

УДК: 629.5.061
EDN NJLRNE

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ СУДОВЫМ КРЫЛЬЧАТЫМ ДВИЖИТЕЛЕМ

А.А. Равин, д-р техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190008 Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., 3, e-mail: ravinkl@mail.ru
Данг Тхань Дат, магистрант, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190008 Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., 3, e-mail: dangthanhdatt300@gmail.com

Для таких судов, как паромы, буксиры, тралы, специальные суда, предназначенные для выполнения работ на морском шельфе, важным показателем является высокая маневренность. Уникальную возможность достижения высокой маневренности судна предоставляет применение крыльчатого движителя. По существу, он выполняет функции винторулевого комплекса, поскольку сочетает в себе преимущества винта регулируемого шага и активного руля. Судно, оборудованное крыльчатыми движителями, может плавно изменять скорость и направление движения, разворачиваться на месте, двигаться лагом (т.е. бортом вперед). Однако широкое применение этого типа движителя сдерживается сложностью и высокой стоимостью как самого движителя, так и гидравлической системы, применяемой для дистанционного управления. В статье рассматривается способ упрощения проектирования и изготовления системы управления крыльчатым движителем за счет применения и адаптации конструктивных модулей, входящих в состав системы дистанционного управления главным судовым дизелем.

Ключевые слова: крыльчатый движитель, система дистанционного управления.

Для цитирования: Равин А.А. Опыт разработки системы дистанционного управления судовым крыльчатым движителем / А.А. Равин, Данг Тхань Дат // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 78. — С. 143 — 154. — EDN NJLRNE.

EXPERIENCE IN DEVELOPING A REMOTE-CONTROL SYSTEM OF VOITH-SCHNEIDER PROPELLER

A.A. Ravin, DSc, Associate Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, 190008 Russia, St. Petersburg, Lotsmanskaya ul., 3, e-mail: ravinkl@mail.ru
Dang Thanh Dat, MSc student, St. Petersburg State Marine Technical University, 190008 Russia, St. Petersburg, Lotsmanskaya ul., 3, e-mail: dangthanhdatt300@gmail.com

For such vessels as ferries, tugs, minesweepers, special vessels designed to perform work on the sea shelf, high maneuverability is an important indicator. A unique opportunity to achieve high maneuverability of the vessel is provided by the use of a winged propeller. It essentially performs the functions of a rudder propeller complex, since it combines the advantages of a variable pitch propeller and an active rudder. A vessel equipped with winged propellers can smoothly change speed and direction of movement, turn on the spot, move sideways (i.e. with its side ahead). However, the widespread use of this type of propeller is constrained by the complexity and high cost of both the propeller itself and the hydraulic system used for remote control. The article discusses a method for simplifying the design and manufacture of a winged propeller control system through the use and adaptation of design modules included in the remote control system of the main marine diesel engine.

Keywords: vane propeller, remote control system.

For citation: Ravin A.A., Dang Thanh Dat. Experience in developing a remote-control system of ship vendor propulsor. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 78. P. 143 — 154. EDN NJLRNE. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

В современном судостроении для создания упора, обеспечивающего движение судна, применяется широкая номенклатура движителей: гребные винты фиксированного шага (ВФШ), гребные винты регулируемого шага (ВРШ), воздушные винты, водометные движители, винторулевые колонки, крыльчатые движители (рис. 1).

Последние являются наиболее специфическим типом движителей, как в связи с особенностями конструкции и принципа действия, так и благодаря уникальным возможностям управления скоростью и направлением движения судна. Несомненным преимуществом крыльчатого движителя (КД) перед любым другим типом движителя является возможность обеспечить высокую маневренность судна благодаря изменению направления упора (от 0 до 360°) и его величины (от максимального до нулевого) без изменения режима работы главного двигателя. Весьма значимое качество — возможность регулирования относительной поступи во время работы движителя. Это достигается плавным изменением угла атаки рабочих органов КД — крыловых лопастей. Следовательно, КД может рассматриваться в качестве винторулевого комплекса, сочетающего в себе возможности ВРШ и активного руля [1 — 7].



Рис. 1. Крыльчатый движитель

Тем не менее широкое применение КД сдерживается рядом причин. К ним следует отнести, прежде всего, сложность и высокую стоимость конструкции КД. В значительной степени общая сложность его устройства обусловлена необходимостью применения гидравлической системы управления [8]. В данной статье рассматривается упрощенный способ проектирования и изготовления такой системы путем адаптации применительно к характеристикам КД конструктивных блоков электрогидравлической системы дистанционного автоматизированного управления (ДАУ) главным судовым дизелем.

1. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ КРЫЛЬЧАТОГО ДВИЖИТЕЛЯ

Рабочими органами КД, взаимодействующими с водой, являются вертикально расположенные крылья, оси которых закреплены на диске, расположенном под днищем судна (рис. 2).

