

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кулинич Андрей Иванович — аспирант.
Научный руководитель:
Устинов Юрий Матвеевич.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
kaf_tsn@gumrf.ru
Припотнюк Андрей Владимирович —
инструктор МУТЦ, методист направления ГМССБ.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
apripotnyuk@mts.spb.su
Устинов Юрий Матвеевич —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
kaf_tsn@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kulinich Andrey Ivanovich — postgraduate.
Supervisor:
Ustinov Yury Matveevich.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
kaf_tsn@gumrf.ru
Pripotnyuk Andrey Vladimirovich —
instructor of Makarov training centre.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
apripotnyuk@mts.spb.su
Ustinov Yury Matveevich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
kaf_tsn@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 25 августа 2016 г.

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-172-184
УДК: 621.316:629.12.06.001.4

**В. А. Малышев,
В. С. Иванов,
В. С. Соловей**

РАСЧЕТ И ВЫБОР ТОРМОЗНЫХ РЕЗИСТОРОВ ГРЕБНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ТАНКЕРА ЛЕДОВОГО КЛАССА

В статье рассмотрена единая электроэнергетическая система танкера ледового класса, в состав которой входит гребная электрическая установка переменного тока с преобразователями частоты с промежуточным звеном постоянного тока и гребными синхронными электродвигателями. Танкер снабжен двумя винторулевыми колонками типа Azipod. Представлены схемы главного тока и системы автоматического управления гребной электрической установки в режимах стабилизации частоты вращения и мощности гребного электродвигателя. Рассмотрена топология модульного преобразователя частоты среднего напряжения ACS 6000 концерна AAB, использующего мощные полупроводниковые ключи (IGCT — запираемый тиристор с интегрированным блоком управления). Их использование позволяет получить менее сложный, более эффективный и надежный привод среднего напряжения с уменьшением расходов на эксплуатацию и обслуживание. Рассмотрен алгоритм прямого управления моментом синхронного гребного электродвигателя, основными достоинствами которого, по сравнению с векторным управлением, являются более простая программная реализация и обеспечение большего быстродействия. Рассмотрены способы торможения танкера: без реверса гребного электродвигателя посредством разворота винторулевой колонки и с реверсом гребного электродвигателя. Первый способ является более целесообразным с точки зрения требуемой мощности тормозных резисторов. Для перераспределения тормозной энергии перспективным направлением является исполнение единой электроэнергетической системы танкера ледового класса на базе сети постоянного тока. В статье произведен расчет и выбор тормозных резисторов преобразователя частоты гребной электрической установки танкера ледового класса при торможении судна посредством разворота винторулевой колонки.

Ключевые слова: гребная электрическая установка, преобразователь частоты со звеном постоянного тока, синхронный гребной электродвигатель, система автоматического управления, тормозные режимы, тормозные резисторы.

Введение

Танкер ледового класса предназначен для перевозки нефти с морской ледостойкой нефтедобывающей платформы на перегрузочный терминал [1], [2]. По оценкам западных экспертов, это судно нового поколения признается одним из самых сложных в техническом отношении продуктов современного кораблестроения. При проектировании танкера была реализована концепция судна двойного действия (Double Acting Ship) финской компании «Aker Arctic Technology». В открытой воде судно перемещается носовой частью вперед, а во льду — кормой вперед. Танкер оснащен двумя движителями типа Azipod (поворотный на 360 ° электроприводной винторулевой комплекс) общей суммарной мощностью 17 МВт, спутниковой системой динамического позиционирования при швартовке к платформе. Форма кормовой оконечности и конструктивная прочность ледового пояса судна обеспечивают возможность работы танкера без сопровождения ледоколов в зимнее время во льдах толщиной до 1,2 м.

Схемы главного тока и системы автоматического управления гребной электрической установки танкера ледового класса

На танкере применена единая электроэнергетическая система (ЕЭЭС) переменного тока, осуществляющая питание гребной электрической установки (ГЭУ) переменного-переменного тока и отбор мощности для питания общесудовых электропотребителей от шин электродвижения. Это повышает общий коэффициент полезного действия установки и позволяет сократить число вспомогательных генераторов. Сеть высокого напряжения (6,6 кВ) челночного танкера ледового класса разделена между двумя главными распределительными щитами, каждый из которых имеет собственную измерительную секцию.

