

Тяговые характеристики судового электропривода

Анализируются типы электроприводов и их системы управления. Рассмотрены три этапа расчета тяговых характеристик судов: приближенный качественный расчет, моделирование судов в открытых бассейнах и автоматическое проектирование с использованием САПР. Первые этапы обычно выполняются для новых типов судов, а последний этап является уточняющим с использованием существующих библиотек типов судов и режимов их применения. Влияние ВРК на тяговые характеристики судов проявляется главным образом в повышении КПД, маневренности и корректировке дополнительных и общих сопротивлений движению судна, что требует расширения возможностей САПР.

Роберт Шульга, к. т. н.
rnshulga@vei.ru

Электрификация привода наземного, воздушного и водного транспорта является одной из важнейших черт современности [1, 2]. В судовом электроприводе (ЭП) также происходят существенные перемены, связанные с внедрением винторулевых колонок (ВРК), подруливающих и резервных устройств, разнотипных электродвигателей (ЭД), с применением цифровых технологий проектирования, беспилотного электродвижения [3, 4].

Структура и основные энергетические соотношения ЭП с использованием наиболее распространенного асинхронного электродвигателя (АД) приведены на рис. 1. Там же внизу показаны составные элементы ЭП: преобразователь частоты (ПЧ), двигатель и нагрузка в виде гребного винта (ГВ). Питание ЭП осуществляется либо от сети, либо от турбогенератора (дизель-генератора), а в ряде случаев — от аккумулятора (накопителя). Основные энергетические соотношения

приведены внизу, где принимаются обозначения: U, f, I, ϕ — напряжение, частота, ток, фаза тока, $P_{\text{вх}}, P_1$ — активные мощности на выходе ПЧ и нагрузки; для двигателя M, n — соответственно момент и число оборотов; для нагрузки F, v, j — соответственно сила (упор), линейная скорость, момент инерции винта. В верхней части рис. 1 показано направление энергии при пуске, торможении (реверсе). Промежуточный режим авторотации, то есть самовращение винта под действием набегающего потока, не показан, хотя является важным режимом при маневрировании.

На рис. 2 дана расшифровка структуры и формы выходных напряжений на выходе отдельных элементов ЭП. Форма напряжения инвертора соответствует топологии наиболее распространенного двухуровневого преобразователя. Дроссель обычно применяется для фильтрации высших гармоник инвертора. АД является наиболее распространенным двигателем, хотя двигатели