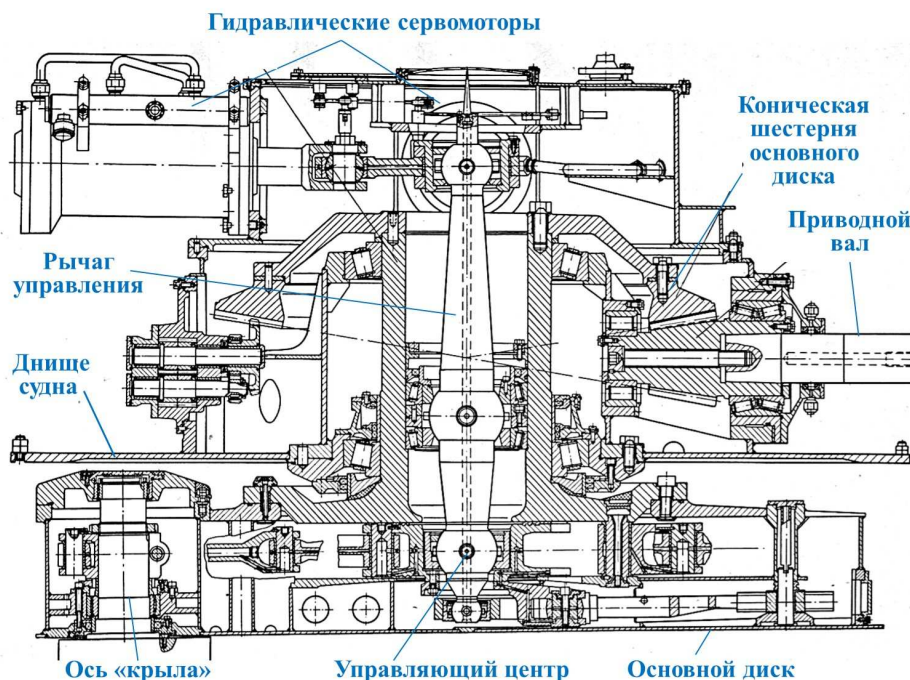


Рис. 2. Продольный разрез крыльчатого движителя ДКК 2000

Диск приводится во вращение с помощью конической передачи, соединенной с двигателем (дизелем или электромотором). Крылья при вращении основного диска разворачиваются вокруг своих осей с помощью системы рычагов, соединенных с управляющим центром. Углы их разворота определяются положением управляющего центра. Если он совпадает с центром основного диска, все крылья находятся в нейтральном положении. При этом на них не возникают полезные гидродинамические силы и отсутствует упор (рис. 3).

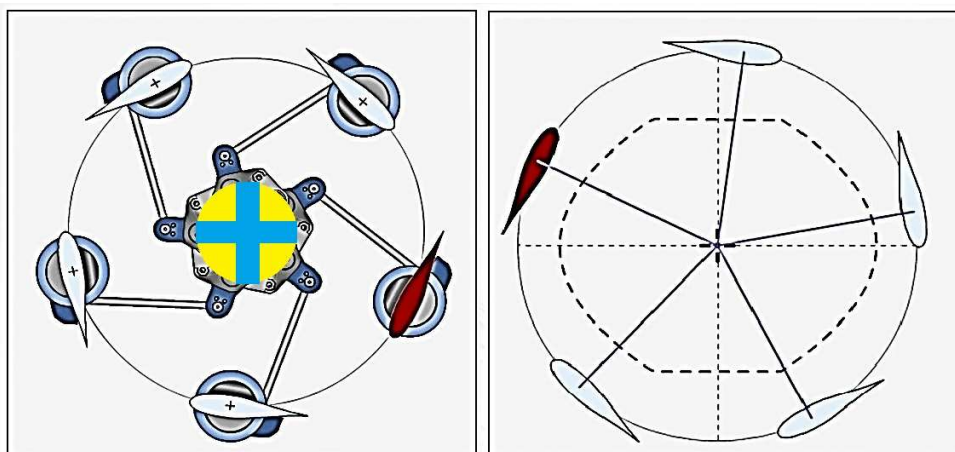


Рис. 3. Режим холостого хода

Для вывода КД из холостого режима требуется сместить управляющий центр в продольном или поперечном направлении, например вправо (рис. 4).

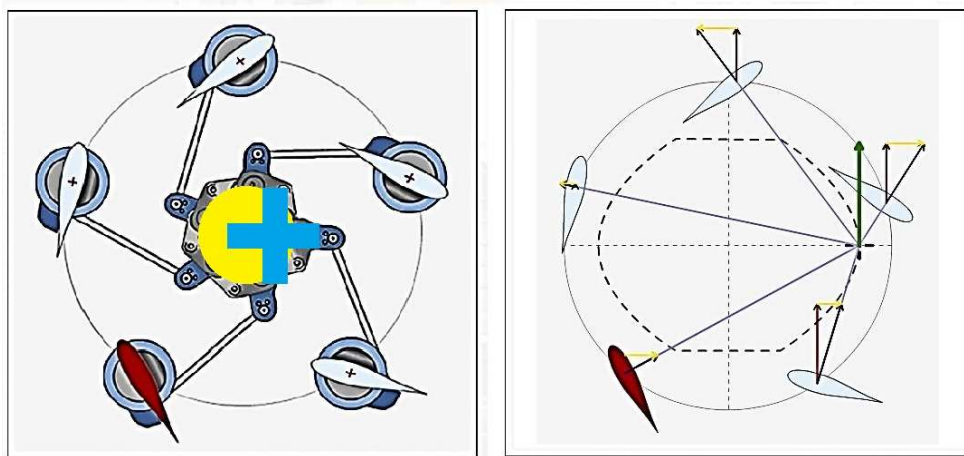


Рис. 4. Режим переднего хода

Смещения управляющего центра выполняются с помощью двух гидравлических сервомоторов, получающих команды от системы дистанционного управления (рис. 5).