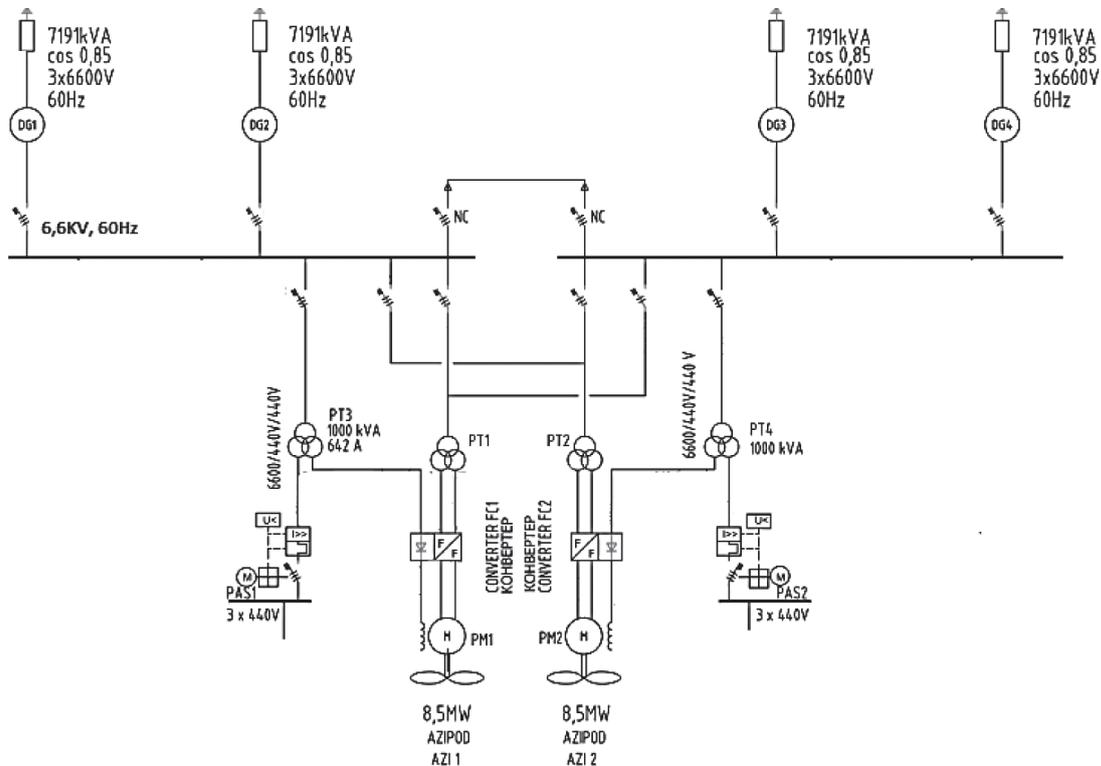


Рис. 1. Схема главного тока

В состав ЕЭЭС входят четыре главных дизельных двигателя Wärtsilä 9L38, каждый номинальной мощностью 6525 кВт, 600 об/мин, главные генераторы фирмы АВВ на 7190 кВ·А (5752 кВт при $\cos \varphi = 0,85$). Генераторы подключены к главным распределительным щитам (6,6 кВ/60 Гц). Преобразователи частоты инверторного типа подключены к главным распределительным

тельным шинам через трехобмоточные трансформаторы с вторичным напряжением 1744 В. Используются гребные синхронные электродвигатели (ГЭД) с электромагнитным возбуждением в составе системы Azipod.

При использовании частотно-регулируемой ГЭУ гребные синхронные двигатели наиболее эффективны [3], как показал опыт эксплуатации атомных ледоколов типа «Таймыр» [4]. Синхронный ГЭД имеет ряд преимуществ перед асинхронным ГЭД:

- более высокий КПД;
- возможность регулирования $\cos \varphi$;
- у синхронного двигателя при тех же частотах питающего напряжения критический момент может быть больше, чем у асинхронного, следовательно, перегрузочная способность у него выше;
- воздушный зазор между статором и ротором у синхронного ГЭД значительно больше, что должно учитываться при проектировании судов ледового класса, так как вероятность повреждения обмотки двигателя при повышенной вибрации во время хода судна во льдах меньше.

Оборудование постов управления включает рукоятки курсового угла на центральном пульте и на обоих боковых пультах мостика. При этом предусматривается как раздельная, так и совместная работа гондол. Кроме того, система рулевого управления может управляться авторулевым. Система автоматического управления ГЭД танкера осуществляет регулирование по мощности и по частоте вращения в зависимости от заданного режима работы и положения поста управления.

В схеме регулирования частоты вращения уставкой регулятора скорости является результирующий сигнал при последовательном прохождении блока задания скорости, фильтра и задатчика интенсивности. Регулятор скорости представляет собой ПИ-регулятор, выходной сигнал которого определяет текущую частоту вращения гребного винта. Выходной сигнал регулятора ограничивается при достижении предельных значений ряда параметров системы. Выходной сигнал регулятора подается в качестве задания крутящего момента непосредственно на преобразователь частоты. Схема регулирования скорости представлена на рис. 2.

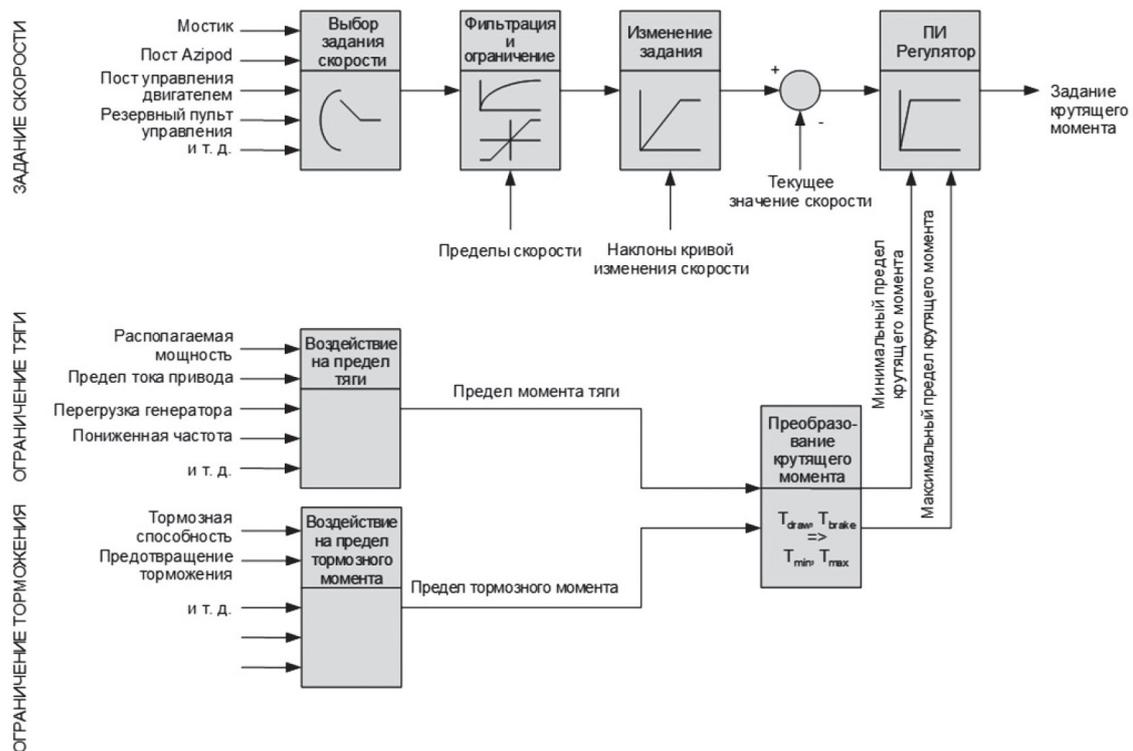


Рис. 2. Схема регулирования скорости ГЭД

Схема регулирования мощности отличается от схемы регулирования скорости тем, что заданием для регулятора мощности является задание мощности, а функция управления представ-

ляет собой функцию деления вместо ПИ-регулятора. Окончательное задание мощности делится на текущую скорость, чтобы получить в результате задание крутящего момента. Задание крутящего момента ограничивается, как и в случае регулирования скорости, и подается в преобразователь частоты. Схема регулирования мощности представлена на рис. 3.

