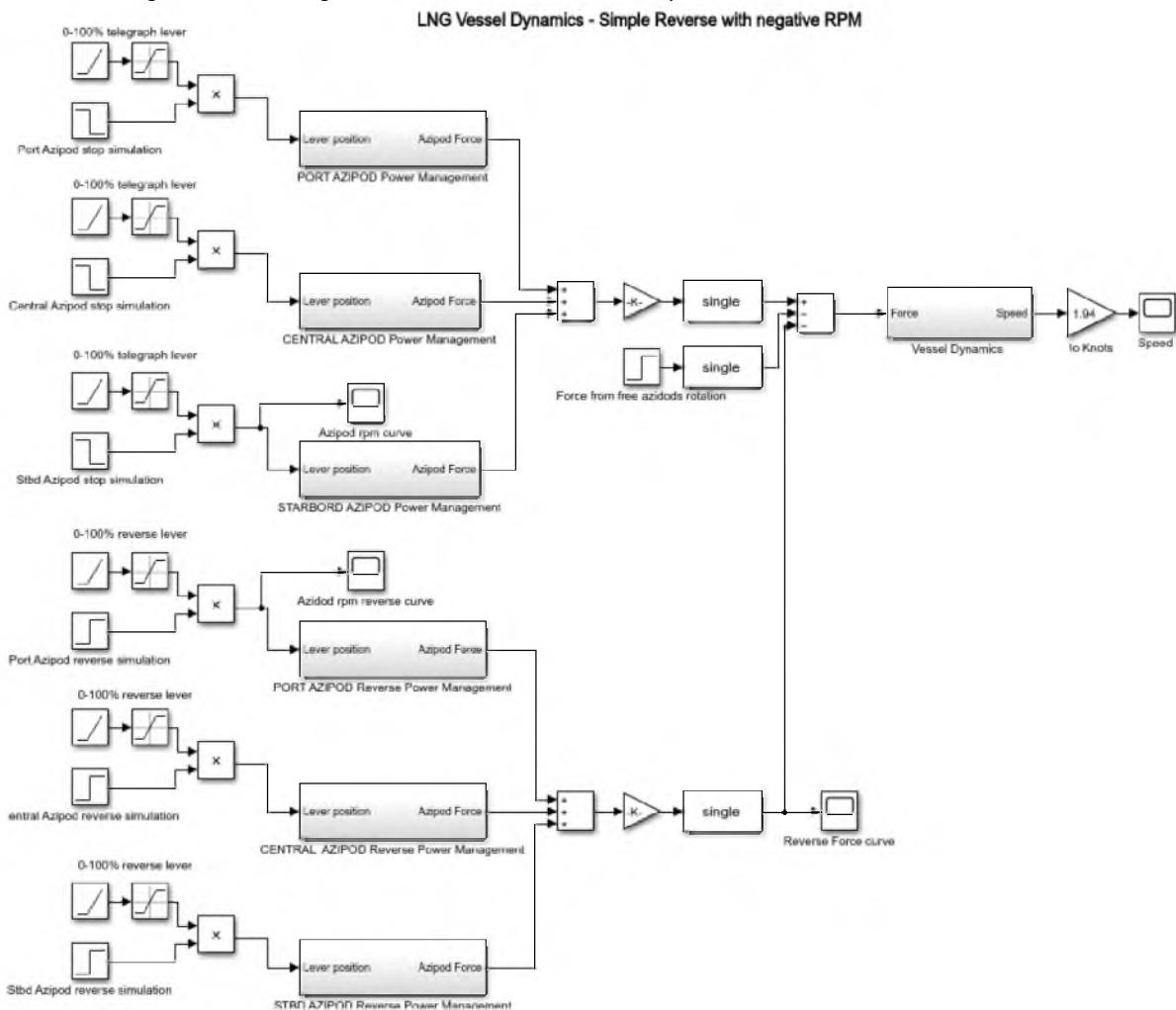


Рисунок 19 – Структура динамической модели судна при реверсе азиподов

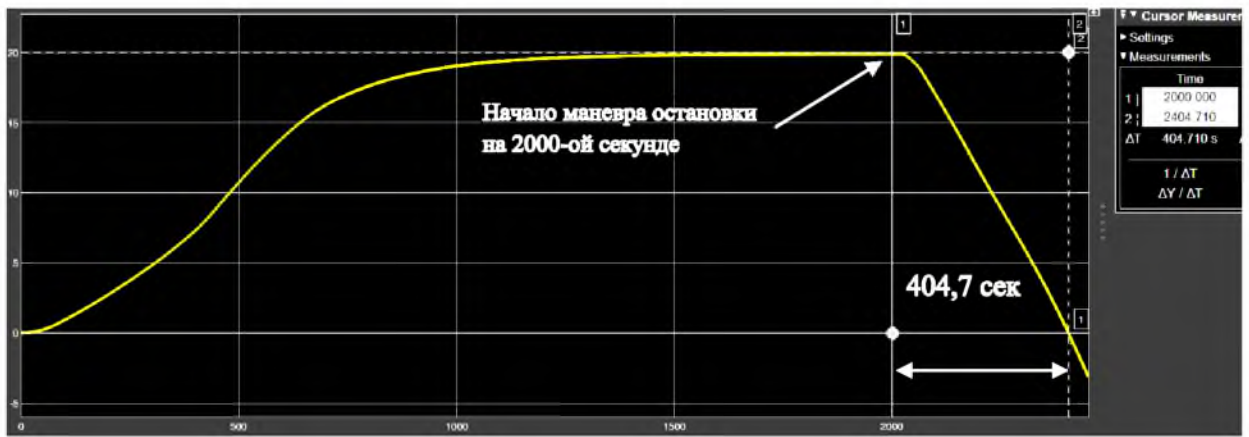


Рисунок 20 – График динамики судна (реверс)

При расчете использовалась переходная функция оборотов к силе тяге при реверсе с учетом работы на заднем ходу. Структурная схема представлена на *Рисунке 21*. В результате симуляции время до полной остановки оказалось равным

404,7 секунд, что также близко к теоретическим цифрам из таблицы маневренных характеристик (406 секунд).

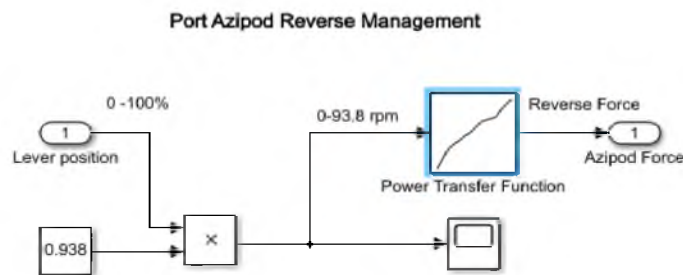


Рисунок 21 – Блок управления тягой при реверсе за заднем ходу

Далее рассмотрим более сложный способ остановки с применением разворота крайних азиподов. Очередность действий при таком маневре указана на *Рисунке 12*. Структурная схема модели данного маневра учитывает различные временные факторы, необходимые для выполнения алгоритма маневра. Структурная схема модели представлена на *Рисунке 22*.

Как видно из графиков скорости судна, представленных на *Рисунке 23*, маневр аварийной остановки судна с использованием альтернативной реверсу схемы (снижение мощности на центральном азипode до 0 МВт, а на бортовых азиподах до 10 МВт, затем разворот бортовых азиподов на 35-45 градусов от основной оси, затем полный разворот до 180 градусов от первоначального направления) показывает схожее время – 406 секунд. Тем самым, данный маневр существенно не проигрывает классическому реверсу (404,7 сек). Однако следует учесть, что маневр с разворотом крайних азиподов является более щадящим для всех механизмов винто-рулевого комплекса судна. Поэтому можно прийти к заключению о том, что при возникновении аварийной ситуации следует отдавать предпочтение именно данному виду маневра остановки.