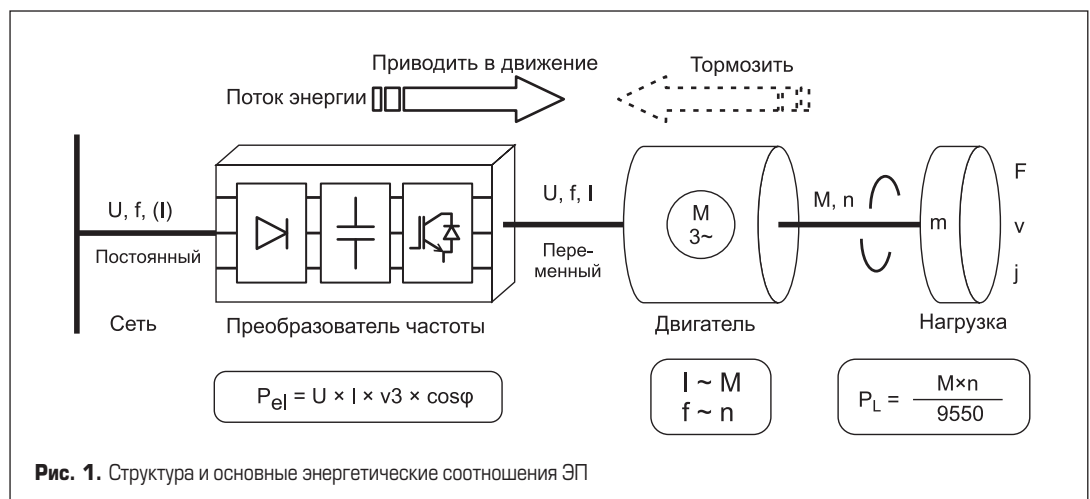


Рис. 1. Структура и основные энергетические соотношения ЭП

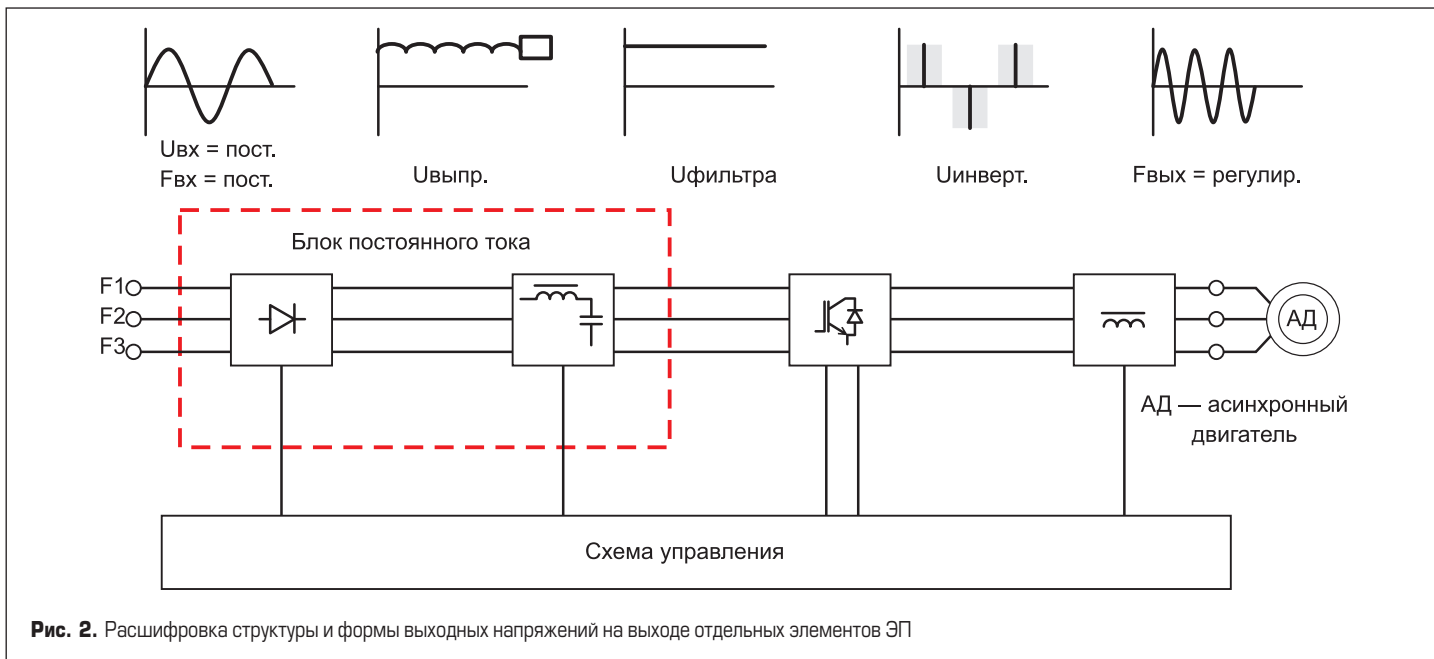


Рис. 2. Расшифровка структуры и формы выходных напряжений на выходе отдельных элементов ЭП

с постоянными магнитами (ПМ) получают все большую популярность для малых мощностей ЭП, так же как синхронные двигатели — для больших мощностей ЭП. На рис. 2 не показана схема чоппера, который включается между фильтром и инвертором и защищает блок постоянного тока от перегрузки при реверсе. Схемы систем управления зависят от назначения, структуры и топологии ЭП и рассмотрены ниже.

Система управления (СУ) электродвигателями ЭД постоянного и переменного тока

Скорость ЭД постоянного тока, определяемая его частотой вращения, напрямую связана с величиной напряжения питания, прикладываемого к двигателю, и момента нагрузки:

$$\omega = \frac{U}{K_E} - \frac{M}{\beta},$$

где ω — угловая частота, рад/с, U — напряжение питания, В, K_E — постоянная ЭДС, В·с/рад, M — момент нагрузки ЭД, Н·м, β — механическая жесткость ЭД.

В результате скорость вращения ω меняется с изменением величины напряжения питания. СУ ЭД переменного тока с использованием преобразователя частоты (ПЧ) может применять скалярный или векторный методы управления частотой.

Скалярный метод управления обеспечивает постоянное отношение амплитуды напряжений ЭД к частоте в небольшом диапазоне до 1:10 в сторону снижения от номинальной частоты. Метод прост в реализации и подходит для большинства задач управления двигателем, где не требуется высокая динамика работы. Медленный отклик при переходном процессе связан с тем, что данный метод контролирует величину напряжения и частоты вместо управления фазой и величиной тока.

Векторное управление позволяет управлять не только амплитудой и частотой, но и фа-

зой управляющих напряжений. Этот метод обеспечивает большую производительность, максимальное быстродействие и регулирование в гораздо большем диапазоне скоростей (1:200), что невозможно выполнить с помощью скалярного управления. Недостатки метода: сложность реализации и более высокая цена, связанная с необходимостью использования более мощного микроконтроллера. Векторное управление предусмотрено в следующих направлениях: робототехника, беспилотные аппараты, электрический транспорт, устройства автоматики и другие.

Сложность реализации векторного управления обусловлена контролем не только величины и частоты напряжения питания, но и фазы, так как необходимо контролировать амплитуду и угол пространственного вектора, показанного на рис. 3, который по оси Q задает контроль момента, а по оси D — контроль поля [4]. Векторное управление лишено недостатков скалярного управления и может применяться ко всем типам электродвигателей переменного и постоянного тока.

К преимуществам векторного управления относятся высокая точность регулирования скорости; плавный старт и плавное вращение ЭД во всем диапазоне частот; быстрая реакция на изменение нагрузки, причем при изменении нагрузки скорость не меняется; увеличенный диапазон

управления и точность регулирования; а также снижаются потери на нагрев и намагничивание, за счет чего повышается КПД электродвигателя.

Недостатки векторного управления: необходимость задания параметров электродвигателя, большие колебания скорости при постоянной нагрузке; сложность реализации.

Функциональная СУ векторного управления скоростью ЭД переменного тока показана на рис. 4 [4]. Схема содержит два контура контроля: магнитного потокосцепления и момента, которые вместе с блоком оценки могут быть реализованы различными способами. Внешний контур управления скоростью ω унифицирован и генерирует управляющие сигналы для регуляторов момента M^* и магнитного потокосцепления Ψ^* (через блок управления потоком). Скорость двигателя ω может быть измерена датчиком (скорости/положения) или получается с помощью оценщика, который может реализовать бездатчиковое управление.

Классификация методов векторного управления

В настоящем разделе рассмотрены самые распространенные методы управления, которые применяются для асинхронных и синхронных электродвигателей с постоянными магнитами и синусоидальной ЭДС.