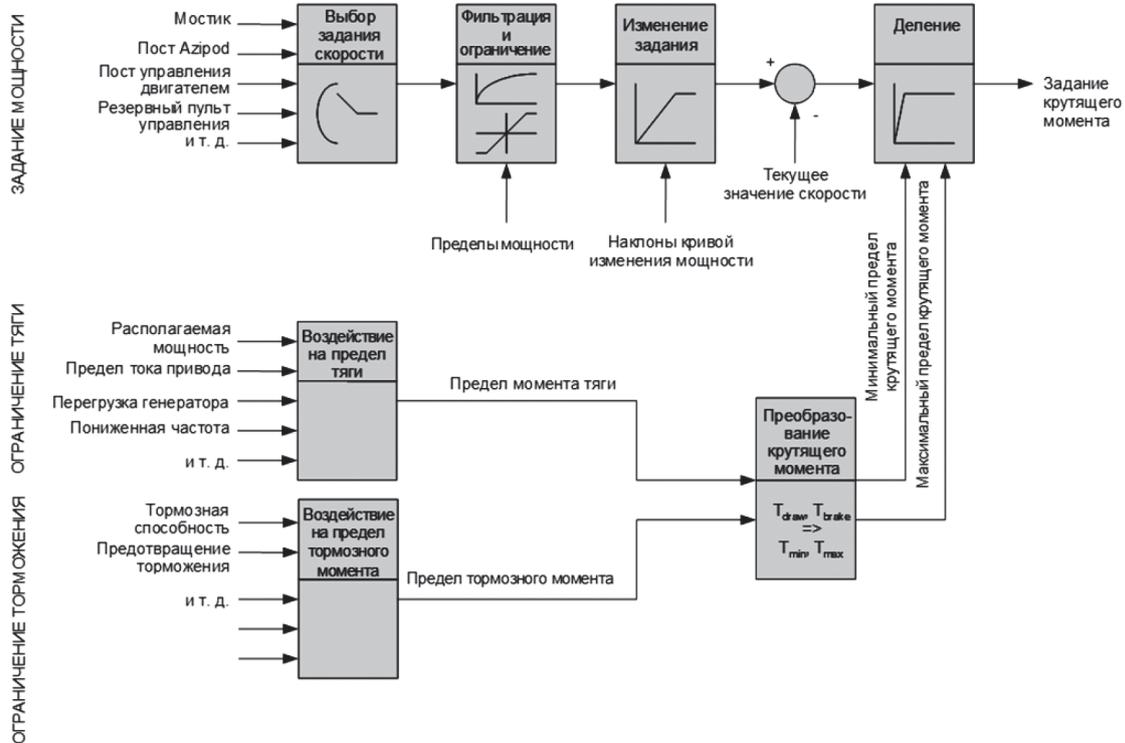


Рис. 3. Схема регулирования мощности ГЭД

В период разгона гребного двигателя и хода при малых мощностях, когда мощность гребного электрического двигателя не превышает 10 % от номинального значения, осуществляется принцип управления с регулированием скорости, при дальнейшем увеличении мощности система автоматически переходит на управления с регулированием мощности. Зависимость частоты вращения и мощности от выставленного уровня задающего устройства (рукоятка поста управления) приведена на рис. 4.

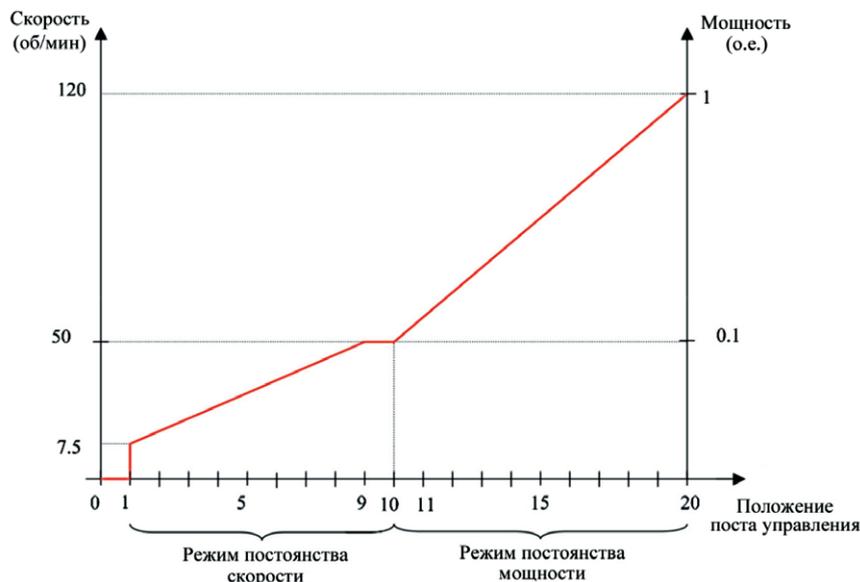


Рис. 4. Зависимость частоты вращения и мощности ГЭД от положения рукоятки поста управления

Прямое управление моментом гребного синхронного электродвигателя танкера ледового класса

На танкере ледового класса используется преобразователь частоты (ПЧ) со звеном постоянного тока фирмы АВВ АСS 6000 [5]. АСS 6000 имеет модульную конструкцию на основе стандартных блоков (рис. 5). Автономный инвертор напряжения (АИН) и активный выпрямитель (АВ) выполняются на базе силовых полупроводниковых приборов IGCT (запираемый тиристор с интегрированным блоком управления) высокой мощности. Это позволяет упростить топологию АИН и АВ за счет минимизации полупроводниковых ключей. Благодаря низким общим собственным потерям, тиристоры IGCT не требуют интенсивного охлаждения и тем самым позволяют использовать сравнительно маломощное охлаждающее оборудование.