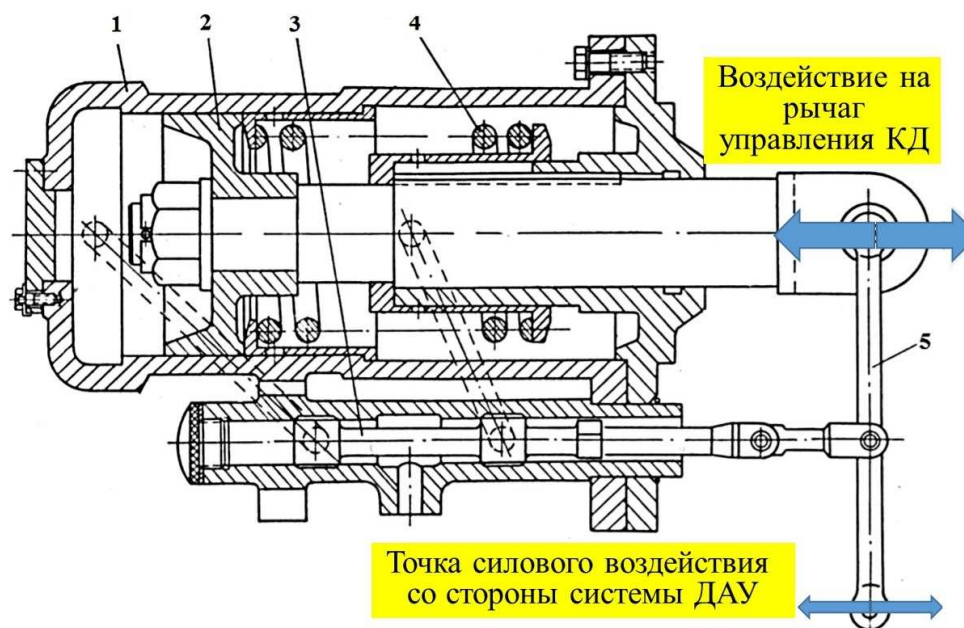


Рис. 5. Конструкция гидравлического сервомотора:

1 — корпус, 2 — поршень, 3 — золотник, 4 — возвратная пружина, 5 — рычаг обратной связи

2. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОПУЛЬСИВНОГО КОМПЛЕКСА С КРЫЛЬЧАТЫМ ДВИЖИТЕЛЕМ

2.1. Исходные предпосылки.

Расчеты крыльчатых движителей производят обычно на основании данных модельных испытаний в кавитационных трубах или опытовых бассейнах. Результаты испытаний представляют в виде следующих безразмерных характеристик:

— относительная поступь

$$l_P = V_P / U = \frac{V_P}{\pi n D}, \quad (1)$$

— коэффициент упора

$$K_P = \frac{2P}{\rho U^2 F_P}, \quad (2)$$

— коэффициент момента

$$K_M = \frac{2M}{\rho U^2 F_P R}, \quad (3)$$

— коэффициент полезного действия

$$\eta_P = \frac{P V_P}{M \omega} = \frac{K_P}{K_M} \lambda_P. \quad (4)$$

Обозначения в формулах 2.1 — 2.4:

V_P — скорость набегающего потока воды, м/с;

U — окружная скорость КД (по осям вращения лопастей), м/с;

n — частота вращения КД, об/мин;

D — диаметр КД (по осям вращения лопастей), м;

l — длина лопастей, м;

$F_P = l \cdot D$ — гидравлическое сечение движителя, м²;

M — момент, который необходимо создавать для вращения КД, Н·м;

$\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ — плотность пресной воды;

Зависимости величин K_P , K_M и η_P от относительной поступи λ_P называются кривыми действия крыльчатого движителя. Для движителя типа M кривые действия показаны на рис. 6.

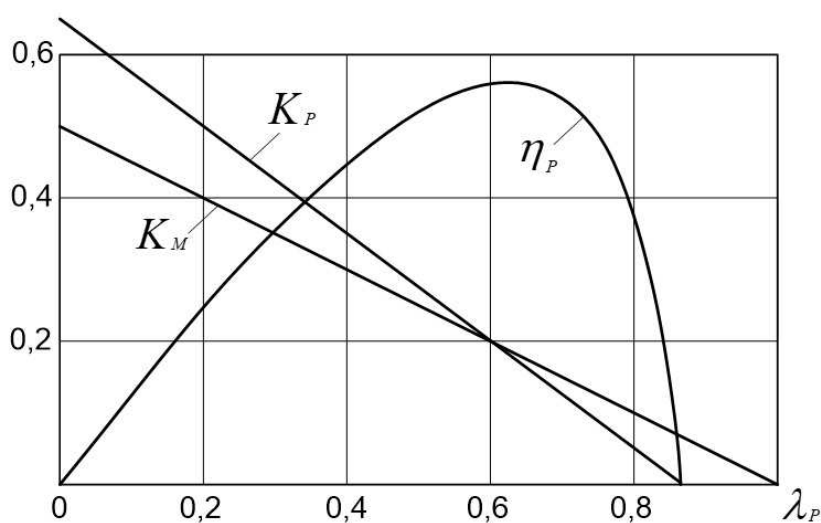


Рис. 6. Кривые действия крыльчатого движителя

2.2. Расчет показателей КД при свободном ходе судна.