Существующие методы управления моментом могут быть классифицированы различными способами. Чаще всего методы управления моментом разделяют на две группы: линейные (ПИ, ПИД) регуляторы; нелинейные (гистерезисные) регуляторы.

В свою очередь линейные регуляторы бывают с полеориентированным и прямым управлением. Нелинейные регуляторы могут использовать прямое управление с таблицей включения или прямое самоуправление. Для всех вышеуказанных методов применяется обратная связь по скорости, диапазон регулирования скорости 1:200, быстродействие менее 1–2 мс, установившаяся погрешность заданной

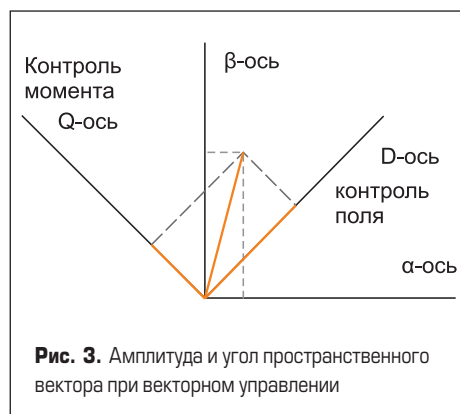


Рис. 3. Амплитуда и угол пространственного вектора при векторном управлении

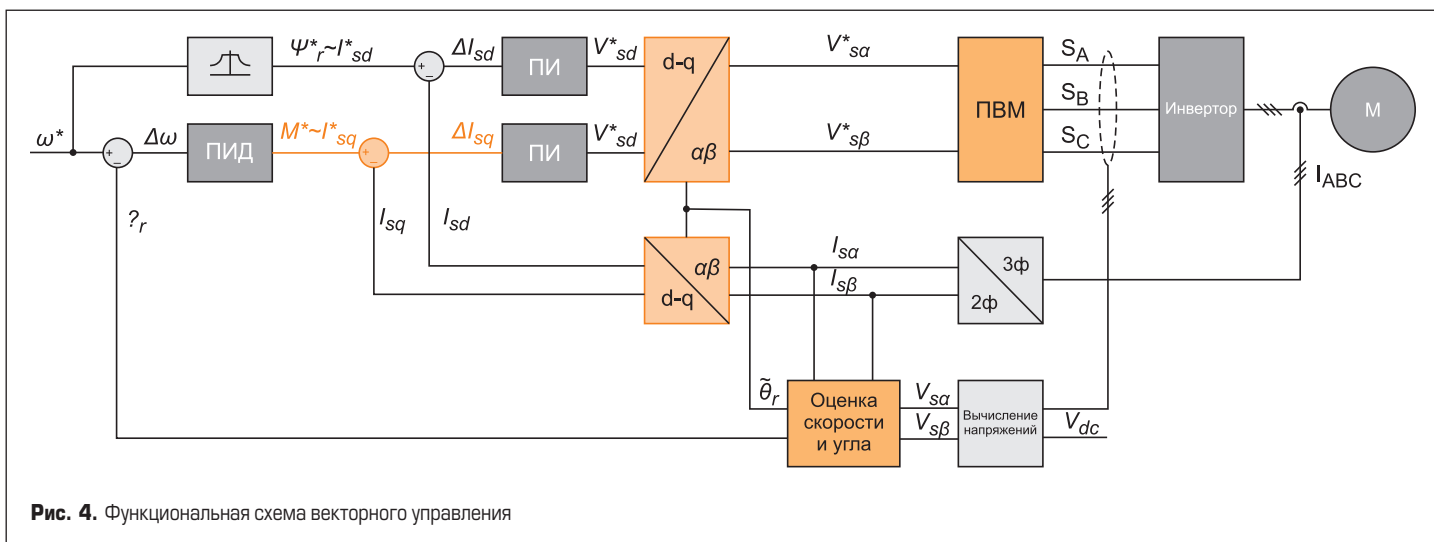


Рис. 4. Функциональная схема векторного управления

скорости отсутствует, пусковой момент высокий. Однако недостатками являются сложность реализации и высокая цена указанных СУ.

Среди векторного управления наиболее широко используются полеориентированное управление (FOC — field oriented control) и прямое управление моментом (DTC — direct torque control).

В полеориентированном управлении момент и поле контролируются косвенно посредством управления составляющими вектора тока статора.

В схеме прямого управления моментом с пространственно-векторной модуляцией (ПУМ-ПВМ) момент и потокосцепление напрямую управляются в замкнутом контуре, поэтому необходима точная оценка потока и момента двигателя. ПУМ-ПВМ работает на постоянной частоте переключения. Это значительно повышает характеристики СУ: уменьшает пульсации момента и потока, позволяет уверенно запускать ЭД и работать на низких оборотах. Однако при этом снижаются динамические характеристики привода.

Самоуправление здесь не рассматривается, так как обеспечивает существенно несинусоидальные формы тока и потокосцепления.