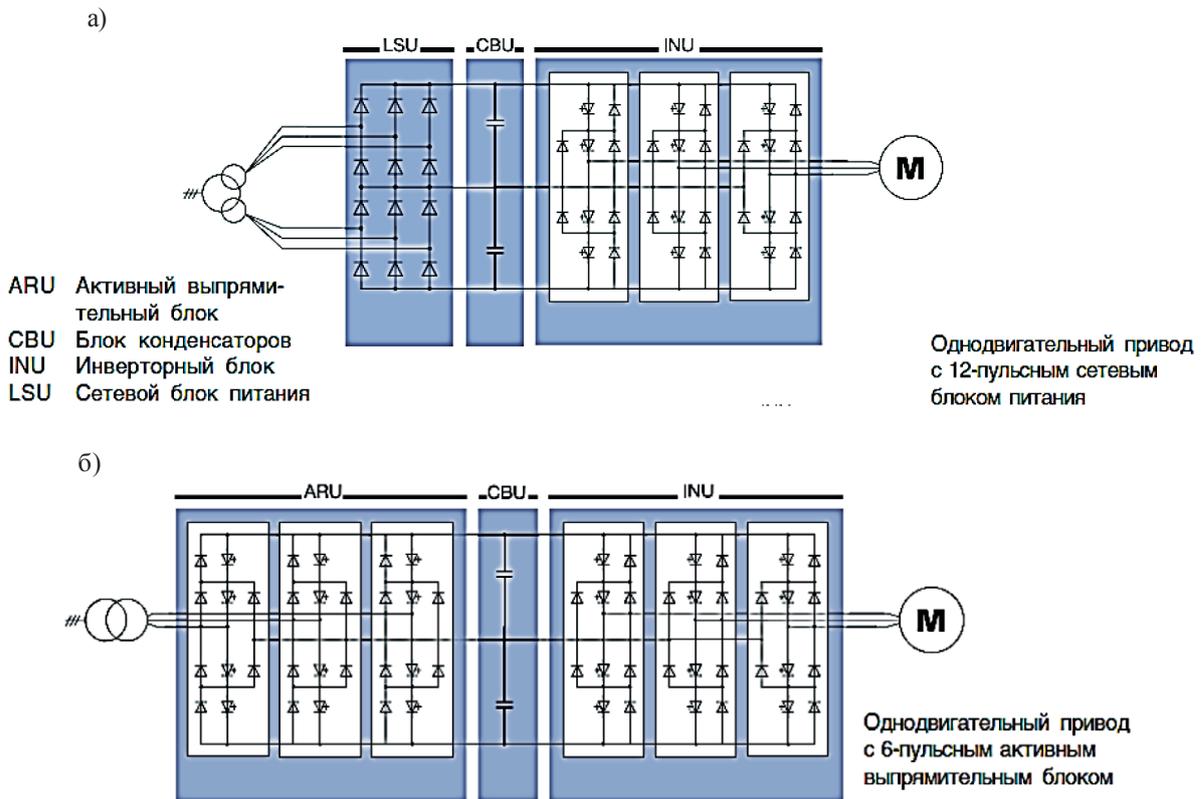


Рис. 5. Базовые блоки ПЧ (ACS 6000) с неуправляемым выпрямителем (а) и активным выпрямителем (б)

В качестве способа частотного управления синхронным ГЭД используется прямое управление моментом (Direct Torque Control — *DTC*) [6] – [8]. Задачей прямого управления моментом является обеспечение быстрой реакции электромагнитного момента на управляющее и возмущающее воздействия. Исключительно быстрая реакция привода АСS 6000 на единичный скачок момента сопротивления позволяет легко справиться с ситуациями потери питания и стабилизации нагрузки, что очень важно для автономной энергетической системы танкера, работающего во льдах. В отличие от векторного управления, где изменение момента производится путем воздействия на ток статора, который, таким образом, является управляемой величиной, в системе с прямым управлением моментом управляемой величиной является потокосцепление статора. Изменение потокосцепления достигается путем оптимального переключения ключей инвертора напряжения, от которого питается гребной синхронный электродвигатель. Метод *DTC* не требует координатных преобразований и широтно-импульсной модуляции, при этом обеспечиваются наименьшие коммутационные потери. На рис. 6 представлена функциональная схема системы управления *DTC*.

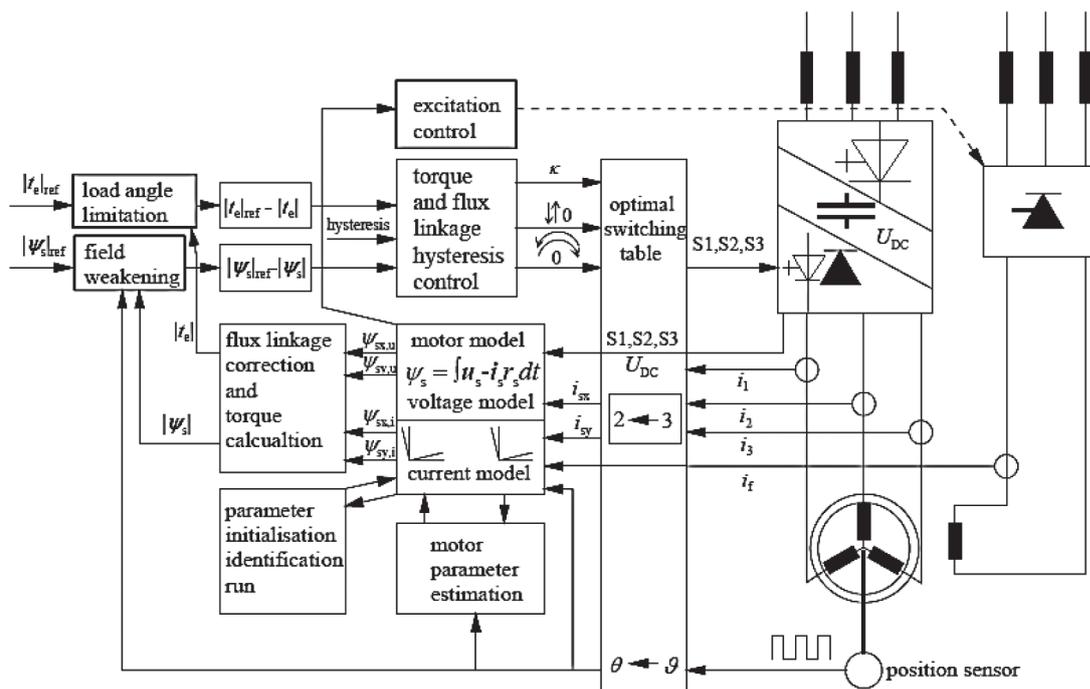


Рис. 6. Функциональная схема управления синхронным двигателем

Алгоритм работы системы *DTC* реализуется следующим образом. Вначале определяется вектор потокосцепления статора ψ_s и электромагнитный момент синхронного двигателя M_s (на рис. 6 — t_e). Затем модуль вектора потокосцепления статора и момент сравниваются с заданными значениями ($|\psi_s|_{ref} - |\psi_s|$ и $|t_e|_{ref} - |t_e|$), после чего с помощью компараторов, называемых *релейными регуляторами*, формируются логические сигналы ошибки (0 или 1). На основании этих сигналов и знания положения вектора потокосцепления на плоскости базовых векторов, выбирается такая комбинация состояний ключей инвертора, при которой будет сформирован базовый вектор напряжения, минимизирующий отклонение потокосцепления статора и электромагнитного момента от заданных значений. Таким образом, в результате работы системы модуль потокосцепления статора и электромагнитный момент будут постоянно находиться в зоне допустимого отклонения от заданного значения, определяемого величиной гистерезиса соответствующего регулятора. Выбор базового вектора зависит от сектора, в котором в данный момент находится вектор ψ_s , и осуществляется с помощью переключающей таблицы (*Optimal Switching Table*). Переключающая таблица состоит из оцифрованных сигналов рассогласования по потоку (1 – 0), моменту (1 – 0 – 1) и информации, в каком секторе системы координат, связанной со статором, находится вектор потока статора синхронного двигателя. Выбор оптимального вектора напряжения производится из восьми возможных базовых векторов напряжения.