При рассмотрении алгоритма аварийной остановки с использованием разворота крайних азиподов, важным вопросом является выбор направления вращения каждого из них. Можно производить маневр их разворота либо по часовой стрелке, либо против (оба во внешнюю сторону или оба внутрь). Следует учитывать, что не рекомендуется направлять «струи» потока азипода на другие азиподы, то есть рекомендуется производить развороты крайних азиподов предпочтительно «внутри» (левый азипод по часовой стрелке, а правый – против). Учитывая различный тяговый «упор» каждого из крайних азиподов при азимутальном вращении (исходя из *Рисунка 5*) была проведена симуляция маневра остановки как с внутренним (*Рисунок 23-а*), так и с внешним разворотом (*Рисунок 23-б*). Симуляция показала, что при внутреннем развороте, засечёт большего тягового «упора» азипода, время полной остановки сокращается на 2,3 секунды. Данное время не является значительным, однако следует учитывать возможное негативное влияние потока струй азиподов при внешнем развороте. Таким образом, можно сделать вывод о предпочтительности алгоритма аварийной остановки с внутренним разворотом крайних азиподов.

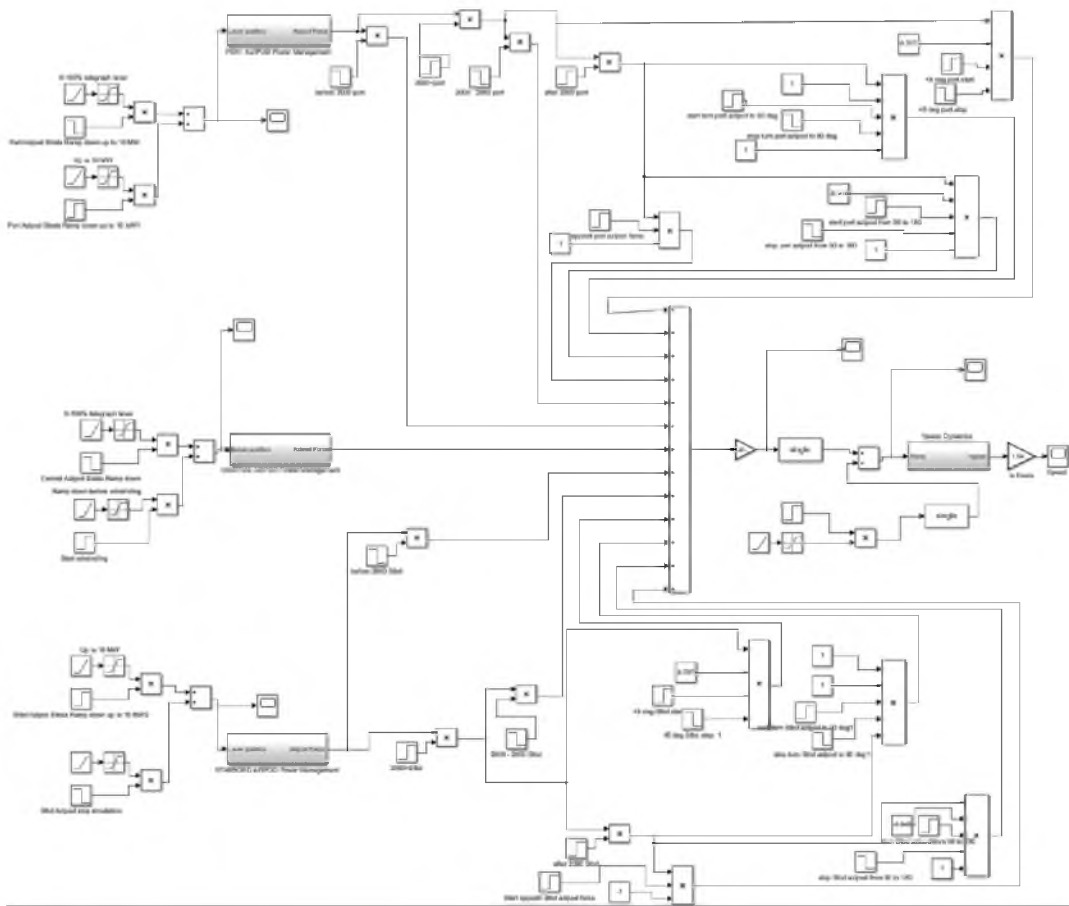


Рисунок 22 – Структура динамической модели судна при остановке с разворотах внешних азиподов и остановкой центрального

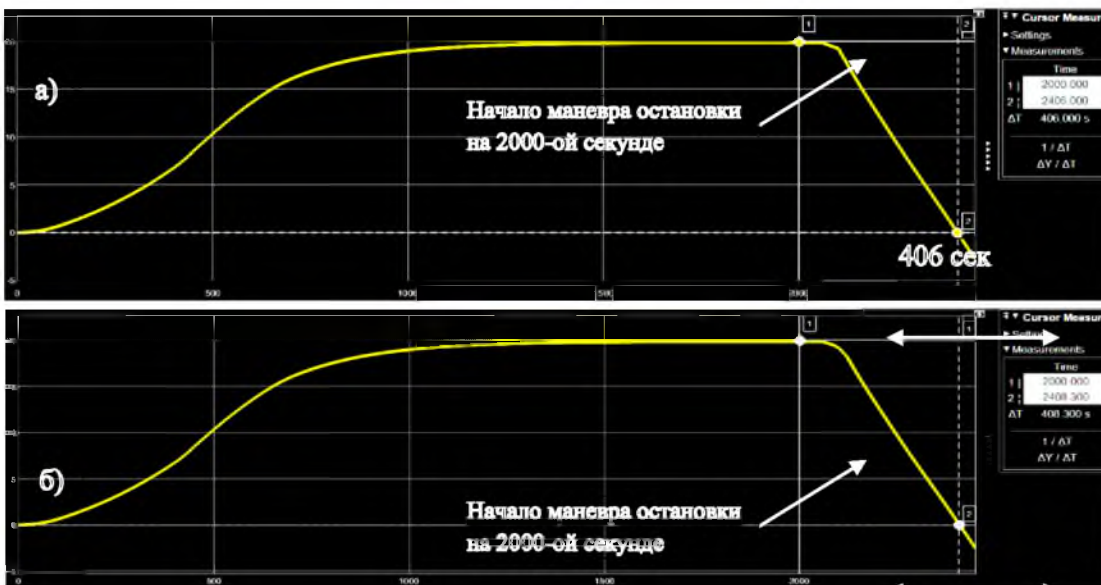


Рисунок 23 – Графики динамики судна (при развороте крайних азиподов); а) – график при внутреннем развороте, б) – график при внешнем развороте

Литература

- 1) Yamal, H2418 Manual. AZIPOD General Information. ABB Oy, Marine and Ports, 2016 - 418 p.
- 2) Yamal, H2418 Manual. AZIPOD Mechanical Part. ABB Oy, Marine and Ports, 2016 - 61 p.
- 3) Michal Robenek, Project Lead Engineer, BU Marine & Ports, Norway. Presentation of Yamal Propulsion Operation Modes. 2017- 7 p.
- 4) Knud B., Matthias K. Explaining Ships Dynamic and Handling Using MATLAB & SIMULINK as Simulation Tool in Teaching Maritime Students. [Электронный ресурс] // Wismar University; 2006 – 19 p. URL: <https://csum-dspace.calstate.edu/bitstream/handle/10211.3/73264/Benedict%20-%20Explaining%20Ships%20Dynamic%20and%20Handling.pdf?sequence=1>