Типы пропульсивных систем и их тяговые характеристики

Винторулевые колонки (ВРК) получили большое распространение в судостроении широкого класса судов, отраженных в [5, 6]. Применение электрических азимутальных ВРК, число которых может изменяться на судне от 1 до 7 и более, открывает новые возможности распределенного электродвижения, ранее рассмотренного применительно к распределенной генерации и распределенному электроснабжению надводных, наземных объектов с применением постоянного тока и использованием преобразователей, накопителей, ВИЭ и др. [7, 8]. ВРК бывают двух типов: механические и электрические [8]. Механические, например типа Aquamaster, являются более простыми и дешевыми; электрические, в частности типа Azipod, более сложны и дороги. Усложнение и удорожание пропульсивного комплекса (ПК) судна, ко-

торый с электрической ВРК включает судно — ЭД — преобразователь частоты (ПЧ) — движитель (ГВ) — руль, сравнительно с традиционной главной энергетической установкой (ГЭУ) и механической ВРК, которые включают судно — ЭД — редуктор — валопровод — ГВ, является оправданным. Преимущества нового ПК для ряда типов судов достаточно очевидны не только в улучшении мореходных качеств, но и при эксплуатации в части ремонта и модернизации. Если ГЭУ незаменимы для кораблей ВМФ, где обеспечение быстроходности превалирует над экономичностью, то ВРК незаменимы для ледоколов, судов динамического позиционирования, плавучих буровых, а также лайнеров, танкеров и других судов. Впрочем, для некоторых кораблей ВМФ возможно сочетание ГЭУ и ВРК типа резервного двигательного комплекса, которые, правда, действуют раздельно, что позволяет их проектировать независимо друг от друга.

Методика расчета тяговых характеристик (ТХ) судов отработывалась в течение многих десятилетий применительно к судам разных типов. В данной статье рассматриваются три типа одновальных судов: грузовое судно (ГС), дизельная подводная лодка (ПЛ), глиссирующий пассажирский теплоход (ППТ) малого водоизмещения применительно к механическим ВРК. Рассмотрению ТХ подлежат: методика качественных расчетов на основании упрощенных формул, физическое моделирование и автоматическое проектирование с использованием САПР. Методы моделирования наиболее полно освещены в [9], вопросы применения ВРК и их характеристики отражены в [10–13], методика применения САПР показана в [14].

Цель расчетов состоит в получении типовых значений: мощности двигателя — $N_{дв}$, момента гребного винта (ГВ) — M , полезной тяги ГВ — PE , пропульсивного коэффициента η при заданных соотношениях шага и диаметра ГВ.

Качественный расчет ТХ

Мощность (Вт), необходимая для движения судна, рассчитывается по формуле:

$$N_{дв} = Rv / \eta \eta_{ред} \eta_{вл}, \quad (1)$$

где R — сопротивление среды движению судна, Н; v — скорость движения судна, м/с; η — пропульсивный коэффициент; $\eta_{ред}$ — коэффициент полезного действия (КПД) редуктора; $\eta_{вл}$ — коэффициент полезного действия (КПД) валопровода.

Пропульсивный коэффициент η характеризует эффективность комплекса «корпус судна — движитель», причем движителями называют устройства, преобразующие энергию двигателя судна в силу тяги, преодолевающую сопротивление среды движению судна. Определение R и η при постройке самоходных судов является непростой задачей, которая должна решаться при определении ТХ. Для предварительной оценки мощности привода судна можно принимать в расчетах значение $\eta = 0,3–0,5$ в зависимости от типа судна, качества изготовления комплекса, частоты вращения движителя и его размеров. КПД редуктора $\eta_{ред}$ определяется числом пар зубчатых зацеплений и при их числе до шести пар достигает $0,75–0,9$, что стимулирует отказ от редуктора для ВРК путем замены на преобразователь частоты (ПЧ) с КПД, близким значению $0,95$. КПД длинного валопровода в ГЭУ достигает $0,9–0,97$, в то время как укороченный валопровод ВРК ближе к последнему значению.

Мощность двигателя $N_{дв}$ (Вт) можно также определять по формуле:

$$N_{дв} = 2\pi nM / \eta_{ред} \eta_{вл}, \quad (2)$$

где n — число оборотов ГВ, 1/с; M — момент ГВ, Н·м.

Сопротивление среды R , Н равно:

$$R = R_{мп} + R_o + \Delta R, \quad (3)$$

где $R_{мп}$ — сопротивление трения; R_o — остаточное сопротивление; ΔR — дополнительное сопротивление.

В судостроении обычно полное сопротивление воды движению судна рассчитывают с использованием метода Фруда по результатам испытаний модели корпуса судна в специальных опытных бассейнах. По этому методу полное сопротивление R условно подразделяется на со-

противление трения R_{TP} и на остаточное сопротивление R_o . К сопротивлению трения относят часть полного сопротивления, которое зависит от размеров судна, площади его смоченной поверхности (для водоизмещающих судов — поверхность корпуса ниже ватерлинии) и скорости движения. Сопротивление трения рассчитывают по специальным графикам, составленным на основе результатов испытаний пластин в потоке жидкости. С увеличением длины судна и скорости его движения коэффициент трения пластины, с помощью которого определяют сопротивление трения R_{TP} , уменьшается.

Натурное судно и модель-копия имеют различные коэффициенты трения. Это основная причина, делающая невозможными пересчеты полного сопротивления с натуры на модель пропорционально кубу масштаба. Данное явление называют обычно «масштабный эффект». Вторая часть полного сопротивления — остаточное сопротивление R_o — зависит от типа судна (формы его корпуса), количества корпусов, скорости движения, волнения и принимается равной для судна и модели пропорционально кубу масштаба — m^3 .

Например, если судно длиной $L = 50$ м имеет остаточное сопротивление $R_o = 12\,500$ Н, то модель этого судна длиной 1 м, будет иметь остаточное сопротивление $r_o = R_o/m^3 = 12500/50^3 = 0,1$ Н.