Конструктивные параметры КД:

$n = 20 \text{ — } 100$ об/мин. $D = 2,6$ м. Количество лопастей $Z = 5$. $l = 1,3$ м. $F_p = 2,6 \cdot 1,3 = 3,4 \text{ м}^2$.

Эксцентриситет КД: $\varepsilon = \varepsilon_{\max} = 0,75$.

Из условия максимального КПД движителя (см. рис. 6) выбираем для номинального движения судна на свободной волне расчетное значение относительной поступи $\lambda_p = 0,6$.

Таблица 1

Расчеты для номинального режима движения судна

№	Величина	Размерность	Формула	Значения				
1	Поступь λ_p	—	Задано	0,6				
2	k_p	—	Из рис. 6	0,2				
3	K_m	—	Из рис. 6	0,2				
4	КПД η_p	—	Из рис. 6	0,56				
5	Обороты n	об/мин	Задано	20	40	60	80	100
6	Окружная скорость U	м/с	$U = \pi D n / 60$	2,7	5,4	8,2	10,9	13,6
7	Скорость потока V_p	м/с	$V_p = \lambda_p \cdot U$	1,6	3,3	4,9	6,5	8,2
8	Скорость судна V_C	узл.	$V_C = 2,05 \cdot V_p$	3,3	6,7	10,0	13,4	16,7
9	Упор P	Н	$P = K_{p\rho} U^2 F_p / 2$	2503	10012	22528	40049	62577
10	Момент M	Н·м	$M = K_{m\rho} U^2 F_p D / 4$	3254	13016	29289	52064	81351
11	Мощность N	кВт	$N = \frac{M \pi n}{30} \cdot 10^{-3}$	6,8	5,5	184	436	852

Таблица 2

Расчеты для буксировочного режима движения судна

№	Величина	Размерность	Формула	Значения				
1	Поступь λ_p	—	Задано	0,4				
2	k_p	—	Из рис.2.1	0,35				
3	K_m	—	Из рис.2.1	0,3				
4	КПД η_p	—	Из рис.2.1	0,45				
5	Обороты n	об/мин	Задано	20	40	60	80	100
6	Окружная скорость U	м/с	$U = \pi D n / 60$	2,7	5,4	8,2	10,9	13,6
7	Скорость потока V_p	м/с	$V_p = \lambda_p \cdot U$	1,1	2,2	3,3	4,4	5,4
8	Скорость судна V_C	узл.	$V_C = 2,05 \cdot V_p$	2,2	4,5	6,7	8,9	11,2
9	Упор P	Н	$P = K_{p\rho} U^2 F_p / 2$	4380	17528	39424	70087	109511
10	Момент M	Н·м	$M = K_{m\rho} U^2 F_p D / 4$	4881	19524	43930	78097	122027
11	Мощность N	кВт	$N = \frac{M \pi n}{30} \cdot 10^{-3}$	10,2	81,7	275,9	653,9	1278

Полученные в результате расчетов характеристики (рис. 7 — 10) могут быть использованы для оценки ходовых качеств судна и выбора параметров главного двигателя.