Главными управляющими блоками являются: релейный блок с гистерезисом для управления крутящим моментом и потокосцеплением, блок с таблицей оптимальной коммутации, модель расчета фактических значений потокосцепления статора и момента двигателя, регулятор потокосцепления для ослабления поля, ограничитель угла нагрузки для удержания привода в стабильной рабочей зоне, блок контроля возбуждения. Блок контроля возбуждения осуществляет контроль коэффициента мощности при быстро изменяющихся нагрузках с целью повышения устойчивости привода [9].

На функциональной схеме показаны:

- $\psi_{sx,u}, \psi_{sy,u}$ — составляющие потокосцепления статора в модели напряжения в xu -координатах;
- $\psi_{sx,i}, \psi_{sy,i}$ — составляющая потокосцепления статора в модели тока в xu -координатах;

- i_{sx}, i_{sy} — составляющие тока статора в xu -координатах;
- i_f — ток возбуждения ротора.

Тормозные режимы винторулевого комплекса Azipod танкера ледового класса

Торможение судна с системой Azipod может осуществляться двумя способами:

- реверсированием гребного электрического двигателя (10 – 20 с);
- разворотом винторулевой колонки (ВРК) на 180°.

Для преобразователей частоты с неуправляемым выпрямителем на входе при рассмотрении вопроса торможения и реверса судна нужно учитывать, что энергия, возвращаемая в сеть двигателем, может гаситься только на тормозном резисторе, так как её передача в судовую сеть для использования не представляется возможной.

Необходимо учитывать недостатки и достоинства того или иного способа торможения. В том случае, когда реверсируется ГЭД, необходимо рассеивать значительную тормозную энергию в мощных тормозных резисторах или осуществлять её рекуперацию в питающую сеть. При этом мощность привода поворота ВРК будет меньше, чем при втором способе торможения судна.

В [10] показано, что торможение ГЭУ с применением тормозных резисторов может быть использовано в качестве основного способа на судах с прямой передачей вращающего момента на винт. На судах с винто-рулевыми колонками этот вид торможения целесообразно применять при остановке ГЭД, а торможение и реверс судна осуществлять разворотом винто-рулевых колонок. Разворот Azipod на 180° занимает 20 – 25 с.

Вся энергия при торможении ГЭД рассеивается в виде тепла в блоке тормозных резисторов. При этом возможно использовать перераспределение энергии торможения через соединенные коммутирующими цепями звенья постоянного тока (ЗПТ) инверторных преобразователей частоты гребных электродвигателей [11]. Оптимизацию параметров режима реверса ГЭД по критерию минимизации времени реверса и ограничениями по обеспечению управляемости судна и качества электроэнергии в электроэнергетической системе предлагается организовать с помощью интеллектуального управления рекуперативной энергии при торможении на основе предсказательного моделирования.

Однако среди достоинств данного способа есть существенный недостаток. Для выравнивания токов при объединении цепей постоянного тока преобразователей частоты, систему необходимо дополнить коммутационной аппаратурой, уравнительными соединениями и ключами со сложным алгоритмом включения и выключения ЗПТ каждого гребного электропривода. Поэтому перспективным направлением по оптимизации тормозных режимов является использование ЕЭЭС с общей шиной постоянного тока [12], [13].

Для оценки работы тормозных резисторов рассмотрим характеристики гребного винта и часть механической характеристики ГЭД, формируемой системой управления $P = \text{const}$ (рис. 7).

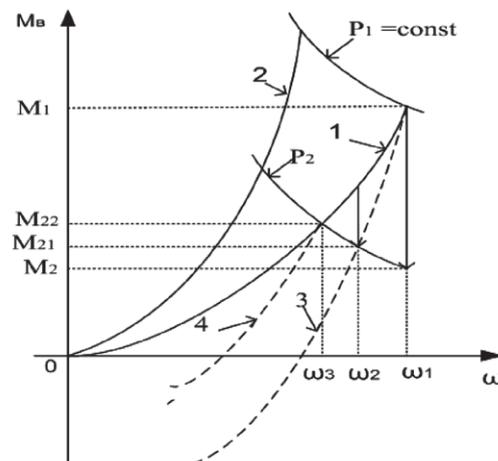


Рис. 7. Винтовые и механические характеристики ГЭД

Кривые 1 и 2 соответствуют характеристике хода в свободной воде и швартовой характеристике. Кривые 3 и 4 — реверсивные характеристики для различной скорости хода судна V_1 и V_2 , причем $V_1 > V_2$.

Допустим, что торможение винта начинается в исходной точке с параметрами M_1 и ω_1 , что соответствует мощности ГЭД P_1 . Оператор (судоводитель) системой Azipod переходит в режим работы судна с меньшим значением мощности P_2 , и по окончании переходного процесса частота вращения достигнет значения ω_3 , а момент вращения — M_{22} .

Частота вращения винта с ω_1 до ω_3 мгновенно измениться не может, поэтому в первый момент времени возникает разность момента сопротивления M_1 и момента вращения M_2 $\Delta M = M_2 - M_1$, которая создает мощность торможения $P_t = \Delta M \omega_1$. Эта мощность имеет отрицательный знак. Под действием тормозного момента частота вращения винта быстро уменьшается до ω_2 в соответствии с реверсивной характеристикой 3. В этой точке торможение замедляется, поскольку гребной винт начинает подкручиваться под действием кинетической энергии вращающихся на гребном валу масс и потока воды при движении судна. Торможение судна — значительно более инерционный процесс, чем торможение винта. Поэтому переход на новое значение мощности P_2 заканчивается тогда, когда судно уменьшит скорость хода до значения, соответствующего реверсивной характеристике 4.