Для оценки гидродинамических качеств корпуса судна и сопротивления на начальных стадиях проектирования применяют безразмерную характеристику — гидродинамическое качество:

$$K = Dg/R, \quad (4)$$

где D — водоизмещение судна, т; $g = 9,81$ м/с² — ускорение свободного падения.

Удобно использовать эту характеристику для оценки в первом приближении сопротивления самоходных моделей. С этой целью была выполнена систематизация судов различных типов и кораблей, которая позволила установить зависимость изменения гидродинамического качества K от числа Фруда (относительной скорости движения) по длине судна:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}}$$

или его водоизмещению:

$$Fr v = \frac{v}{\sqrt{g(\sqrt[3]{D})}}. \quad (5)$$

Параметр Fr использован для водоизмещающих судов, $Fr v$ — для быстроходных судов и аппаратов с динамическим позиционированием (ДПП). Полученные зависимости были пересчитаны для моделей судов различных классов и кораблей, которые приведены в [9]. При пересчете коэффициента K судов для моделей были учтены масштаб модели, изменение доли сопротивления трения в общем сопротивлении в зависимости от числа Фруда, различие в характере потока в пограничном слое судна и его модели. Коэффициенты K судов и моделей ДПП практически совпадают, так как доля

сопротивления трения в общем сопротивлении для этих судов незначительна, то есть сопротивление модели пропорционально кубу масштаба судна. Доля сопротивления трения судов большинства типов в общем сопротивлении значительная и зависит от числа Фруда. Так, наибольшая доля сопротивления трения наблюдается у подводных транспортных судов и лодок и составляет 90–95% R .

Коэффициенты K носят качественный характер: для модели и судна выбираются эмпирически. Так, для морского грузового судна при изменении значения Fr в диапазоне 0,2–0,6 параметр K соответствует показателям 350–50. Для принятого в таблице грузового судна длиной 150 м при скорости 12 м/с и относительной скорости (число Фруда), равной 0,31, гидродинамическое качество $K = 170$. Сопротивление модели R в соответствии с (4) равно 0,88. Мощность двигателя модели по (1) составляет 5 Вт.

На самоходную модель при движении действуют гидродинамические силы сопротивления корпуса; силы от движительно-рулевого комплекса; кроме того, на надводную часть модели при ветре также воздействуют силы. Существенное влияние оказывают на модель волнение, течение и ряд других факторов. Проекция всех гидро- и аэродинамических сил на направление движения модели представляет силу сопротивления среды, от которой во многом зависит мощность двигателя модели. Моделисты обычно не рассчитывают сопротивление среды движению моделей. Мощность двигателя выбирают с использованием приближенной формулы:

$$N_{дв} = 2(N'_{дв} / m^{3,5}), \quad (6)$$

где $N'_{дв}$ — мощность двигателя модели; $N_{дв}$ — мощность двигателя натурного судна; m — масштаб модели.

Расчеты по этой формуле показывают, что мощность ЭД, применяемых в самоходных моделях, зачастую значительно завышена по сравнению с требуемой для движения с масштабной скоростью. Вследствие этого силовой привод неэффективно используется, преждевременно разряжаются элементы питания и топлива, а также увеличивается масса модели. Мощность натурного судна с учетом масштаба, равного 100, составляет:

$$N'_{дв} = N_{дв} m^{3,5}/2 = 25 \text{ МВт}. \quad (7)$$

Моделирование ТХ (по материалам [9])

Качественную оценку сопротивления воды движению модели судна и потребляемую мощность двигателя можно оценить, если известны тип и водоизмещение модели, скорость ее движения и длина. Обычно моделист знает характеристики судна-прототипа, модель которого он строит, и определить требуемые характеристики модели не представляет труда с помощью теории подобия:

- Масштаб модели: $m = \text{Длина судна} / \text{Длина модели}$.
- Масштаб водоизмещения: $m^3 = \text{Объем судна} / \text{Объем модели}$.
- Масштаб скорости: $1/\sqrt{m} = \text{Скорость судна} / \text{Скорость модели}$.
- Масштаб частоты вращения винтов $n = \text{Частота } n \text{ судна} \times \sqrt{m} \text{ частоты } n \text{ модели}$.

При пересчете этих характеристик судна на модель и наоборот принимаются следующие соотношения: m — масштаб модели, используемый для пересчета всех линейных размеров модели (длина, ширина, осадка, высота борта и т. д.); m^2 — масштаб площади; m^3 — масштаб водоизмещения, массы; \sqrt{m} — масштаб скорости и частоты вращения движителей.

В качестве примера определим сопротивление и необходимую мощность двигателя нескольких моделей: грузового морского теплохода, подводной лодки и речного глиссирующего пассажирского теплохода для малых рек. Полученные результаты приведены в таблице.

В результате расчетов была получена минимально потребная мощность для движения модели с масштабной скоростью. Необходимо учитывать, что на дистанции во время прохождения судна редко бывает тихая безветренная погода. Волнение и ветер приводят к возникновению дополнительного сопротивления среды движению самоходного судна и модели, и на преодоление этого сопротивления необходима дополнительная мощность. Способ учета влияния ветрового режима на сопротивление самоходных судов и моделей рассмотрен в [9].

Таким образом, с помощью упрощенного способа расчета сопротивления воды движению самоходных моделей судов и кораблей можно оценить минимально необходимую мощность двигателя модели, выбрать тип двигателя, что позволяет затем рассчитать характеристики движителей и других устройств.