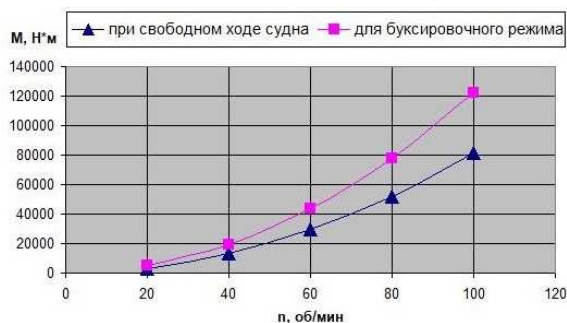


Рис. 7. Зависимость момента от частоты вращения КД

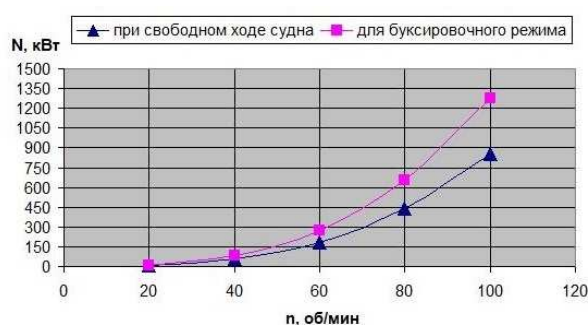


Рис. 8. Зависимость мощности от частоты вращения КД

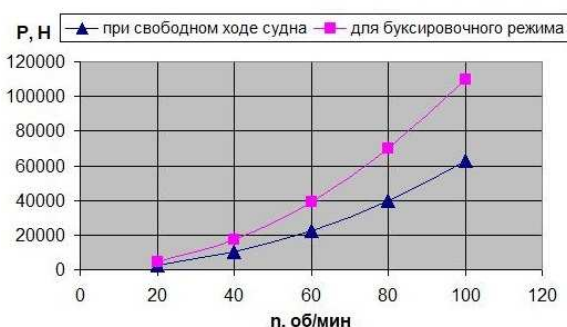


Рис. 9. Зависимость упора от частоты вращения КД

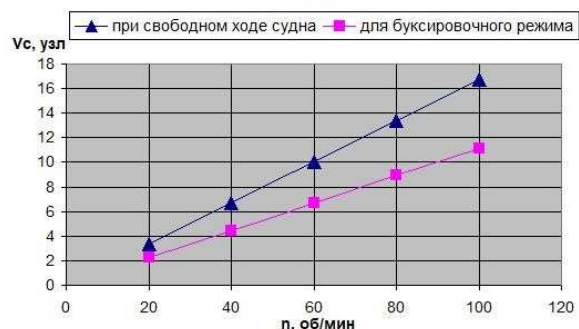


Рис. 10. Зависимость скорости судна от частоты вращения КД

3. ВЫБОР СТРУКТУРЫ И КОНСТРУКТИВНЫХ МОДУЛЕЙ СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ КРЫЛЬЧАТЫМ ДВИЖИТЕЛЕМ

Типовая структура систем, предназначенных для дистанционного автоматизированного управления судовыми машинами и механизмами, включает два основных компонента: командную систему и исполнительные (силовые) устройства. Входная (командная) часть у большинства современных систем ДАУ представляет собой электрическую следящую систему. Применение электронных блоков для формирования управляющих сигналов и обработки информации и передача сигналов по электрическому кабелю обеспечивают надежность, многофункциональность, низкую энергоемкость, малые веса и габариты системных блоков. Выходная (силовая) часть системы ДАУ у всех известных в настоящее время типов КД выполняется в виде гидравлических поршневых исполнительных механизмов (сервомоторов). Это объясняется целым рядом их достоинств:

- возможность развития больших усилий;
- плавность хода штока гидравлического сервомотора;
- рабочее вещество — минеральное масло, применяемое в судовых системах гидравлики и гидроавтоматики, — обеспечивает естественную смазку трущихся деталей и защиту их от коррозии;
- масло, как и всякая жидкость, практически несжимаемо, что позволяет обеспечить независимость характеристики сервомотора от усилий на его штоке.

Особенностью КД является необходимость дистанционного управления двумя сервомоторами — ходовым и рулевым, в связи с чем система ДАУ должна иметь два канала управления для каждого движителя.

Структура одного из каналов электрогидравлической системы для дистанционного управления КД из рулевой рубки представлена на рис. 11.

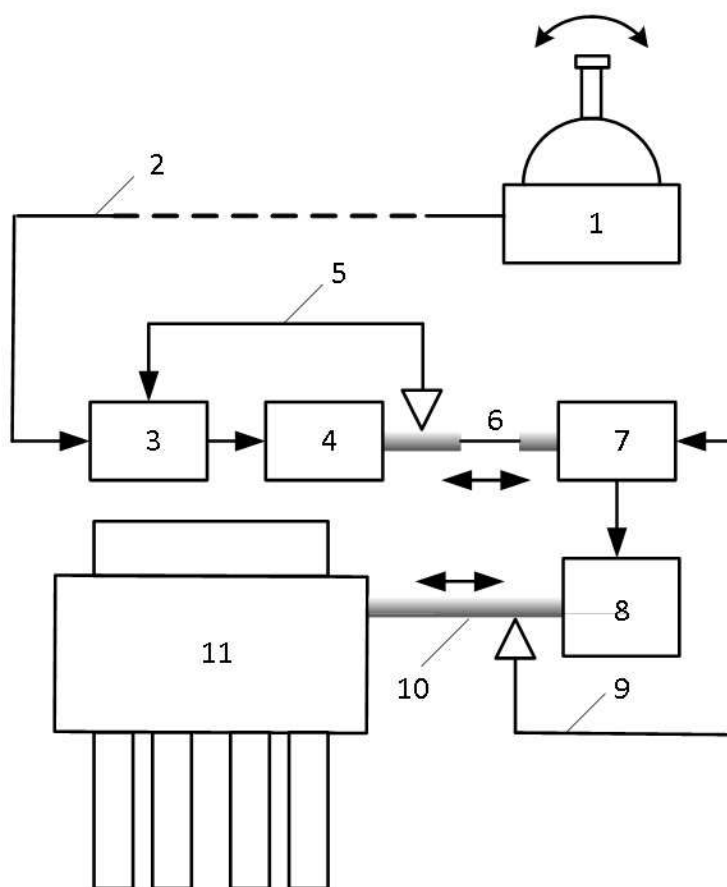


Рис. 11. Блок-схема электрогидравлической системы дистанционного управления КД (один канал):
 1 — рукоятка управления в рулевой рубке; 2 — кабель передачи управляющего электрического сигнала;
 3 — электронный блок управления; 4 — электрический исполнительный механизм; 5 — электрическая обратная связь;
 6 — соединение штока электрического исполнительного механизма и штока золотника; 7 — золотник;
 8 — гидравлический исполнительный механизм (сервомотор); 9 — рычаг обратной связи; 10 — шток сервомотора;
 11 — крыльчатый движитель

В качестве командной части системы управления КД в данной статье рассматривается возможность использования готовых модулей электрической системы ДАУ «Mini-Marex» производства немецкой фирмы Bosch-Rexroth [9] (рис. 12).