В синхронном двигателе с преобразователем частоты со звеном постоянного тока при изменении знака мощности двигателя P_t изменяется и направление тока в звене постоянного тока I_d . Первоначально это приводит к заряду конденсатора C током I_d . Напряжение на конденсаторе U_d растет, но оно не должно превысить допустимых значений. В связи с этим основная часть энергии торможения передается на тормозные резисторы R_t , которые управляются тиристорным ключом VS_t (рис. 8).

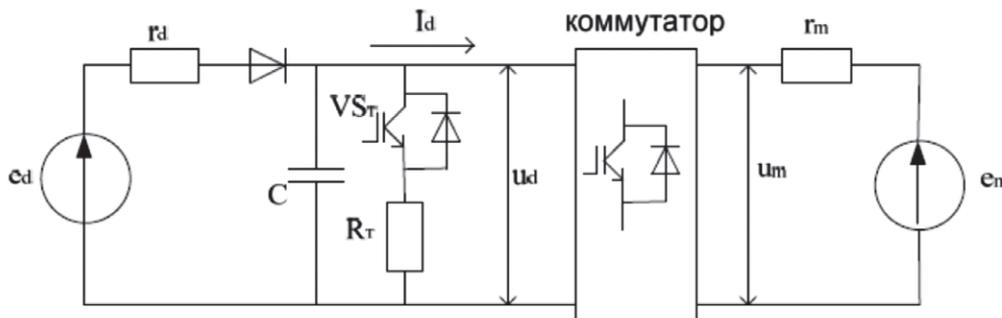


Рис. 8. Расчетная схема гребного электропривода при торможении судна:

e_d и e_m — ЭДС выпрямителя и ЭДС вращения ГЭД;

u_d и u_m — напряжение на выходе выпрямителя и напряжение на статорной обмотке двигателя;

r_d и r_m — внутреннее сопротивление выпрямителя и сопротивление статорной обмотки двигателя;

C — конденсатор в звене постоянного тока; R_t — тормозной резистор;

VS_t — транзисторный ключ, управляющий тормозным резистором

Система управления ключом построена по сигналу напряжения в звене постоянного тока U_d . Обратная связь по напряжению на конденсаторе является основной, чтобы не допустить значительных заряд-разрядных токов конденсатора. Интенсивность торможения определяется энергией торможения ГЭД, которая зависит от скорости хода судна, частоты вращения винта, интенсивности изменения режимов работы судна судоводителем.

Момент ΔM и мощность торможения P_t относительно невелики, поэтому интенсивность торможения винта меньше $\left(J \frac{dn}{dt} = \Delta M \right)$, чем в случае торможения винта путем задания отрицательного момента вращения.

Произведем расчёт тормозного резистора при известных параметрах ГЭД, учитывая что часть энергии томожения будет рассеиваться в конденсаторной батарее при ее заряде [14], [15]:

- приведенный момент инерции $J = 19100 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$;
- масса ротора — 69000 кг;
- частота вращения номинальная $n = 97 \text{ об/мин}$;
- момент вращения $M_{\text{ном}} = 837 \text{ кН}\cdot\text{м}$.

Определим значение энергии торможения при условии изменения частоты вращения от 140 об/мин (n_{max}) до 74 об/мин.

Значение кинетической энергии на валу гребного двигателя

$$W = \frac{J \cdot \omega^2}{2}.$$

Значение энергии заряженного конденсатора

$$W = \frac{C \cdot U^2}{2}.$$

Изменение энергии системы, при её переходе со 140 об/мин на 74 об/мин, будет составлять

$$\Delta W_m = J \cdot \left(\frac{\omega_1^2}{2} - \frac{\omega_2^2}{2} \right).$$

Изменение энергии на конденсаторе

$$\Delta W_c = C \cdot \left(\frac{U_1^2}{2} - \frac{U_2^2}{2} \right).$$

Изменение энергии системы при переводе в рад/с

$$\Delta W_m = 19100 \cdot \left(\frac{14,66^2}{2} - \frac{7,749^2}{2} \right) = 1478995,12 \text{ Дж} \approx 1,5 \text{ МДж}.$$

Определим значение энергии, которая пойдёт на заряд конденсаторной батареи. В схеме ПЧ используется два конденсатора, каждый емкостью по 1,6 мФ. Напряжение на конденсаторе при $n = 140 \text{ об/мин}$ равно 3000 В, предельное напряжение на конденсаторе должно быть не более 10 % от номинального (3300 В), следовательно,

$$\Delta W_c = 0,0032 \cdot \left(\frac{3300^2}{2} - \frac{3000^2}{2} \right) = 3024 \text{ Дж}.$$

В схеме ПЧ установлено два резистора. При выборе тормозного резистора надо определить его параметры (сопротивление, предельную силу тока, мощность рассеивания), также нужно учесть исполнение оболочек, габариты и возможность установки в блоке ACS 6000. В таблице приведены возможные материалы, из которых могут быть изготовлены тормозные резисторы. Для изготовления резисторов применяются сплавы из различных материалов: меди, никеля, стали, марганца, хрома, алюминия, а также чугуна.

Характеристики материалов тормозных резисторов

Наименование и состав	Удельное электрическое сопротивление при 20 °С, $10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$	Максимальная рабочая температура, °С	Температурный коэффициент сопротивления (ТКС), $10^{-5}\cdot\text{К}^{-1}$
Манганин МНЦ3-12 (Cu, Mn, Ni)	43	300	4
Константан МНМц 401.5 (Cu, Ni, Mn)	50	500	3
Нейзильбер МНЦ 15-20 (Cu, Ni, Zn)	32	200	36

(Окончание)

Нихром X15H60 (Ni, Cr, Fe)	107	1100	17
Фехраль X27Ю5Т (Cr, Fe, Al, Ti)	120	1350	10
Жаростойкий сплав X20H80 (Ni, Cr, Fe)	140	1200	8
Чугун (Fe, C)	80	400	100
Сталь (проволока)	17	300	600
Сталь листовая электротехническая (Fe, Si)	30	200	200

С учетом максимальной рабочей температуры, выбирается тормозной резистор с большой рассеиваемой мощностью серии CNS из NiCrMo. На рис. 9 приведена схема соединения тормозных резисторов.