К выбору параметров пропульсивной системы водоизмещающих судов

Модели водоизмещающих судов могут двигаться в режиме плавания ($Fr v < 1$) и переходном режиме ($1 < Fr v < 3$). Этот режим плавания достаточно точно описывается выражением, отражающим закон Архимеда:

$$D = \rho V, \quad (8)$$

где D и V — водоизмещение модели судна, т, и объемное водоизмещение, м³; $\rho = 1000$ кг/м³ — плотность речной воды.

В режиме плавания движутся модели грузовых и пассажирских судов морского и речного флота, а в переходном режиме — модели различных служебно-вспомогательных судов, быстроходных кораблей и катеров военно-морского флота, пассажирские катера некоторых типов. За счет повышенной скорости на модели судов, движущихся в переходном режиме, действует, кроме архимедовой силы, гидродинамическая сила поддержания, приводящая к некоторому всплытию модели и увеличению ее осадки кормой. Эффективность

Таблица. Коэффициенты пересчета характеристик судна и модели

Характеристика	Формула пересчета	Расчетные значения		
		Грузовой морской теплоход	Подводная лодка	Глиссирующий пассажирский теплоход
Длина судна L', м	-	150	84,8	22
Водоизмещение судна D', м	-	15000	4300	30
Скорость судна v', м/с	-	12	15,3	11
Масштаб модели, m	-	100	100	20
Длина модели L, м	$L = L'/m$	1,5	0,848	1,1
Водоизмещение модели D, м	$D = D'/m^3$	0,015	0,0043	0,00375
Скорость модели v, м/с	-	1,2	1,53	2,5
Относительная скорость	$\frac{v}{\sqrt{gL}}$	0,31	0,53	-
	$\frac{v}{\sqrt{g(\sqrt[3]{D})}}$	-	-	2
Гидродинамическое качество модели K	-	170	32	12
Сопrotивление модели R, Н	$R = \frac{Dg}{K}$	0,88	1,35	3,12
Мощность двигателя модели N _{дв} , Вт	$N_{дв} = \frac{Rv}{\eta \times \eta_{ред} \times \eta_{вл}}$	5,0 $\eta = 0,3$ $\eta_{ред} = 0,9$ $\eta_{вл} = 0,8$	7,5 $\eta = 0,3$ $\eta_{вл} = 0,95$	29,0 $\eta = 0,3$ $\eta_{вл} = 0,9$

пропульсивной системы, а следовательно, и ходовые качества водоизмещающих моделей зависят от следующих факторов:

- значения сопротивления воды движению модели;
- характеристик взаимодействия между корпусом модели и ее двигателями;
- параметров движительно-рулевого комплекса;
- характеристик двигателя и передачи от двигателя к движителям.

Схема определения шагового отношения гребного винта (ГВ) и пропульсивного коэффициента модели выбирается по соотношениям, приведенным в [9]. Например, для открытого ГВ модели одновального грузового судна примем двигатель мощностью 15 Вт (в три раза выше, чем в таблице), с крутящим моментом на ГВ (при $\eta_{ред} = 0,75$) $M_{дв} = 0,036$ Н·м и частотой вращения ГВ $n = 50$ с⁻¹.

Зададим масштабную скорость модели $v = 1,5$ м/с. При этой скорости сопротивле-

ние движению модели, по данным предварительного расчета, составляет 3,6 Н (в четыре раза выше, чем в таблице 1). Коэффициенты взаимодействия, определенные по формулам (9), (10), $\Psi = 0,2$ и $t = 0,15$. Скорость потока в диске винта $ve = v(1 - \Psi) = 1,2$ м/с. Диаметр винта модели $DB = 0,05$ м. Рассчитав для нескольких значений HB/DB потребляемый крутящий момент M , можно построить на рис. 5 зависимость $M = f(HB/DB)$ и определить такое шаговое отношение HB/DB , при котором $M = M_{дв}$, где HB — шаг винта.

Равенство моментов отмечается, как следует из рис. 5, при $HB/DB = 1,03$. Гребной винт с таким шаговым отношением развивает полезную тягу $Pe = 3,7$ Н и обеспечивает для модели $\eta = 0,51$. При расчете параметров пропульсивного комплекса ПК получаемая тяга винтов Pe не всегда соответствует сопротивлению модели R при расчетной скорости v . Это объясняется неудачным выбором диаметра винта и его частоты вращения. В этом

случае необходимо повторить расчет, изменив диаметр винта (если это возможно) или частоту его вращения (выбрав иное передаточное число редуктора).

При расчетах движителей самоходных моделей морских судов нужно оценить по формулам следующие величины:

- коэффициент попутного потока:

$$\Psi = 0,165 \cdot \delta \cdot [X\sqrt{3}\sqrt{V/D_B}], \quad (9)$$

где $X = 1$ — для одновальных моделей; $X = 2$ — для двухвальных моделей; D_B — диаметр винта, м;

- коэффициент засасывания корпуса моделей одновальных судов:

$$t = 0,8\Psi; \quad (10)$$

- моделей двухвальных судов:

$$t = 0,25\Psi + 0,14. \quad (11)$$

Эффективность работы пропульсивного комплекса модели оценивается пропульсивным коэффициентом η , значение которого можно найти по формуле,

$$\eta = [Pe \times v] / [2\pi \times n \times M] = \eta_{движ} [1 - t] / [1 - \Psi], \quad (12)$$

где Pe — полезная тяга ГВ, Н; v — скорость модели, м/с; M и n — крутящий момент, Н·м; частота вращения ГВ, с⁻¹; t и Ψ — коэффициенты засасывания и попутного потока; $\eta_{движ}$ — КПД движителя. При движении модели полезная тяга ГВ Pe должна быть равна сопротивлению воды движению модели R .