Система предназначена для дистанционного управления двухвальными судовыми пропульсивными установками с реверс-редукторными передачами, однако благодаря наличию в ней следящих систем с механическим выходом исполнительных механизмов и возможности гибкой настройки характеристик может быть приспособлена и для управления судовым крыльчатым движителем. Такое техническое решение обеспечит сокращение сроков и стоимости разработки и изготовления системы управления и позволит применить серийно выпускаемые компоненты, изготовленные с немецкой точностью и качеством.

Исходная команда задается механической установкой рукоятки командного органа. Угловое положение рукоятки преобразуется в электрический сигнал прецизионным потенциометром, установленным в корпусе командного органа (см. рис. 12). Конечным результатом функционирования командной части системы является механическое воздействие на шток золотника гидравлического сервомотора КД. Поэтому командная часть системы ДАУ является, по существу, электромеханической следящей линией (рис. 13).

Электрические управляющие сигналы от двух органов управления, расположенных на пульте судоводителя в рулевой рубке, с помощью электрических кабелей передаются в электронный блок управления сдвоенного электромеханического сервопривода, установленного вблизи управляемого объекта (в нашем случае вблизи крыльчатого движителя). Электронный блок формирует напряжения тока, подаваемые на исполнительные механизмы, находящиеся внутри сервопривода. Они представляют собой электродвигатели, вращение которых с помощью кинематических пар «винт — гайка» преобразуется в линейные перемещения штоков. Перемещения штоков датчиками обратной связи преобразуются в



Рис. 12. Пульт судоводителя и командный орган системы ДАУ «Mini-Marex»

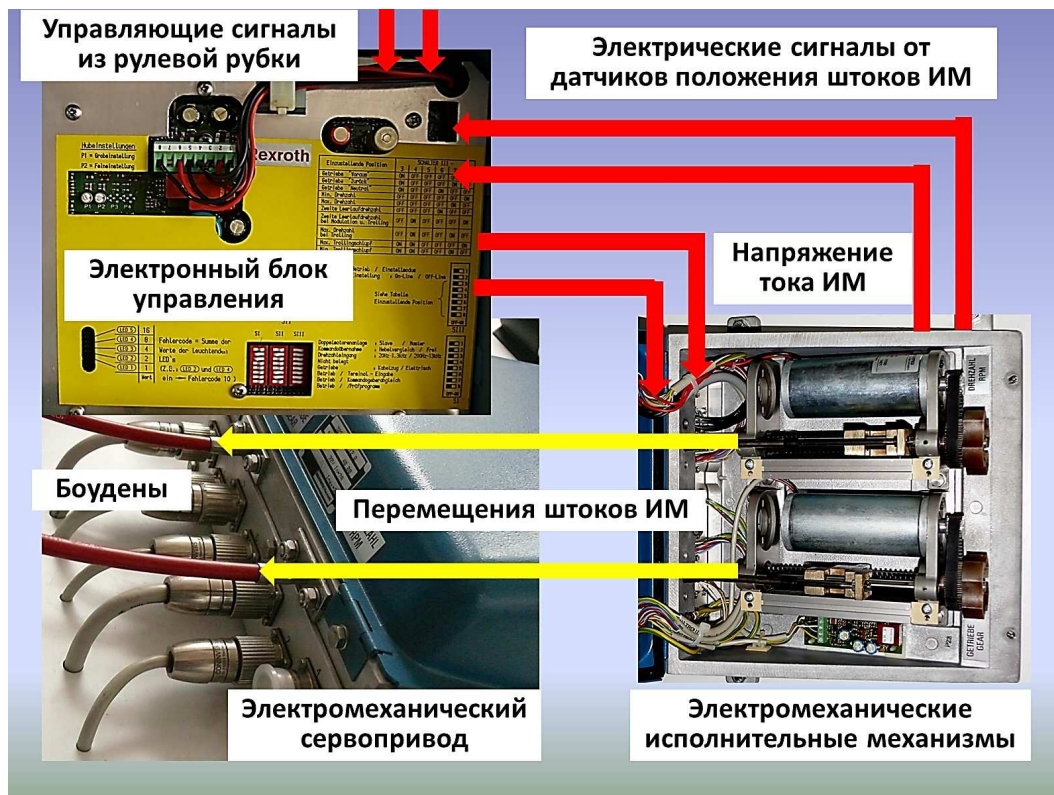


Рис. 13. Функциональная схема электромеханиской следящей системы

электрические сигналы, поступающие в электронный блок управления. Там они сравниваются с управляющими сигналами, пришедшими из рулевой рубки, и в соответствии с величиной разности определяются напряжения, поступающие на электродвигатели исполнительных механизмов. Такая схема обеспечивает точное соответствие линейных перемещений штоков угловым положениям рукояток командных органов.

Следует иметь в виду, что система ДАУ «Mini-Marex» предназначена для управления главным судовым дизелем. Поэтому характеристики ее исполнительных механизмов имеют вид, показанный на рис. 14.