Power Circuit

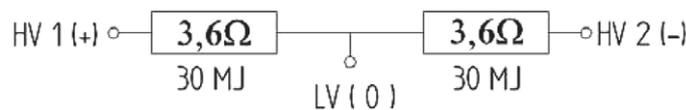


Рис. 9. Принципиальная схема соединения тормозных резисторов (силовой контур)

Силовой тормозной контур (Power Circuit) состоит из двух последовательно соединенных резисторов, подключенных к нейтральной точке $LV(0)$.

Характеристики резистора серии CNS:

- охлаждение — естественное воздушное;
- материал — NiCrMn;
- изменение сопротивления от 20 °С до 550 °С — 9 %;
- значение сопротивления при 20 °С — $2 \cdot 3,6$ Ом;
- значение сопротивления при 550 °С — $2 \cdot 3,9$ Ом;
- максимальная сила тока — 1000 А;
- рабочий цикл — 20 с каждые 30 мин;
- максимальная кратковременная мощность в течение 20 с — $2 \cdot 1500$ кВт, рассеиваемая мощность — 60 МДж;

– номинальное напряжение — 2,8 кВ постоянного тока (максимальное напряжение — 3,2 кВ).

Значение энергии, идущей на нагрев резистора:

$$\Delta W_m - \Delta W_c = W;$$

$$W = 1478995,12 - 3024 = 1475971,12 \text{ Вт} \cdot \text{с};$$

$$W = 73,798 \text{ кВт на } 20 \text{ с.}$$

Эта энергия выделится в виде тепла

$$W = Q.$$

В соответствии с законом Джоуля–Ленца:

$$Q = I^2 Rt.$$

Определим значение тормозного тока

$$I = \sqrt{\frac{Q}{tR}} = \sqrt{\frac{1475971,12}{20 \cdot 3,6 \cdot 2}} = 101,24 \text{ А.}$$

В случае торможения судна посредством реверсирования ГЭД, он переходит в режим гидротурбины за счет подкручивающего потока воды и реализует необходимую рекуперативную мощность. Оценим значение энергии рекуперации:

- водоизмещение судна 94858,6 т;
- скорость судна 16 уз (8,23 м/с).

Значение кинетической энергии движущегося судна

$$W_{\text{судно}} = \frac{m_A \cdot v_c^2}{2} = \frac{94858600 \cdot 8,23^2}{2} = 3212,5 \text{ МДж.}$$

Часть этой энергии пойдет на подкручивание гребного винта.

Выводы

1. Построение единой электроэнергетической системы танкера ледового класса на базе сети постоянного тока упростит алгоритм торможения гребных электродвигателей. При этом энергия торможения, генерируемая в одном гребном электродвигателе, может передаваться на другие инверторы по общей шине постоянного тока без потребления энергии из сети питания.

2. Использование частотного способа управления синхронным ГЭД в виде прямого управления моментом (DTC) позволяет обеспечить высокое быстродействие и точность реализации как двигательных, так и тормозных режимов ГЭУ танкера ледового класса.

3. Расчет и выбор тормозных резисторов для судна с винторулевым комплексом типа Azipod зависит от способа торможения судна. Целесообразно производить расчет и выбор тормозных резисторов для режима торможения ГЭД без учета его реверса. При этом значительно уменьшается мощность рассеивания, масса и габариты тормозных резисторов.

4. В случае реверса судна посредством разворота Azipod на 180° при ходе судна в свободной воде необходимо учитывать повышенные нагрузки при расчете мощности привода поворота Azipod.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fifth Arctic Shuttle Tanker Launched // Arctic Passion News. — 2010. — № 1. — Pp. 8–9.
2. Ямщиков Д. «Приразломная»: первый опыт нефтедобычи на арктическом шельфе / Д. Ямщиков // Безопасность объектов ТЭК. — 2013. — № 2. — С. 54–57.
3. Бакшанов А. А. К выбору гребных электродвигателей для ледоколов / А. А. Бакшанов, В. В. Романовский // Материалы науч.-практ. конф., посвященной 150-летию со дня рождения академика А. Н. Крылова. — СПб., 2013. — С. 116–122.
4. Быков А. С. ГЭУ атомных ледоколов / А. С. Быков, В. В. Башаев, В. А. Малышев, В. В. Романовский. — СПб.: Элмор, 2004. — 320 с.
5. Привод переменного тока среднего напряжения ACS 6000, 3-27 МВ, 6,0 – 6,9 кВ. Технический каталог. — Корпорация АВВ, 2004. — 15 с.
6. Иванов В. С. Анализ систем автоматического управления судовым асинхронным электроприводом / В. С. Иванов, Л. О. Саловский, Б. В. Шняк // Эксплуатация морского транспорта. — 2007. — № 1. — С. 50–51.
7. Merzoug M. S. Comparison of field-oriented control and direct torque control for permanent magnet synchronous motor (pmsm) / M. S. Merzoug, F. Naceri // Proceedings of world academy of science, engineering and technology. — 2008. — Vol. 35. — Pp. 299–304.
8. Романовский В. В. Электрооборудование морских комплексов: монография / В. В. Романовский, В. Н. Куракин, В. С. Иванов. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2013. — 244 с.

9. *Pyrhönen O.* Analysis and Control of Excitation, Field Weakening and Stability in Direct Torque Controlled Electrically Excited Synchronous Motor Drives: Research papers / O. Pyrhönen. — Lappeenranta: Lappeenranta University of Technology, 1998. — 117 p.

10. *Григорьев А. В.* Анализ тормозных режимов гребных электрических установок / А. В. Григорьев, А. С. Быков // Эксплуатация морского транспорта. — 2010. — № 3. — С. 62–66.

11. *Иванова М. К.* Моделирование режимов реверса ледокола проекта 22220 / М. К. Иванова, И. М. Калинин, В. С. Соловей // Конференция молодых ученых и специалистов 2015: тезисы докладов. — СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2015. — С. 52–54.

12. *Иванов В. С.* Судовой частотно-регулируемый многодвигательный привод / В. С. Иванов, В. С. Соловей // Морское образование: традиции, реалии и перспективы: материалы науч.-практ. конф. 31 марта 2015 г. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. — Т. 2. — С. 67–71.

13. *Иванова М. К.* Новые принципы управления торможением судовых гребных электродвигателей / М. К. Иванова, И. М. Калинин, В. С. Соловей // Международная конференция по судостроению и океанотехнике 2016: тез. докладов. — СПб.: Изд-во ГМТУ, 2016. — С. 45–46.