Гребной винт обычно проектируют для одного, наиболее типичного для данного судна режима работы, например, для грузового судна — при плавании с полным грузом, а для буксира — при буксировке другого судна. Если режим работы винта отличается от расчетного (грузовое судно в балластном переходе, буксир без буксировки, волнение, качка), винт будет работать с гораздо меньшим КПД, чем в расчетном режиме.

Автоматическое проектирование пропульсивного комплекса

Наряду с качественным расчетом и моделированием пропульсивного комплекса ПК в настоящее время получило широкое распространение его автоматическое проектирование с использованием САПР.

Использование комплекса программ TRIBON HYDRO (HYDRO) позволяет определить для судна заданного типа и водоизмещения сопротивление RT , коэффициенты взаимодействия, а также характеристики ГВ при каждом из значений скорости, используя коэффициент упора KT и относительной поступи J в виде отношения KT/J . Определив J и коэффициент момента в открытой воде KQO при каждом значении скорости судна, получают N — число оборотов ГВ (об/мин) и мощность на валу PS .

Сопротивление голого корпуса определяется по методу ИТТС 1978 [13] в виде зависимости:

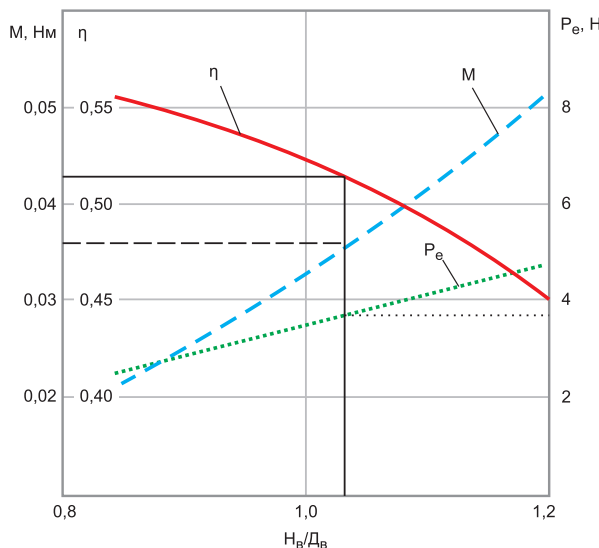


Рис. 5. Расчет параметров пропульсивного комплекса ПК модели грузового судна

$$CT = CF(1+K) + CR + CA + CAA,$$

где CT — коэффициент общего сопротивления судна, K — коэффициент формы.

Для учета сопротивления CAA от выступающих частей используют программы Holtrop@Mennen.

В программных комплексах используют коэффициенты взаимодействия:

t — коэффициент засасывания, ω — коэффициент попутного потока, ηR — коэффициент неравномерности поля скоростей в диске винта. Эти коэффициенты определяют эмпирически или вводят постоянным значением для каждого из коэффициентов:

$$\begin{aligned} PE &= RT \times V \times (1+SVC/100), \\ \eta H &= (1-t) / (1-\omega), \\ \eta O &= (J \times KT) / (2\pi \times KQO), \\ \eta R &= KQO / KQB, \\ \eta D &= \eta O \times \eta H \times \eta R, \\ N &= 60,0 \times V \times (1-\omega) / (J \times D), \\ PD &= PE / \eta D, \\ PS &= PD \times \eta T, \end{aligned} \quad (13)$$

где: V — скорость судна; RT — общее сопротивление с учетом выступающих частей; SVC — срок службы; PE — действительная мощность; t — коэффициент засасывания; ω — коэффициент попутного потока; J — относительная поступь; KT — коэффициент упора; KQO — коэффициент момента в открытой воде; KQB — коэффициент момента за корпусом; ηH — коэффициент влияния корпуса; O — КПД винта в свободной воде, ηR — коэффициент неравномерности поля скоростей в диске винта; D — квазипропульсивный коэффициент (QPC); T — КПД передачи; N — число об/мин; PD — мощность, подаваемая на винт; PS — мощность, подводимая к валу ГВ.

Если пользователь вводит значения 1 для КПД передачи, мощность, подаваемая на вал в выводе данных, будет равна мощности, подаваемой на винт, что печатается в выводе результатов расчета.

Из известных программ расчета ПК: Prop Expert, SwiftCraft (для судов длиной до 75 м), FREEship_Plus — наиболее продвинутой является программа NavCad, включающая 10 типов движителей и большую библиотеку серийных испытаний моделей судов, включая 35 алгоритмов и серий судов. Эта программа обеспечивает полный расчет параметрического анализа ходкости и пропульсивных качеств судна. Рассматривается система «корпус — двигатель — двигатель — вода» в разных режимах работы, включая «несудовые» (волнение, ветер, мелководье, режимы буксировки/толкания).

Близким к указанной программе является отечественный комплекс PROPULSION EXPERT 3.0 разработки ЦНИИМФ. Пример расчета основной характеристики ПК в виде зависимости мощности винта PS_{prop}/eng (л.с.) от Eng/RPM — числа об/мин при разных скоростях движения приведен на рис. 6 для скоростного глиссирующего теплохода ППТ (табл.) [14]. Для заданной скорости 12 м/с определяется мощность двигателя 400 л.с. и номинальная частота ГВ 2100 об/мин.

Выводы

Выполнен анализ типов электроприводов и их систем управления. Рассмотрены три этапа расчета пропульсивных характеристик судов: приближенный качественный расчет, моделирование судов в открытых бассейнах и автоматическое проектирование с использованием САПР. Первые этапы обычно выполняются для новых типов судов, а последний этап является уточняющим с использованием существующих библиотек типов судов и режимов их применения.