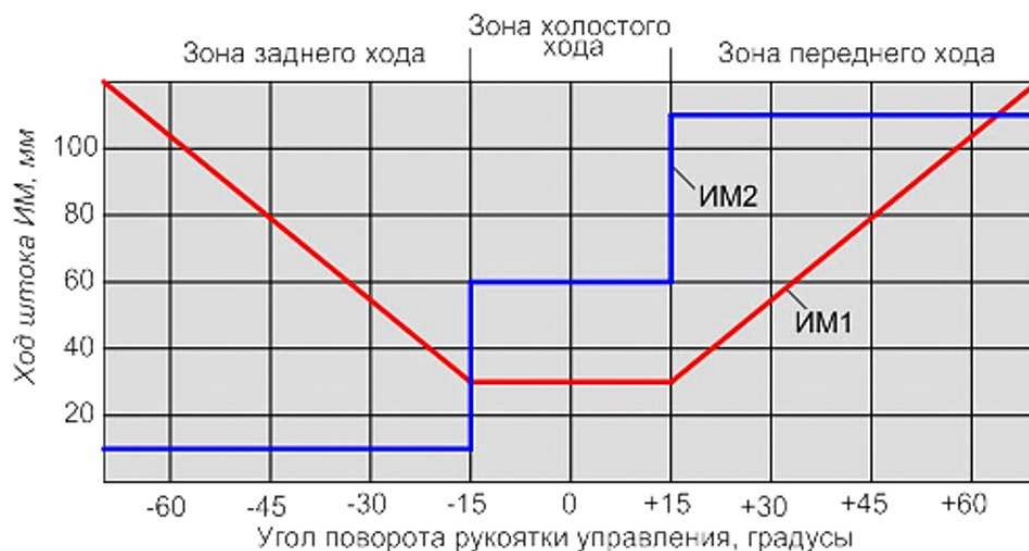


Рис. 14. Характеристики исполнительных механизмов системы ДАУ «Mini-Marex»: ИМ1 — исполнительный механизм, воздействующий на регулятор частоты вращения дизеля; ИМ2 — исполнительный механизм, воздействующий на реверс-муфту редуктора

Характеристики исполнительных механизмов системы управления КД должны иметь вид, показанный на рис. 15. Перестройка характеристик может быть выполнена с помощью электронного блока управления.

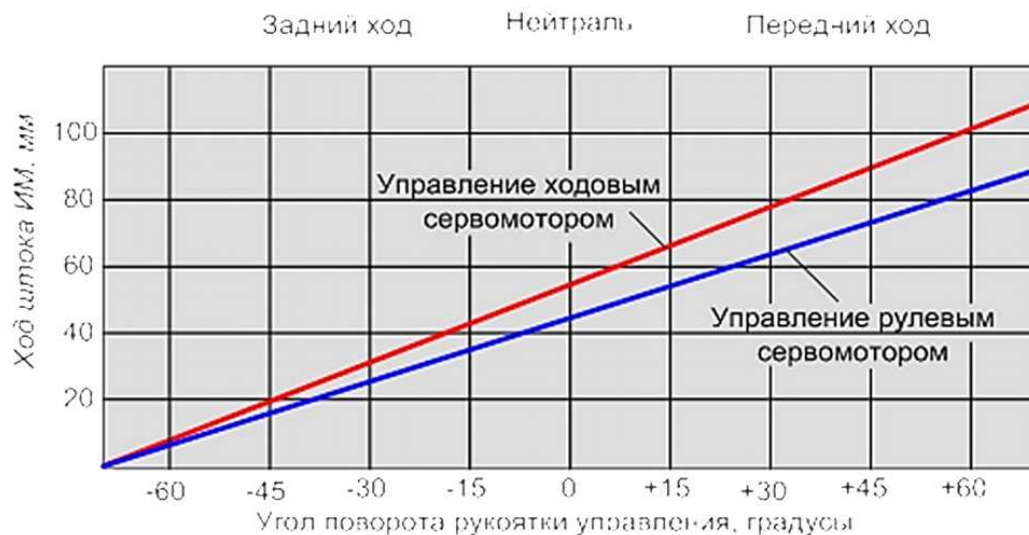


Рис. 15. Характеристики исполнительных механизмов системы управления КД

Линейные перемещения штоков исполнительных механизмов электромеханического сервопривода передаются на управляемый объект (в нашем случае — на штоки золотников гидравлических сервоприводов крылатого движителя) с помощью специальных устройств — боуденов. Они представляют собой гибкие трубки из туго навитой стальной проволоки, покрытой защитной оболочкой из маслбензостойкого пластика. Внутри трубки находится упругая стальная проволока толщиной 1,2 мм, которая и передает линейное перемещение.

Компьютерное моделирование пропульсивного комплекса с крыльчатым движителем и предлагаемой системой дистанционного управления показало возможность реализации нескольких режимов движения судна.

1. При воздействии на ходовой сервомотор КД, перемещающий рычаг управления КД в поперечном направлении, обеспечивается прямолинейное движение судна вперед или назад с изменением скорости от нулевой до максимальной.

2. При воздействии на рулевой сервопривод, перемещающий рычаг управления КД в продольном направлении, создается упор, направленный перпендикулярно диаметральной плоскости судна. При этом если крыльчатые движители расположены в корме, судно будет разворачиваться на месте вправо или влево. Большому судну (например, пароуму) с крыльчатыми движителями, установленными в носу и в корме, боковой однонаправленный упор позволяет двигаться лагом (бортом вперед), что очень удобно при швартовке судна к причальной стенке.