14. *Хорошенький А. В.* Торможение судна с винторулевыми колонками / А. В. Хорошенький // Материалы VII межвуз. науч.-практ. конф. аспирантов, студентов и курсантов «Современные тенденции развития водного транспорта России». — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2016. — С. 202–205.

15. *Андронников Д.* Особенности выбора и применения резисторов в силовой технике / Д. Андронников // Силовая электроника. — 2007. — № 12. — С. 4–8.

CALCULATION AND SELECTION OF BRAKE RESISTORS, ELECTRIC PROPELLER THE INSTALLATION OF THE TANKER

In the article the unified power system of the tanker of an ice class, which includes rowing electrical installation AC-AC frequency converters with an intermediate DC link and the propeller synchronous motors is considered. The tanker is equipped with two azimuth columns of type Azipod. The schemes of the main current and automatic control system electric propeller installation in the modes of stabilization of frequency of rotation and capacity of the propeller of the motor are presented. Considered the topology of the modular frequency Converter medium voltage ACS 6000 concern AAB using high-power semiconductor keys (IGCT – lockable thyristors with integrated control unit). Their use allows to obtain a less complex, more efficient and reliable medium voltage drive with reduction of costs of operation and maintenance. The algorithm for direct torque control of synchronous propeller of the motor, the main advantages of which in comparison with vector control is easier to program implementation and ensuring greater performance is considered. The methods of the deceleration of the tanker, without reversing the propeller of the motor by reversal azimuth column and reverse propeller of the motor are considered. The first method is more appropriate from the point of view of the required power of the brake resistors. For redistribution of braking energy, a promising direction is the implementation of the unified power system of the tanker of an ice class on the basis of the DC network. The article made the calculation and selection of the brake resistors of the frequency Converter of rowing electrical installations of tankers ice-class when braking of a ship by reversal azimuth column.

Keywords: propulsion electrical system, frequency converter with DC link, a synchronous propeller motor, automatic control system, the braking modes, braking resistors.

REFERENCES

1. “Fifth Arctic Shuttle Tanker Launched.” *Arctic Passion News* 1 (2010): 8–9.
2. Yamshchikov, D. “«Prirazlomnaya»: pervyj opyt neftedobychi na arkticheskom shelfe.” *Bezopasnost obektov TEHK* 2 (2013): 54–57.
3. Bakshanov, A. A., and V. V. Romanovskij. “K vyboru grebnyh ehlektrodvigatelyj dlya ledokolov.” *Materialy nauch.-prakt.konf., posvyashchennoj 150-letiyu so dnya rozhdeniya akademika A.N. Krylova*. SPb, 2013: 116–122.
4. Bykov, A. S., V. V. Bashaev, V. A. Malyshev, and V. V. Romanovskij. *GEHU atomnyh ledokolov*. EHMor, 2004.
5. *Privod peremennogo toka srednego napryazheniya ACS 6000, 3-27 MV, 6,0 – 6,9 kV. Tekhnicheskij katalog*. «ABB», 2004.

6. Ivanov, V. S., L. O. Salovskij, and B. V. Shnyak. "Analiz sistem avtomaticheskogo upravleniya sudovym asinhronnym ehlektroprivodom." *Jekspluatacija morskogo transporta* 1 (2007): 50–51.
7. Merzoug, M. S., and F. Naceri. "Comparison of field-oriented control and direct torque control for permanent magnet synchronous motor (pmsm)." *Proceedings of world academy of science, engineering and technology* 35 (2008): 299–304.
8. Romanovskij, V. V., V. N. Kurakin, and V. S. Ivanov. *Elektrooborudovanie morskikh kompleksov*. SPb.: GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2013.
9. Pyrhönen, O. Analysis and Control of Excitation, Field Weakening and Stability in Direct Torque Controlled Electrically Excited Synchronous Motor Drives. Research papers. Lappeenranta: Lappeenranta University of Technology, 1998.
10. Grigoryev, A. V., and A. S. Bikov. "Analysis of braking modes of electric propulsion plants." *Jekspluatacija morskogo transporta* 3 (2010): 62–66.
11. Ivanova, M. K., I. M. Kalinin, and V. S. Solovej. "Modelirovanie rezhimov reversa ledokola proekta 22220." *Konferenciya molodyh uchenyh i specialistov 2015. Tezisy dokladov*. SPb.: FGUP «Krylovskij gosudarstvennyj nauchnyj centr», 2015: 52–54.
12. Ivanov, V. S., and V. S. Solovej. "Marine multy-variable frequency drive." *Morskoe obrazovanie: tradicii, realii i perspektivy: materialy nauchno-prakticheskoy konferencii. 31 marta 2015 g.* Vol. 2. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2015: 67–71.
13. Ivanova, M. K., I. M. Kalinin, and V. S. Solovej. "Novye principy upravleniya tormozheniem sudovyh grebnyh ehlektroprivodov." *Mezhdunarodnaya konferenciya po sudostroeniyu i okeanotekhnike 2016. Tezisy dokladov*. SPb.: GMTU, 2016: 45–46.
14. Horoshenskij, A. V. "Tormozhenie sudna s vinto-rulevymi kolonkami." *Materialy VII mezhvuzovskoj nauchno-prakticheskoy konferencii aspirantov, studentov i kursantov «Sovremennye tendencii razvitiya vodnogo transporta Rossii»*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2016: 202–205.
15. Andronnikov, D. "Osobennosti vybora i primeneniya rezistorov v silovoj tekhnike." *Silovaya ehlektronika* 2 (2007): 4–8.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мальшев Владимир Алексеевич — кандидат технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
mva1945spb@mail.ru
Иванов Владимир Сергеевич — кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова»
vlad-iv-ov@yandex.ru, edas@gumrf.ru
Соловей Валерий Сергеевич — аспирант.
Научный руководитель:
Иванов Владимир Сергеевич.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова»
walbel@mail.ru

IFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Malyshev Vladimir Alekseevich — PhD, professor.
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
mva1945spb@mail.ru
Ivanov Vladimir Sergeevich — PhD, associate professor.
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
vlad-iv-ov@yandex.ru, edas@gumrf.ru
Solovey Valery Sergeevich — postgraduate.
Supervisor:
Ivanov Vladimir Sergeevich.
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
walbel@mail.ru

Статья поступила в редакцию 22 августа 2016 г.