Влияние механических ВРК на тяговые характеристики судов проявляется главным образом в повышении КПД, маневренности и корректировке дополнительных и общих сопротивлений движению судна, что требует расширения возможностей САПР. Электрические ВРК являются более совершенными за счет постоянства режима работы высокооборотного генератора, замены редуктора на ПЧ и требуют дополнительного рассмотрения.

Литература

1. Шульга Р. Н. Рынок силовой электроники (динамика и основные тенденции) // Энергия единой сети. 2021. № 5, 6.
2. Шульга Р. Н., Петров А. Ю., Лабути А. А. Рынок электрических машин и аппаратов: динамика и основные тенденции. РУМ, 4 [594], 2020.
3. Kazmierkowski M. P., Franquelo L. G., Rodríguez J., Perez M. A., Leon J. I. High-Performance Motor Drives // IEEE Industrial Electronics. 2011. Vol. 5. No. 3.

4. Blaschke F. The principle of field-orientation as applied to the transvector closed loop control system for rotating-field machines // Siemens Rev. 1972. Vol. 34. No. 1.
5. Горячев А. М., Подругин Е. М. Устройство и основы теории морских судов. М.: Судостроение, 1983.
6. Иванченко А. А., Шишкин В. А., Окунев В. Н. Обзор опыта совершенствования конструкций и применения движительных систем в современном судостроении // Вестник ГУМРФ им. С. О. Макарова. 2016. №4 (28).
7. Шульга Р. Н., Петров А. Ю., Хренников А. Ю. Энергетические платформы с использованием цифровых модульных подстанций и энергоблоков // Энергия единой сети. 2020. № 3.
8. Шульга Р. Н. Применение распределенного электродвижения с использованием винторулевых колонок // Энергоэффективность и водоподготовка. 2020. № 4.
9. Сахновский Б. М. Модели судов новых типов. М.: Судостроение, 1987.
10. Шульга Р. Н., Смирнова Т. С. Использование судовой энергетики для жизнеобеспечения арктических объектов // Российская Арктика. 2020. № 1.
11. Шульга Р. Н., Путилова И. В., Смирнова Т. С., Иванова Н. С. Безопасные и безотходные технологии с использованием водородной электроэнергетики. Альтернативная электроэнергетика и экология (ISJAEE). 2019.
12. Report of the performance committee ITTC. 1978.
13. Цуренко Ю. И. Автоматизация проектирования пропульсивного комплекса. Учебн. пос. Северодвинск, 2009.

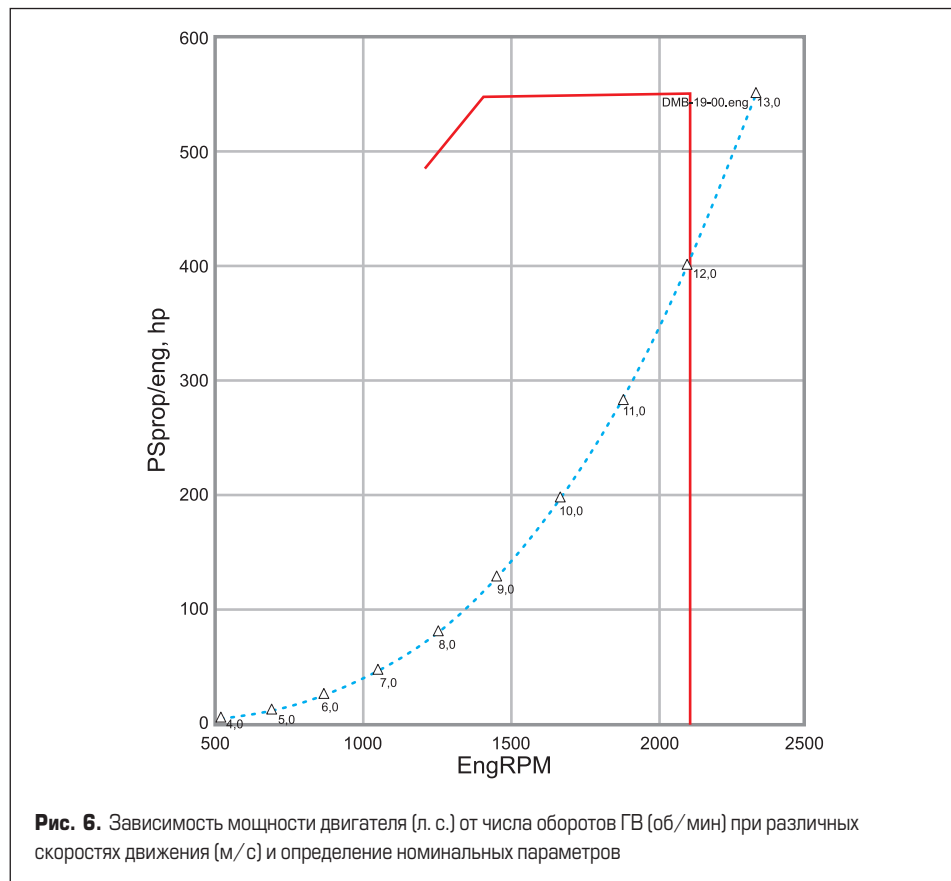


Рис. 6. Зависимость мощности двигателя (л.с.) от числа оборотов ГВ (об/мин) при различных скоростях движения (м/с) и определение номинальных параметров