3. При одновременном воздействии на оба сервомотора КД создается упор, направленный под острым углом к диаметральной плоскости. Это обеспечивает режим циркуляции (движение судна по кругу) в различных направлениях: вперед-влево, вперед-вправо, назад-влево, назад-вправо.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 2026 году удивительному изобретению австрийского инженера Эрнста Лео Шнайдера — судовому крыльчатому движителю — исполнится 100 лет. Многочисленные исследования, расчеты, испытания и накопленный опыт эксплуатации, а также собственные расчеты, выполненные авторами статьи, подтвердили сочетание в этом движителе отличных ходовых качеств с уникальными возможностями обеспечения любых сложных маневров судна.

Благодаря этим особенностям крыльчатый движитель нашел применение на паромов, буксирах, тральщиках, плавучих кранах. Для судов, предназначенных для выполнения работ на морском шельфе, уникальные характеристики крыльчатого движителя могут быть полезны для точного позиционирования. Вместе с тем основным недостатком, сдерживающим широкое применение КД, является сложность и высокая стоимость как механизма КД, так и электрогидравлической системы, необходимой для дистанционного управления его режимами.

Выполненные авторами проработки показали возможность существенно упростить проектирование и изготовление этой системы за счет применения и адаптации конструктивных модулей системы ДАУ, предназначенной для управления главным судовым двигателем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бородулин М.П. Крыльчатый движитель — средство обеспечения высокой маневренности судна / М.П. Бородулин // Судостроение. — 1996. — № 11 — 12. — С. 18 — 21.
2. Бородулин М.П. Пропульсивная установка плавкрана грузоподъемностью 500 т / М.П. Бородулин // Судостроение. — 1986. — № 6.
3. Gerauscharne Voith-Schneider-Propeller für Sonderfahrzeuge // Hansa. — 1989. — Bd. 126. N 5.
4. Войткунский Я.И. Справочник по теории корабля: Судовые движители и управляемость / Я.И. Войткунский, Р.Я. Першиц, И.А. Титов. — 2-е изд., перераб. и доп. — Л.: Судостроение, 1973. — 511 с.
5. Грузинов В.И. Крыльчатые движители / В.И. Грузинов, В.И. Гуляев, Т.Б. Ибрагимова, Л.Э. Лихтеров и др. — Л.: Судостроение, 1973. — 135 с.
6. Bakhtiari M. Optimisation scheme applied to the Voith-Schneider propulsion system using genetic algorithm / M. Bakhtiari, H. Ghassemi, A. Sakaki, G. He // Ships and Offshore Structures. — 2020. — Vol. 16. No. 6.
7. Jürgens D. Voith Schneider Propeller (VSP) — Investigations of the cavitation behaviour / D. Jürgens, H.-J. Heinke // First International Symposium on Marine Propulsors SMP'09. Trondheim, Norway, June 2009.
8. Новосельцев М.Н. Пути модернизации крыльчатого движителя / М.Н. Новосельцев // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2015. — Вып. 45. — С. 189 — 192.
9. Система «Mini Marex». Техническое описание и руководство по эксплуатации. Rexroth Bosch Group, 2005. — 46 с.

REFERENCES

1. Borodulin M.P. Kryl'chatyi dvizhitel' — sredstvo obespecheniya vysokoi manevrennosti sudna [Cycloidal propeller — a means of ensuring high ship maneuverability]. *Sudostroenie [Shipbuilding]*. 1996. No. 11 — 12. P. 18 — 21.
2. Borodulin M.P. Propul'sivnaya ustanovka plavkрана грузопод'emnost'yu 500 t [Propulsion system of floating crane with lifting capacity of 500 tons]. *Sudostroenie [Shipbuilding]*. 1986. No. 6.
3. Gerauscharne Voith-Schneider-Propeller fur Sonderfahrzeuge. *Hansa*. 1989. Bd. 126. N 5.
4. Voitkanskii Ya.I., Pershits R.Ya., Titov I.A. Spravochnik po teorii korablya: Sudovye dvizhiteli i upravlyaemost' [Ship theory handbook: Ship propulsion and steerability]. Leningrad: Sudostroenie, 1973. 511 p.
5. Gruzinov V.I., Gulyaev V.I., Ibragimova T.B., Likhterov L.E. et al. Kryl'chatye dvizhiteli [Cycloidal propeller]. Leningrad: Sudostroenie, 1973. 135 p.
6. Bakhtiari M., Ghassemi H., Sakaki A., He G. Optimisation scheme applied to the Voith-Schneider propulsion system using genetic algorithm. *Ships and Offshore Structures*. 2020. Vol. 16. No. 6.
7. Jürgens D., Heinke H.-J. Voith Schneider Propeller (VSP) — Investigations of the cavitation behaviour. *First International Symposium on Marine Propulsors SMP'09*. Trondheim, Norway, June 2009.
8. Novosel'tsev M.N. Puti modernizatsii kryl'chatogo dvizhitelya [Ways of modernizing wing propulsor]. *Vestnik Volzhskoi gosudarstvennoi akademii vodnogo transporta [Bulletin of the Volga State Academy of Water Transport]*. 2015. Issue 45. P. 189 — 192.
9. Sistema «Mini Marex». Tekhnicheskoe opisanie i rukovodstvo po ekspluatatsii [Mini Marex system. Technical description and operating manual]. Rexroth Bosch Group, 2005. 46 p.